Interaktive multivariate Tilt Maps zur immersiven explorativen Analyse raum-zeitlicher und hierarchischer Geodaten



Darius Schlese

Matrikelnummer: 4440222

1. Gutachter: Prof. Dr. Gabriel Zachmann
2. Gutachter: Prof. Dr. Peter Haddawy

Betreuerin: M.Sc. Judith Boeckers

Fachbereich 3: Mathematik und Informatik
Universität Bremen

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science (M.Sc.)

8. August 2026

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Teile meiner Arbeit, die wortwörtlich oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Gleiches gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet, dazu zählen auch KI-basierte Anwendungen oder Werkzeuge. Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsleistung eingereicht.

☑ Ich habe KI-basierte Anwendungen und/oder Werkzeuge genutzt und diese im Anhang B „Nutzung KI-basierter Anwendungen“ dokumentiert.

Erklärung zur Veröffentlichung von Bachelor- oder Masterarbeiten

Die Abschlussarbeit wird zwei Jahre nach Studienabschluss dem Archiv der Universität Bremen zur dauerhaften Archivierung angeboten. Archiviert werden:

1. Masterarbeiten mit lokalem oder regionalem Bezug sowie pro Studienfach und Studienjahr 10 % aller Masterarbeiten.

2. Bachelorarbeiten des jeweils ersten und letzten Bachelorabschlusses pro Studienfach und Jahr.

☑ Ich bin damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit im Universitätsarchiv für wissenschaftliche Zwecke von Dritten eingesehen werden darf.

☐ Ich bin damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit nach 30 Jahren (gem. § 7 Abs. 2 BremArchivG) im Universitätsarchiv für wissenschaftliche Zwecke von Dritten eingesehen werden darf.

☐ Ich bin nicht damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit im Universitätsarchiv für wissenschaftliche Zwecke von Dritten eingesehen werden darf.

Einverständniserklärung zur elektronischen Überprüfung der Arbeit auf Plagiate

Eingereichte Arbeiten können nach § 18 des Allgemeinen Teil der Bachelor- bzw. der Masterprüfungsordnungen der Universität Bremen mit qualifizierter Software auf Plagiatsvorwürfe untersucht werden.
Zum Zweck der Überprüfung auf Plagiate erfolgt das Hochladen auf den Server der von der Universität Bremen aktuell genutzten Plagiatssoftware.

☑ Ich bin damit einverstanden, dass die von mir vorgelegte und verfasste Arbeit zum oben genannten Zweck dauerhaft auf dem externen Server der aktuell von der Universität Bremen genutzten Plagiatssoftware, in einer institutionseigenen Bibliothek (Zugriff nur durch die Universität Bremen), gespeichert wird.

☐ Ich bin nicht damit einverstanden, dass die von mir vorgelegte und verfasste Arbeit zum o. g. Zweck dauerhaft auf dem externen Server der aktuell von der Universität Bremen genutzten Plagiatssoftware, in einer institutionseigenen Bibliothek (Zugriff nur durch die Universität Bremen), gespeichert wird.

Das Einverständnis der dauerhaften Speicherung des Textes ist freiwillig. Die Einwilligung kann jederzeit durch Erklärung gegenüber der Universität Bremen, mit Wirkung für die Zukunft, widerrufen werden. Weitere Informationen zur Überprüfung von schriftlichen Arbeiten durch die Plagiatssoftware sind im Nutzungs- und Datenschutzkonzept enthalten. Diese finden Sie auf der Internetseite der Universität Bremen.

Mit meiner Unterschrift versichere ich, dass ich die obenstehenden Erklärungen gelesen und verstanden habe und bestätige die Richtigkeit der gemachten Angaben.



Darius Schlese
8. August 2026

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Judith Boeckers für die intensive Betreuung meiner Masterarbeit, ihr hilfreiches Feedback und die Unterstützung während des gesamten Arbeitsprozesses. Ebenso danke ich Prof. Dr. Gabriel Zachmann und Prof. Dr. Peter Haddawy. Sie standen mir jederzeit mit Rat und Anregungen zur Seite. Darüber hinaus testeten sie während des Entwicklungsprozesses meine Anwendung und gaben mir Feedback. Außerdem danke ich allen Personen, die an meiner Studie teilgenommen haben.

Zuletzt will ich meinen Eltern und meinem Bruder meinen großen Dank aussprechen. Sie haben mich während meines gesamten Studiums unterstützt, an mich geglaubt und mir stets Rückhalt gegeben.

Zusammenfassung

Die Tilt Map von Yang et al. wechselt abhängig von ihrem Neigungswinkel fließend zwischen den Ansichten Choroplethenkarte, Prism Map und Balkendiagramm. Jedoch ist sie auf die Darstellung einer Variable zu einem Zeitpunkt beschränkt, weshalb sich keine Zusammenhänge zwischen mehreren Variablen erkennen lassen. Deshalb entwickelte ich die erweiterte Tilt Map. Diese soll die explorative Analyse multivariater raum-zeitlicher und hierarchischer Geodaten in virtueller Realität unterstützen.

Für die gleichzeitige Darstellung mehrerer Variablen implementierte ich zwei Varianten. Bei der einzelnen Tilt Map kodieren die Farbe und die Höhe jeweils eine Variable. Die Tilt Map Gruppe besteht aus mehreren Tilt Maps, die gemeinsam bedient werden. Jede Tilt Map stellt dabei eine Variable dar. Eine Benutzeroberfläche ermöglicht die Konfiguration der Tilt Maps und Gruppen sowie die Auswahl der zu untersuchenden Daten und Gebiete. Mithilfe eines Zeitreglers lässt sich der Zeitpunkt verändern, wodurch Daten über einen Zeitraum hinweg untersucht werden können. Ein Laser unterstützt das Ablesen und Vergleichen von Werten und ermöglicht einen Drilldown. Mit diesem können die Daten in einer tieferen Ebene untersucht werden.

In einer Studie ($N = 17$) verglich ich die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe. Die Teilnehmenden bearbeiteten zwei Aufgaben zur Identifikation von Maximalwerten und drei Aufgaben zur Beurteilung von Zusammenhängen zwischen zwei Variablen. Bei den Aufgaben zur Identifikation von Maximalwerten beantworteten alle Teilnehmenden die Aufgaben mit beiden Varianten korrekt. Allerdings ist die Bearbeitungszeit mit der Tilt Map Gruppe signifikant kürzer. Bei den Zusammenhangsaufgaben bestehen keine signifikanten Unterschiede bei der Korrektheit und der Bearbeitungszeit. Dennoch wurden bei allen Zusammenhangsaufgaben mit der einzelnen Tilt Map mehr korrekte Antworten gegeben. Trotz dieses Ergebnisses bevorzugte die Mehrheit insgesamt die Tilt Map Gruppe. Auch hinsichtlich des Ablesens von Werten, des Erkennens von Zusammenhängen, der visuellen Struktur und der Interpretation bevorzugte die Mehrheit die Tilt Map Gruppe. Die subjektive Sicherheit und die wahrgenommene Arbeitsbelastung unterscheiden sich zwischen den Varianten nicht signifikant. Die Auswertung zur Nutzung der Ansichten zeigt, dass die Teilnehmenden bei allen Aufgaben den größten Anteil der Bearbeitungszeit im Balkendiagramm verbrachten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Variante von der jeweiligen Analyseaufgabe abhängen sollte. Die Tilt Map Gruppe ermöglicht eine schnellere Identifikation von Maximalwerten. Die einzelne Tilt Map scheint für das Erkennen von Zusammenhängen tendenziell besser geeignet zu sein.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **xiii**

Tabellenverzeichnis **xv**

Abkürzungsverzeichnis **xvii**

1 Einleitung **1**
1.1 Forschungsziel und Forschungsfragen 2
1.2 Struktur der Arbeit 3

2 Grundlagen und verwandte Arbeiten **5**
2.1 Virtuelle Realität 5
2.1.1 Head-Mounted Displays 6
2.1.2 Interaktion mit der virtuellen Umgebung 6
2.1.3 Immersion und Präsenz 7
2.2 Immersive Analytics und Immersive Visualisierung 7
2.2.1 Immersive Geovisualisierung 7
2.2.2 Immersive Visualisierung und Analyse von raum-zeitlichen Daten . 10
2.2.3 Immersive Visualisierung und Analyse von multivariaten Daten . . 11
2.2.4 Immersive Interaktion und Selektion 12
2.2.5 Erkenntnisse aus den verwandten Arbeiten 13

3 Erweiterte Tilt Map **15**
3.1 Neigungswinkel der erweiterten Tilt Map 15
3.1.1 Bestimmung des Neigungswinkels 16
3.2 Visualisierung der erweiterten Tilt Map 18
3.3 Einzelne Tilt Map und Tilt Map Gruppe 20
3.3.1 Einzelne Tilt Map 20
3.3.2 Tilt Map Gruppe 21

3.4 Interaktionsmöglichkeiten und Werkzeuge 22
3.4.1 Arbeitsmodus und Bearbeitungsmodus 23
3.4.2 Zeitregler 25
3.4.3 Laser 26
3.4.4 Drilldown 27
3.4.5 Benutzeroberfläche 28
3.5 Technische Umsetzung 32
3.5.1 Optimierung 33

4 Studie: Einzelne Tilt Map vs. Tilt Map Gruppe 35
4.1 Ziel und Hypothesen der Studie 35
4.2 Methodik 36
4.2.1 Aufgaben der Studie 36
4.2.2 Datenerhebung 40
4.2.3 Versuchsaufbau und Ablauf der Studie 40
4.2.4 Datenauswertung 43
4.3 Ergebnisse 44
4.3.1 Aufgabe 1 und 2 45
4.3.2 Aufgabe 3 bis 5 48
4.3.3 NASA-TLX 52
4.3.4 Abschließende Fragen 53

5 Diskussion 57
5.1 Identifikation von Maximalwerten 57
5.1.1 Bearbeitungszeit 58
5.2 Zusammenhangsaufgaben 59
5.2.1 Bearbeitungszeit 60
5.3 Nutzungsdauer der Ansichten 61
5.4 Bewegungsdaten 62
5.5 NASA-TLX 62
5.6 Forschungsfragen 63

6 Limitierungen und Ausblick 65
6.1 Limitierungen 65
6.2 Ausblick 66
6.2.1 Künftige Erweiterungen 67

7 Fazit **69**

Literaturverzeichnis **71**

Digitaler Anhang **75**

Anhang A Fragen der Studie und zusätzliche Ergebnisse **77**

Anhang B Nutzung KI-basierter Anwendungen **85**

Abbildungsverzeichnis

2.1 Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum 5
2.2 Ansichten der Tilt Map 9
2.3 STC in VR 10

3.1 Verwendetes Koordinatensystem und Vektoren der Tilt Map 16
3.2 Sprunghafter Wechsel der Ansicht beim Greifen der Tilt Map 17
3.3 Ansichten der erweiterten Tilt Map 19
3.4 Winkelbereiche der erweiterten Tilt Map 19
3.5 Balkendiagramm mit der Farblegende 20
3.6 Tilt Map Gruppe in der Prism Map 21
3.7 Tilt Map Gruppe im Balkendiagramm 22
3.8 Auswahl eines Zielpunktes für die Teleportation 23
3.9 Löschvorgang einer Tilt Map 24
3.10 Tilt Map einer Gruppe hinzufügen 24
3.11 Interaktion mit dem Zeitregler 25
3.12 Interaktion mit dem Laser 26
3.13 Hilfslinie bei einer Tilt Map Gruppe 27
3.14 Drilldown-Funktion 28
3.15 Bedienung der Benutzeroberfläche in der virtuellen Umgebung 29
3.16 Benutzeroberfläche einer Tilt Map und einer Tilt Map Gruppe 29
3.17 Benutzeroberfläche zum Erstellen einer Tilt Map 30
3.18 Benutzeroberfläche für die Einstellungen der Tilt Map und der Tilt Map Gruppe 31
3.19 Benutzeroberfläche für die Einstellungen des Zeitreglers 31
3.20 Vereinfachtes Komponentendiagramm der zentralen Bestandteile und ihrer Beziehungen 32
3.21 Vergleich der Tilt Map mit gleichfarbigen seitlichen Flächen und dunkler gefärbten seitlichen Flächen 34

4.1 Virtuelle Umgebung des Tutorials 41
4.2 Virtuelle Umgebung der Studie 41
4.3 Ablauf der Studie in kompakter Form 42
4.4 Verteilung der Vorerfahrung der Teilnehmenden 44
4.5 Vergleich der Bearbeitungszeiten zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe für Aufgabe 1 und 2. 46
4.6 Durchschnittliche Verteilung der Bearbeitungszeit auf die Ansichten für Aufgabe 1 und 2 47
4.7 Vergleich der Bearbeitungszeiten zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe für Aufgabe 3 bis 5. 50
4.8 Durchschnittliche Verteilung der Bearbeitungszeit auf die Ansichten für Aufgabe 3 bis 5 51
4.9 Ergebnisse des NASA-TLX 53
4.10 Bevorzugte Bedingung der Teilnehmenden in verschiedenen Aspekten . . . 54

Tabellenverzeichnis

4.1 Aufgaben der Studie 37
4.2 Übersicht der Gegenbalancierung für die Aufgaben 3 bis 5 39
4.3 Deskriptive Ergebnisse und statistische Vergleiche für Aufgabe 1 und 2 . . 45
4.4 Deskriptive Ergebnisse und statistische Vergleiche der Ansichtswechsel, Lasernutzung und Bewegungsdaten für Aufgabe 1 und 2 48
4.5 Deskriptive Ergebnisse und statistische Vergleiche für Aufgabe 3, Aufgabe 4 und Aufgabe 5 49
4.6 Deskriptive Ergebnisse und statistische Vergleiche der Ansichtswechsel, Lasernutzung und Bewegungsdaten für die Aufgaben 3 bis 5 52

A.1 Demografische Fragen der Studie 78
A.2 Fragen zur Vorerfahrung 79
A.3 Gesundheitliche Fragen vor der Studie 80
A.4 Gesundheitliche Fragen nach der Studie 80
A.5 Vergleichende Abschlussfragen der Studie und Feedbackfragen 81
A.6 Die sechs Dimensionen und Fragen des NASA-TLX 82
A.7 Deskriptive Ergebnisse und statistische Vergleiche der zeitlichen Anteile der Ansichten an der Bearbeitungszeit für Aufgabe 1 bis 5 83
A.8 Häufigkeiten der gewählten Zusammenhänge für die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe 83
A.9 Deskriptive Ergebnisse und statistische Vergleiche der Bewertungen des NASA-TLX zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe . . 84

B.1 Dokumentation der KI-Nutzung (Teil 1) 86
B.2 Dokumentation der KI-Nutzung (Teil 2) 87
B.3 Dokumentation der KI-Nutzung (Teil 3) 88
B.4 Dokumentation der KI-Nutzung (Teil 4) 89
B.5 Dokumentation der KI-Nutzung (Teil 5) 90

B.6 Dokumentation der KI-Nutzung (Teil 6) 91
B.7 Ausführliche Eingaben (Prompts) zur KI-Nutzung (Teil 1) 92
B.8 Ausführliche Eingaben (Prompts) zur KI-Nutzung (Teil 2) 93
B.9 Ausführliche Eingaben (Prompts) zur KI-Nutzung (Teil 3) 94
B.10 Ausführliche Eingaben (Prompts) zur KI-Nutzung (Teil 4) 95

Abkürzungsverzeichnis

p_{Holm}	p-Wert der Holm-Korrektur
r_{rb}	Rangbiseriale Korrelation
IQR	Interquartilsabstand
Md	Median
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
HMD	Head-Mounted Display
NASA-TLX	NASA Task Load Index
STC	Space-Time Cube
VR	Virtual Reality
W	Teststatistik vom Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test

Kapitel 1

Einleitung

In unserer Gesellschaft werden zunehmend große Mengen an Daten erfasst (Statista, 2025). Dazu gehören Geodaten. Diese besitzen eine räumliche Zuordnung und beschreiben beispielsweise Temperaturwerte an bestimmten Koordinaten oder innerhalb einer Stadt (Lakes, 2009). Solche Daten können sich im Laufe der Zeit verändern. Liegen sie zu unterschiedlichen Zeitpunkten vor, handelt es sich um raum-zeitliche Geodaten. Diese können zusätzlich für mehrere Variablen vorhanden sein. So können für dieselbe Region Krankheitsdaten, Temperaturwerte und Niederschlagsmengen über einen Zeitraum vorliegen. Dadurch kann die Analyse von multivariaten raum-zeitlichen Geodaten komplex sein, weil nicht nur einzelne Werte betrachtet werden, sondern auch räumliche Verteilungen, zeitliche Veränderungen und mögliche Zusammenhänge zwischen Variablen (Shekhar et al., 2015). Demzufolge werden Analysewerkzeuge benötigt, die solche Muster und Zusammenhänge sichtbar machen.

Um die Analyse komplexer Daten zu unterstützen, bieten sich Visualisierungen an. Diese überführen abstrakte Werte in eine verständlichere visuelle Form. Dadurch können Muster und Unterschiede leichter wahrgenommen werden (Sadiku et al., 2016). Für Geodaten können beispielsweise Karten verwendet werden, da sie Datenwerte mit der dazugehörigen räumlichen Lage verbinden. Beispiele dafür sind Choroplethenkarten (Choropleth Maps) oder Prism Maps. Bei beiden Darstellungsformen werden die Werte aus den Daten räumlichen Flächen wie Städten oder Regionen zugeordnet. Choroplethenkarten sind zweidimensionale (2D) Karten und kodieren die Werte durch Farben. Dagegen sind Prism Maps dreidimensionale (3D) Karten und kodieren die Werte durch die Höhe der Flächen (Yang et al., 2021). Diese Darstellungsformen können dabei helfen, räumliche Verteilungen sichtbar zu machen.

Eine weitere Möglichkeit, Daten zu visualisieren, sind Balkendiagramme. In diesen werden Balken nebeneinander angeordnet und die Werte durch ihre Höhe kodiert. Durch diese Anordnung können unterschiedliche Balkenhöhen genauer miteinander verglichen

werden (Cleveland und McGill, 1984). Jedoch geht dabei die geografische Anordnung verloren.

Visualisierungen können auch in immersiven Umgebungen wie der virtuellen Realität (Virtual Reality) dargestellt werden. Dort können sie räumlich wahrgenommen und manipuliert werden. Ein Beispiel dafür ist die Tilt Map (Yang et al., 2021). Diese ändert ihre Darstellung abhängig von ihrem Neigungswinkel fließend zwischen Choroplethenkarte, Prism Map und Balkendiagramm. Die Tilt Map stellt jedoch nur eine Variable dar und ist in ihren Interaktionsmöglichkeiten begrenzt. Sie kann gegriffen werden, wodurch sich ihre Position und Rotation verändern lassen.

Aufgrund dieser Einschränkungen entwickelte ich die erweiterte Tilt Map zur explorativen Analyse multivariater raum-zeitlicher und hierarchischer Geodaten. Diese baut auf dem grundlegenden Prinzip der Tilt Map auf und erweitert sie. Die erweiterte Tilt Map bietet zwei Varianten zur gleichzeitigen Darstellung mehrerer Variablen. Die erste Variante ist die einzelne Tilt Map, bei der Farbe und Höhe jeweils eine Variable darstellen. Die zweite Variante ist die Tilt Map Gruppe, bei der mehrere Tilt Maps einer Gruppe zugeordnet werden. Dabei stellt jede Tilt Map eine Variable dar. Darüber hinaus bietet die erweiterte Tilt Map weitere Interaktionsmöglichkeiten zur Unterstützung der Analyse.

1.1 Forschungsziel und Forschungsfragen

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung der erweiterten Tilt Map zur explorativen Analyse multivariater raum-zeitlicher und hierarchischer Geodaten. Außerdem vergleiche ich die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe im Rahmen einer Studie anhand verschiedener Analyseaufgaben miteinander. Daraus ergeben sich die folgenden Forschungsfragen:

FF1: Wie kann die Tilt Map erweitert werden, um die explorative Analyse multivariater raum-zeitlicher und hierarchischer Geodaten zu unterstützen?

FF2: Wie unterscheiden sich die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe hinsichtlich der Korrektheit und Bearbeitungszeit bei Analyseaufgaben?

FF3: Wie sicher sind sich die Teilnehmenden bei der Beantwortung von Analyseaufgaben mit der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe?

FF4: Wie unterscheiden sich die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe hinsichtlich der Nutzung der Ansichten bei Analyseaufgaben?

FF5: Wie werden die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe von den Teilnehmenden subjektiv bewertet?

1.2 Struktur der Arbeit

In Kapitel 2 erläutere ich die Grundlagen und präsentiere Forschungsarbeiten im selben Forschungsgebiet. Anhand dieser zeige ich die Forschungslücke auf. Danach thematisiert Kapitel 3 die erweiterte Tilt Map. Dazu gehören die Bestimmung des Neigungswinkels und die Darstellung der Ansichten. Außerdem stelle ich die Interaktionsmöglichkeiten und Werkzeuge vor. Darauffolgend behandelt Kapitel 4 die Nutzerstudie. In dieser vergleiche ich zwei Varianten der erweiterten Tilt Map zur gleichzeitigen Darstellung mehrerer Variablen miteinander. Dafür erkläre ich das Ziel und die Methodik der Studie. Anschließend präsentiere ich die Ergebnisse. In Kapitel 5 diskutiere und interpretiere ich die Ergebnisse. Daraufhin erläutere ich in Kapitel 6 die Limitierungen und schlage Ansätze für künftige Forschungsarbeiten und neue Werkzeuge für die erweiterte Tilt Map vor. Abschließend ziehe ich in Kapitel 7 ein Fazit zu dieser Arbeit und fasse die wichtigsten Ergebnisse zusammen.

Kapitel 2

Grundlagen und verwandte Arbeiten

In diesem Kapitel erläutere ich grundlegende Begriffe zum Verständnis dieser Arbeit. Zusätzlich vertiefe ich das Verständnis der Grundlagen anhand verschiedener Forschungsarbeiten aus demselben Forschungsgebiet. Diese Forschungsarbeiten kategorisiere und stelle ich dabei vor. Zum Schluss fasse ich die Erkenntnisse aus den Arbeiten zusammen, um die Forschungslücke dieser Arbeit aufzuzeigen.

2.1 Virtuelle Realität

Virtuelle Realität (VR) hat verschiedene Definitionen (Abbas et al., 2023; Gigante, 1993; Yoh, 2001). Allgemein lässt sich VR als eine Technologie beschreiben, die es Menschen ermöglicht, eine virtuelle Umgebung (Virtual Environment) räumlich wahrzunehmen, in diese einzutauchen und mit ihr zu interagieren (Sherman und Craig, 2018, S. 6–15). Diese Umgebung kann der realen Welt nachempfunden oder fiktiv sein. In der virtuellen Umgebung können eigene physikalische Gesetze definiert werden. Dadurch lassen sich Umgebungen und Interaktionen schaffen, welche nicht auf die physikalischen Grenzen der realen Welt beschränkt sind (Milgram und Kishino, 1994).

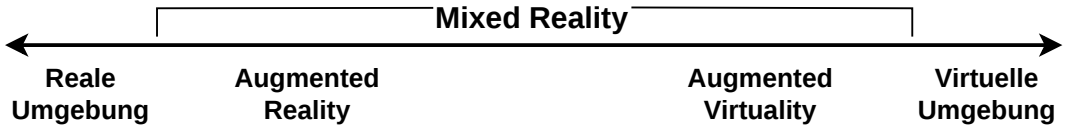


Abbildung 2.1 Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum (Milgram und Kishino, 1994).

Zur Einordnung realer und virtueller Umgebungen stellen Milgram und Kishino das Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum (Reality–Virtuality Continuum) vor (Milgram und Kishino, 1994). Dieses ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Auf der linken Seite befindet sich die

vollständig reale Umgebung und auf der rechten Seite die vollständig virtuelle Umgebung. Der Bereich dazwischen wird als Mixed Reality bezeichnet. Dort werden virtuelle und reale Inhalte kombiniert. Mixed Reality lässt sich weiter in Augmented Reality und Augmented Virtuality unterteilen. Bei der Augmented Reality wird eine überwiegend reale Umgebung durch virtuelle Inhalte erweitert. Daher liegt dieser Bereich näher an der realen Umgebung. Die Augmented Virtuality liegt näher an der virtuellen Umgebung. Diese beschreibt eine überwiegend virtuelle Umgebung, die durch reale Inhalte erweitert wird.

Die erweiterte Tilt Map wird in VR dargestellt und nutzt ausschließlich virtuelle Inhalte. Deshalb ist sie im Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum dem Bereich der vollständig virtuellen Umgebung zuzuordnen.

2.1.1 Head-Mounted Displays

Die Anwendung der erweiterten Tilt Map nutzt ein Head-Mounted Display (HMD), um die virtuelle Umgebung darzustellen. Dieses wird am Kopf getragen und zeigt vor jedem Auge ein leicht unterschiedliches Bild. Dadurch lässt sich ein stereoskopischer Tiefeneindruck erzeugen. Außerdem können die Position und Rotation des HMDs erfasst werden (Shibata, 2002). Dies ermöglicht es, die Perspektive innerhalb der virtuellen Umgebung an die Kopfbewegungen anzupassen.

2.1.2 Interaktion mit der virtuellen Umgebung

Die Anwendung der erweiterten Tilt Map verwendet Controller als Eingabegerät. Dabei wird mit jeder Hand ein Controller bedient, um mit der virtuellen Umgebung zu interagieren. Die Bewegungen der Controller werden in die virtuelle Umgebung übertragen, wodurch sich beispielsweise virtuelle Objekte greifen und bewegen lassen (Luong et al., 2023). In Kapitel 2.2.4 beschreibe ich unter anderem die Vorteile von Controllern.

Eine weitere Möglichkeit, mit der virtuellen Umgebung zu interagieren, ist die freie Handsteuerung. Mithilfe von Handtracking werden durch Kameras oder Sensoren die Hände der nutzenden Person erfasst und in die virtuelle Umgebung übertragen (Luong et al., 2023). Dadurch können Aktionen über natürliche Gesten ausgeführt werden. Macht die Person beispielsweise mit ihren physischen Händen eine Greifbewegung, wird in der virtuellen Umgebung ein Objekt gegriffen.

2.1.3 Immersion und Präsenz

Im Allgemeinen wird Immersion als das „Eintauchen“ in eine andere Realität oder Erfahrung verstanden. Dabei wird die physische Umgebung weniger wahrgenommen (Murray, 1997, S. 99). In Bezug auf virtuelle Umgebungen ist Immersion das Ausmaß, in dem ein technisches System für die Sinne der Nutzenden eine umfassende, umgebende und lebendige Illusion einer virtuellen Umgebung erzeugt (Slater und Wilbur, 1997).

Davon abzugrenzen ist die Präsenz (Presence). Sie beschreibt das Gefühl, sich tatsächlich in der virtuellen Umgebung zu befinden (Slater, 2003).

2.2 Immersive Analytics und Immersive Visualisierung

Immersive Analytics bezeichnet die Analyse von Daten mithilfe immersiver und interaktiver Analysewerkzeuge, die eine körperliche Einbindung der Nutzenden ermöglichen. Dies kann beispielsweise in VR oder Augmented Reality umgesetzt werden. Das Ziel ist es, das Datenverständnis und die Entscheidungsfindung zu unterstützen (Dwyer et al., 2018, S. 1–2; Kraus et al., 2021). Die immersive Visualisierung (Immersive Visualization) ist ein Bestandteil von Immersive Analytics und stellt unter anderem die Daten in der immersiven Umgebung dar (Kraus et al., 2021). Immersive Analytics umfasst darüber hinaus den Analyseprozess sowie das Zusammenspiel von Analyse, Visualisierung, Interaktion und multisensorischen Erfahrungen.

Die erweiterte Tilt Map ist eine immersive Visualisierung und unter anderem für analytische Aufgaben konzipiert. Dazu zählt das Finden von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Variablen innerhalb eines Zeitraums. Daher gehört sie zum Forschungsgebiet der Immersive Analytics.

Die konkrete Umsetzung immersiver Visualisierungen hängt oft von der Art der vorhandenen Daten ab. Deshalb ordne ich die verwandten Arbeiten thematisch den Kategorien immersive Geovisualisierung, immersive Visualisierung und Analyse von raum-zeitlichen Daten sowie immersive Visualisierung und Analyse von multivariaten Daten zu und stelle sie vor. Abschließend thematisiere ich die immersive Interaktion und Selektion.

2.2.1 Immersive Geovisualisierung

Immersive Umgebungen ermöglichen es, bei der Darstellung von Geodaten die dritte Dimension räumlich wahrzunehmen. Dadurch kann das Verständnis von räumlichen Zusammenhängen unterstützt werden. Ein Beispiel dafür liefern Bennett et al. in einer Studie zur archäologischen Landschaftsanalyse (Bennett et al., 2014). Die Studie zeigt, dass die

Teilnehmenden in einem vollständig immersiven System ein besseres Ortsgefühl haben und Merkmale besser dem räumlichen Kontext zuordnen können. Außerdem bevorzugen viele Teilnehmende das immersive System gegenüber einem geografischen Informationssystem in einer Desktop-Umgebung. Jedoch fällt es den Teilnehmenden schwerer, sich in der 3D-Umgebung zu orientieren und den Überblick über die Landschaft zu behalten. Dies verdeutlicht, dass immersive Kartensysteme intuitive Navigations- und Orientierungshilfen benötigen.

Die Höhe kann als zusätzliche Variable verwendet werden. Dies zeigen Yang et al. anhand von Ursprung-Ziel-Flusskarten (Origin-Destination Flow Maps) (Yang et al., 2019). In mehreren Studien vergleichen sie verschiedene 2D- und 3D-Darstellungen auf flachen Karten und 3D-Globen. Die Ergebnisse zeigen, dass der 3D-Globus bei einer hohen Anzahl globaler Flüsse die schnellsten und genauesten Ergebnisse beim Vergleich von Flussmengen liefert. Die Flüsse werden dabei als 3D-Röhren dargestellt, wobei deren Höhe proportional zur Entfernung zwischen Ursprung und Ziel ist. Durch diese Darstellung können Überlagerungen reduziert werden. Außerdem lassen sich Verdeckungen zwischen den Röhren durch die Änderung des Blickwinkels reduzieren.

Eine Möglichkeit, quantitative Werte mit Orten zu verbinden, ist die Verwendung von 3D-Balken. Diese werden an den entsprechenden Stellen platziert, wobei ihre Höhe den jeweiligen Wert repräsentiert. Durch die unterschiedlichen Entfernungen der Balken zur betrachtenden Person kann es zu perspektivischen Verzerrungen kommen. Dies erschwert den Wertevergleich zwischen den Balken (Quach und Jenny, 2020). Zur Lösung des Problems stellen Quach und Jenny zwei Visualisierungen für immersive Umgebungen vor. Beim Egocentric Bar Chart wird um die nutzende Person ein virtuelles 360-Grad-Balkendiagramm platziert. Die Circular Map with Bars verwendet eine kreisförmige Karte der Umgebung mit kleinen 3D-Balken im Vordergrund. In beiden Darstellungen wird jeder Balken in der Umgebung durch einen nahen Referenzbalken ergänzt und diesem räumlich zugeordnet. Dadurch kann der Einfluss der perspektivischen Verzerrung verringert werden. In einer Studie werden diese Methoden mit einer Darstellung verglichen, bei der die Balken ausschließlich an ihren geografischen Positionen platziert sind. Das Egocentric Bar Chart ist beim Schätzen und Vergleichen von Werten am genauesten. Die Circular Map with Bars erleichtert den Vergleich zwischen weit entfernten Balken.

Yang et al. untersuchen in einer VR-Studie Choroplethenkarten, bei denen Werte durch die Farbe dargestellt werden, und Prism Maps, bei denen die Höhe der Flächen den jeweiligen Wert darstellt (Yang et al., 2021). Die Ergebnisse zeigen, dass die Teilnehmenden mit Prism Maps Werte besser ablesen und vergleichen können. Allerdings können durch die unterschiedlichen Höhen und Positionen der Flächen Verdeckungen und perspektivische

Verzerrungen entstehen. Dagegen ermöglichen Choroplethenkarten schnellere Antworten und eignen sich besser für einen schnellen Überblick.

Um die Vorteile beider Darstellungen zu kombinieren, entwickeln die Autoren die Tilt Map (Yang et al., 2021). Diese ermöglicht einen fließenden Übergang zwischen einer Choroplethenkarte, einer Prism Map und einem Balkendiagramm. Der Neigungswinkel der Tilt Map bestimmt, welche Ansicht dargestellt wird. Dabei kann die nutzende Person die Tilt Map greifen und dadurch beliebig bewegen und rotieren. Die VR ermöglicht eine direkte räumliche Interaktion mit der Tilt Map. Außerdem kann diese aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden. So lassen sich Verdeckungen intuitiv durch Kopfbewegungen verringern. Durch die nebeneinander angeordneten Balken im Balkendiagramm können außerdem perspektivische Verzerrungen reduziert und die Balken einfacher verglichen werden. Abbildung 2.2 zeigt auf der linken Seite die drei Ansichten der Tilt Map. Auf der rechten Seite sind die Winkelbereiche dargestellt, in denen zwischen den Ansichten gewechselt wird. Die Farbe und die Höhe kodieren dabei dieselbe Variable, z. B. die Bevölkerungsdichte.

In einer weiteren Studie vergleichen Yang et al. die Tilt Map mit einer Side-by-Side-Darstellung und einer Toggle-Darstellung. Die Side-by-Side-Darstellung zeigt Choroplethenkarte, Prism Map und Balkendiagramm gleichzeitig nebeneinander. Bei der Toggle-Darstellung wird per Knopfdruck zwischen den Ansichten gewechselt. Die Tilt Map ist genauer als die Side-by-Side-Darstellung und schneller als die Toggle-Darstellung. Darüber hinaus wird sie von den Teilnehmenden bevorzugt. Zusätzlich vermuten die Autoren, dass der kontinuierliche Übergang die kognitive Belastung beim Wechsel zwischen den Ansichten reduziert.

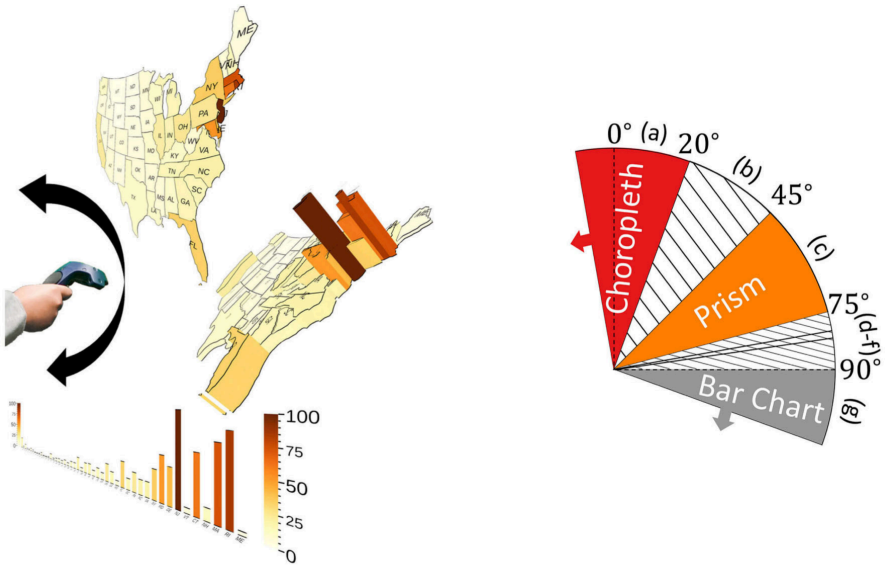


Abbildung 2.2 Ansichten der Tilt Map (Yang et al., 2021).

Die vorgestellten Arbeiten zeigen, wie immersive Geovisualisierungen genutzt werden können, um das Verständnis räumlicher Daten zu unterstützen. Die zeitliche Dimension wird dabei jedoch nicht berücksichtigt. Viele Datensätze beinhalten die zeitliche Entwicklung von Variablen. Deshalb werden Anwendungen benötigt, die eine raum-zeitliche Analyse unterstützen.

2.2.2 Immersive Visualisierung und Analyse von raum-zeitlichen Daten

Eine Möglichkeit, raum-zeitliche Daten zu visualisieren, ist der Space-Time Cube (STC). Dieser stellt die zeitliche Entwicklung von räumlichen Daten dar. Dies können z. B. Ereignisse oder Trajektorien sein. Die vertikale Achse repräsentiert dabei die Zeit. STCs in Desktop-Anwendungen leiden häufig unter Verdeckungen, fehlenden Tiefenhinweisen und perspektivischen Verzerrungen. Um diese Einschränkungen zu reduzieren, untersuchen Filho et al. einen STC in VR (Filho et al., 2020). Bei ihrem Ansatz wird der STC auf einem virtuellen Schreibtisch dargestellt. Der STC ist in Abbildung 2.3 zu sehen.

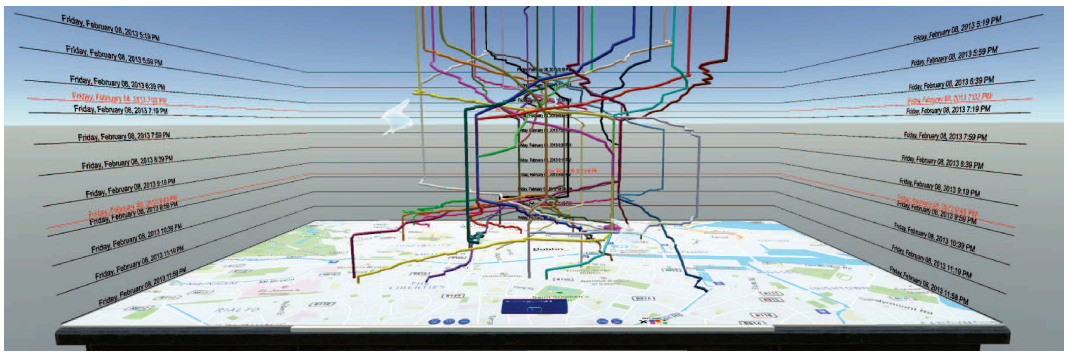


Abbildung 2.3 STC in VR (Filho et al., 2020).

Die Daten lassen sich durch Gesten manipulieren. Beispielsweise kann der STC gegriffen und skaliert werden. Außerdem lassen sich durch Tippen einzelne Trajektorien hervorheben und weitere Details anzeigen. Ein Vergleich zwischen ihrer VR-Anwendung und einer Desktop-Anwendung zeigt, dass die VR-Anwendung besser bedienbar ist und die mentale Belastung verringert. Durch Kopfbewegungen können Verdeckungen verringert werden, während die Tiefenwahrnehmung das Verständnis räumlicher Beziehungen unterstützt.

Während sich Filho et al. auf einen einzelnen STC konzentrieren, untersuchen Zhang et al. die Nutzung mehrerer STCs (Zhang et al., 2022). Dafür entwickeln sie TimeTables. Darin lassen sich einzelne Zeitschichten aus dem STC greifen und im Raum platzieren. Dadurch entsteht ein neuer STC mit der gewählten Zeitschicht. Außerdem lässt sich durch das Auseinanderziehen einer Zeitschicht die zeitliche Auflösung verändern. So kann beispielsweise

von einer Jahresansicht auf eine Monatsansicht gewechselt werden, um detailliertere Daten zu betrachten. Zusätzlich können Nutzende per Knopfdruck in eine egozentrische Ansicht wechseln.

Die Darstellung der Zeit ist oft vom Kontext der Anwendung abhängig. Ein Beispiel dafür ist FiberClay (Hurter et al., 2019). Diese Anwendung visualisiert 3D-Trajektorien. Daher ist die vertikale Achse bereits durch die räumliche Höhe der Trajektorien belegt. Die Zeit kann stattdessen über die Farbe entlang der Trajektorien dargestellt werden. Animierte Partikel veranschaulichen zusätzlich die Bewegungsrichtung.

Zur Steuerung der Zeit können Schieberegler (Slider) verwendet werden. Diese nutzen Cheymol et al. in ihrer VR-Anwendung (Cheymol et al., 2022). In dieser betrachten die Nutzenden einen 3D-Globus, um Kunstwerke verschiedener Kunstrichtungen räumlich und zeitlich zu erkunden. Dafür steuern sie mithilfe eines interaktiven Schiebereglers eine virtuelle Zeitachse. Dabei wird durch das Verschieben des Schiebereglers das ausgewählte Jahr verändert und durch das Biegen der angezeigte Zeitraum angepasst.

2.2.3 Immersive Visualisierung und Analyse von multivariaten Daten

Datensätze können neben raum-zeitlichen Bezügen auch mehrere Variablen enthalten. Solche multivariaten Daten können räumlich zugeordnet sein oder keinen geografischen Bezug haben. Zwischen diesen Variablen können Zusammenhänge bestehen. Ein Beispiel für eine Anwendung, die mit multivariaten Geodaten arbeitet, liefern Prachyabrued et al. (Prachyabrued et al., 2020). Sie nutzen eine Tiled-Display-Wall, um räumlich und zeitlich aufgelöste Fallzahlen des Dengue-Fiebers zusammen mit Bevölkerungs- und Wetterdaten sowie Daten zu potenziellen Mückenbrutstätten darzustellen. Diese besteht aus nebeneinander angeordneten Bildschirmen und bildet dadurch eine große Anzeigefläche. Auf dieser können mehrere Visualisierungen gleichzeitig angezeigt werden. Darauf aufbauend entwickeln Vögtle et al. das System weiter, um das kollaborative Arbeiten ortsunabhängig zu ermöglichen (Vögtle et al., 2022).

Auch klassische Visualisierungen werden in VR untersucht. Kraus et al. vergleichen verschiedene Darstellungen von Streudiagrammen (Scatterplots) für die Erkennung von Gruppen in den Daten (Kraus et al., 2020b). Dabei schneidet die Matrix aus 2D-Streudiagrammen schlechter ab als die untersuchten 3D-Streudiagramme. Außerdem deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die VR-Darstellungen die Erinnerung an zuvor identifizierte Gruppen unterstützen. Ein weiteres Beispiel sind Heatmaps. Kraus et al. vergleichen 2D-Heatmaps und übereinanderliegende 3D-Heatmaps auf einem Bildschirm und in VR (Kraus et al., 2020a). Beim Ablesen und Vergleichen einzelner Werte erzielen die Teilnehmenden mit 3D-Heatmaps genauere Ergebnisse als mit 2D-Heatmaps. Beim Vergleich der gesamten

Verteilung schneiden sie mit 2D-Heatmaps dagegen besser ab. Zusätzlich sind die Teilnehmenden mit 2D-Heatmaps in VR beim Ablesen einzelner Werte genauer und beim Vergleich der gesamten Verteilung schneller als auf dem Bildschirm. Zwei Teilnehmende geben an, dass ihnen die Tiefenwahrnehmung in VR hilft, die übereinanderliegenden Heatmaps voneinander zu unterscheiden.

Eine Möglichkeit, Visualisierungen intuitiv in VR zu erzeugen, zeigt die Anwendung ImAxes (Cordeil et al., 2017). In dieser lassen sich einzelne Datenachsen wie physische Objekte im Raum miteinander verbinden. Je nach Anordnung der Achsen wird automatisch eine passende Visualisierung der Daten dargestellt, wie z. B. verschiedene Arten von Streudiagrammen oder Histogramme. ImAxes nutzt als Grundlage das Immersive Analytics Toolkit, welches für die Erstellung interaktiver und skalierbarer Datenvisualisierungen in immersiven Umgebungen entwickelt wurde (Cordeil et al., 2019). Dieses übernimmt den Import der Datensätze und generiert die Geometrie der Visualisierungen.

Um mehrere Visualisierungen übersichtlich zu strukturieren, nutzen Hayatpur et al. in ihrer Anwendung den virtuellen Raum (Hayatpur et al., 2020). Die Nutzenden können Daten nach Variablen filtern und die daraus entstehenden Datenpanels horizontal, halbkreisförmig oder auf übereinanderliegenden Ebenen anordnen. Dabei unterstützen die horizontale und die halbkreisförmige Anordnung den Vergleich der Datenpanels. Die übereinanderliegenden Ebenen sorgen für getrennte Arbeitsbereiche. In der Anwendung werden zusätzlich die einzelnen Schritte der Datenanalyse räumlich angeordnet, wodurch der Analyseverlauf nachvollzogen werden kann. Ein großer virtueller Raum bietet ebenfalls die Möglichkeit zur kollaborativen Arbeit. So können in der VR-Anwendung FIESTA mehrere Personen gleichzeitig Visualisierungen aus multivariaten Daten erstellen (Lee et al., 2021). Diese können frei im Raum platziert werden und unterstützen damit die gemeinsame Analyse der Daten.

2.2.4 Immersive Interaktion und Selektion

Eine Voraussetzung für die Analyse ist die Interaktion mit der immersiven Umgebung und die Selektion der darin enthaltenen Objekte (Klein et al., 2022). In den zuvor betrachteten Arbeiten wurden bereits einige Interaktions- und Selektionsmethoden vorgestellt. Diese erfolgen häufig durch Greifen, Bewegen und Berühren, wie es ImAxes mit dem Verbinden der Datenachsen zeigt (Cordeil et al., 2017) oder TimeTables mit dem Auseinanderziehen, um die zeitliche Auflösung zu verändern (Zhang et al., 2022).

Um mit der virtuellen Umgebung zu interagieren, werden Eingabemodalitäten wie z. B. VR-Controller oder eine freie Handsteuerung benötigt. In einer Studie vergleichen Luong et al. diese beiden Eingabemodalitäten miteinander (Luong et al., 2023). Bei direkten Be-

rührungen bevorzugen die Teilnehmenden die freie Handsteuerung. Jedoch lässt sich kein signifikanter Leistungsvorteil gegenüber den VR-Controllern feststellen. Distanzaktionen, wie das Auswählen mithilfe eines Strahls oder Lasers (Raycast), sind mit VR-Controllern schneller. Zusätzlich berichten die Teilnehmenden, dass sie bei den Distanzaktionen mit den VR-Controllern ein höheres Kontrollgefühl und eine geringere körperliche Anstrengung haben. Außerdem sind sie bei der Verfolgung von Trajektorien präziser. Die Interaktion kann ebenfalls über weitere Eingabemodalitäten erfolgen, wie die Sprachsteuerung (Klein et al., 2022; Zhang et al., 2023). So können beispielsweise Elemente per Sprachbefehl aufgerufen und manipuliert werden, wodurch die Interaktion intuitiver und natürlicher gestaltet werden kann.

Neben der Wahl der Eingabemodalität hängt auch die Wahl der Interaktions- und Selektionsmethoden von der konkreten Visualisierung ab. Ein Beispiel dafür liefern Prouzeau et al. (Prouzeau et al., 2019). Sie nutzen 3D-Streudiagramme mit einer hohen Datendichte. Dadurch kommt es zu Verdeckungen der Datenpunkte, wodurch deren Selektion erschwert wird. Um dieses Problem zu minimieren, nutzen sie den taktilen Sinneskanal. Dabei wird die Datendichte anhand der Vibrationsstärke des Controllers vermittelt. Zusätzlich nutzen sie eine virtuelle Schnittebene, um verdeckte Datenpunkte hervorzuheben.

Einen hybriden Ansatz zur Selektion zeigen Montano-Murillo et al. (Montano-Murillo et al., 2020). Bei diesem markieren die Nutzenden grob ein Datenvolumen im 3D-Raum. Die darin enthaltenen Datenpunkte werden auf einem virtuellen Tablet dargestellt. Daraufhin können sie mithilfe eines physischen Tablets und Stifts eine präzise Selektion machen.

2.2.5 Erkenntnisse aus den verwandten Arbeiten

Die vorgestellten Arbeiten zeigen, dass immersive Umgebungen intuitive Interaktionen ermöglichen können. Außerdem können sie die kognitive Belastung und Verdeckungen reduzieren sowie die räumliche Wahrnehmung fördern. Dabei ordnete ich die Arbeiten den Kategorien immersive Geovisualisierung, immersive Visualisierung und Analyse von raumzeitlichen Daten sowie immersive Visualisierung und Analyse von multivariaten Daten zu. Teilweise lassen sie sich mehreren Kategorien zuordnen. Unter den betrachteten Arbeiten fehlen jedoch Anwendungen, welche alle Kategorien miteinander vereinen.

Als Beispiel verwende ich die Tilt Map, welche als Grundlage für diese Arbeit dient. Diese zeigt, wie die Werte einer Variable, z. B. die Bevölkerungsdichte, für geografische Orte dargestellt werden können. Darüber hinaus kann durch das Ändern des Neigungswinkels intuitiv und fließend zwischen den Ansichten gewechselt werden, um die Limitationen der einzelnen Ansichten zu umgehen. Dennoch ist die Tilt Map auf eine Variable beschränkt und es lassen sich keine Daten über einen Zeitraum hinweg betrachten. Dies könnte problematisch

sein, da Zusammenhänge und Muster möglicherweise erst zwischen mehreren Variablen und geografischen Orten innerhalb eines Zeitraums erkannt werden. Darüber hinaus fehlen Werkzeuge, welche die Nutzenden bei der Analyse unterstützen.

Diese fehlenden Aspekte der Tilt Map bilden die Forschungslücke. Daher entwickelte ich für diese Arbeit eine Anwendung, die das Konzept der Tilt Map übernimmt und um die multivariate sowie die zeitliche Dimension erweitert. Zusätzlich implementierte ich unterstützende Werkzeuge. Abschließend verglich ich zwei Varianten der erweiterten Tilt Map in einer Studie.

Kapitel 3

Erweiterte Tilt Map

Dieses Kapitel stellt die erweiterte Tilt Map vor. Dazu erläutere ich zuerst die Bestimmung des Neigungswinkels und präsentiere danach die Ansichten der Tilt Map. Daraufhin zeige ich zwei Varianten, mit denen mehrere Variablen gleichzeitig dargestellt werden können. Anschließend stelle ich die Interaktionsmöglichkeiten und Werkzeuge vor. Zum Schluss beschreibe ich die technische Umsetzung.

3.1 Neigungswinkel der erweiterten Tilt Map

Die erweiterte Tilt Map basiert auf dem grundlegenden Prinzip der Tilt Map und wechselt abhängig vom Neigungswinkel ihre Ansicht zwischen Choroplethenkarte, Prism Map und Balkendiagramm. Eine konkrete Berechnung des Neigungswinkels wird von Yang et al. nicht beschrieben (Yang et al., 2021). Zum Neigungswinkel wird Folgendes erläutert:
„In the Tilt Map we chose to couple the angle of the map relative to the ground, in the vertical plane of the user's view vector, to the type of visualisation shown."

Aus dieser Beschreibung ließ sich keine eindeutige Berechnung ableiten, weshalb ich die Autoren kontaktierte. In ihrer Antwort gaben sie an, dass die Implementierung der Tilt Map bereits einige Zeit zurücklag und sie sich nicht mehr an die genaue Umsetzung erinnern konnten. Sie erinnerten sich jedoch daran, dass bei der Berechnung des Neigungswinkels Probleme auftraten. Außerdem gingen sie in ihrer Implementierung davon aus, dass sich die nutzende Person an einer festen Position befindet. Des Weiteren erklärten sie, dass der Fokus auf dem Konzept des Wechsels zwischen 2D- und 3D-Ansichten liegt. Die genaue Bestimmung des Neigungswinkels kann an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden.

Während der Entwicklung der erweiterten Tilt Map testete ich verschiedene Varianten zur Berechnung des Neigungswinkels, wie z. B. eine globale Berechnung relativ zur Bodenebene oder eine Berechnung anhand der Kopfrichtung der nutzenden Person. Mehrere Personen

probierten die Varianten aus. Anhand des Feedbacks passte ich die Varianten an. Am Ende wählte ich die Variante, die sich für die meisten Personen am intuitivsten und effizientesten anfühlte. Diese wird im Folgenden erläutert.

3.1.1 Bestimmung des Neigungswinkels

Das linke Bild in Abbildung 3.1 zeigt das in dieser Arbeit verwendete Koordinatensystem und die Benennung der Achsen. Die positive X-Achse zeigt nach vorne, die positive Y-Achse nach rechts und die positive Z-Achse nach oben. Auf dem rechten Bild ist die Tilt Map in ihrer Ausgangslage als Choroplethenkarte zu sehen. Dabei werden die Vektoren der Tilt Map entsprechend dem Koordinatensystem dargestellt. Die Begriffe X-Vektor, Y-Vektor und Z-Vektor bezeichnen die lokalen Richtungsvektoren eines Objekts entlang der jeweiligen positiven Achse.

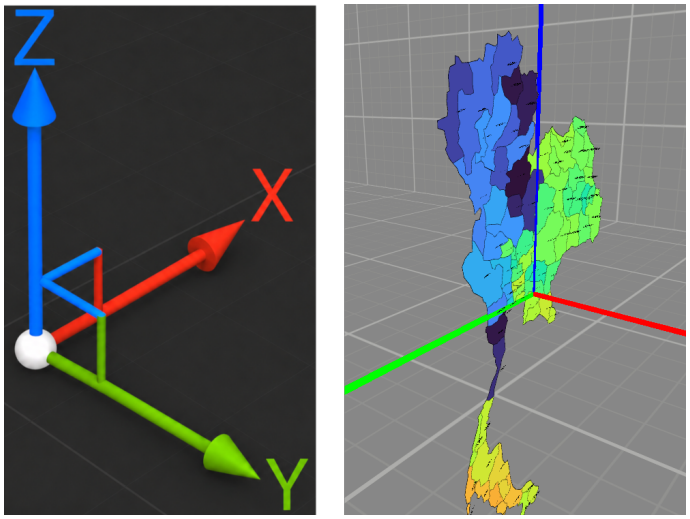


Abbildung 3.1 Verwendetes Koordinatensystem und Vektoren der Tilt Map.

Die erweiterte Tilt Map berechnet den Neigungswinkel als Winkel zwischen dem X-Vektor der Tilt Map und der Ebene des Bodens. Da der Winkelbereich des Balkendiagramms gering ist, kann es in zwei Fällen zu einer unerwünschten Transformation in Richtung der Prism Map kommen. Dies geschieht, wenn die Tilt Map im Balkendiagramm zu weit von der nutzenden Person weg oder zu weit nach rechts bzw. links geneigt wird.

Um diese Transformation zu verhindern, werden zwei Bedingungen geprüft. Zuerst wird der Vektor von der Position der nutzenden Person zur Position der Tilt Map bestimmt. Bei der Berechnung werden beide Positionen auf dieselbe Höhe gesetzt. Anhand der Normalebene zu diesem Vektor und des Z-Vektors der Tilt Map wird geprüft, ob die Tilt Map von der nutzenden Person weg geneigt ist. Außerdem wird geprüft, ob die Neigung nach links bzw.

rechts mehr als 11° beträgt. Wenn sich die Tilt Map im Balkendiagramm befindet und eine der beiden Bedingungen erfüllt ist, bleibt sie in dieser Ansicht, selbst wenn der Winkelbereich überschritten wird.

Ein Problem ist, dass der Neigungswinkel bestimmt wird, sobald die Tilt Map gegriffen wird. Wenn die Tilt Map stark geneigt ist, kann sich die nutzende Person beispielsweise auf die gegenüberliegende Seite bewegen und sie dort greifen. Beim Greifen kann es passieren, dass sich die Ansicht sprunghaft verändert. Abbildung 3.2 veranschaulicht dieses Verhalten. Die schwarzen Objekte stellen den Kopf und die Hände der nutzenden Person dar. Im oberen Bild befindet sich die Person auf der rechten Seite, während die Tilt Map im Balkendiagramm ist. Im unteren Bild hat sich die Person auf die linke Seite bewegt und die Tilt Map gegriffen. Dadurch ist die Tilt Map ohne Übergang in die Prism Map gewechselt. Dieser sprunghafte Wechsel könnte für die nutzende Person schwer nachvollziehbar sein.

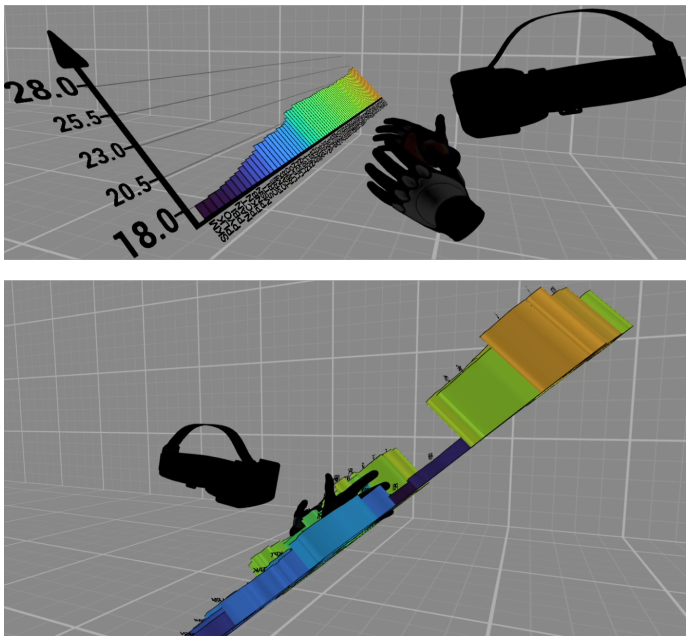


Abbildung 3.2 Sprunghafter Wechsel der Ansicht beim Greifen der Tilt Map.

Um dieses Problem zu minimieren, animierte ich einzelne Übergänge zwischen den Ansichten. Tritt die in Abbildung 3.2 gezeigte Situation ein, werden die Animationen aller Übergänge nacheinander abgespielt, bis sich die Tilt Map in der korrekten Ansicht befindet. Dadurch kann die nutzende Person visuell nachvollziehen, wie sich die Ansicht der Tilt Map verändert. Dies ist in Videoform im digitalen Anhang zu sehen (DA1). Ein weiterer Vorteil der animierten Übergänge ist, dass sie keinen eigenen Winkelbereich benötigen. Die dadurch frei werdenden Winkelbereiche können auf die Winkelbereiche der anderen Ansichten übertragen werden. Beispielsweise reichte der Winkelbereich der Prism Map

von 45° bis 75°, der Übergang von der Prism Map zum Balkendiagramm reichte von 75° bis 90° und das Balkendiagramm wurde ab 90° dargestellt. Durch die Animationen konnte ich den Winkelbereich der Prism Map auf 45° bis 79° vergrößern. Die Animation zum Balkendiagramm wird ab 79° abgespielt.

3.2 Visualisierung der erweiterten Tilt Map

Für diese Arbeit standen mir raum-zeitliche Geodaten zu verschiedenen Variablen für Thailand zur Verfügung. Deshalb stellt die erweiterte Tilt Map Thailand und seine Provinzen dar.

Die erweiterte Tilt Map hat die vier Ansichten Choroplethenkarte, Prism Map, Prism Map mit Balken und Balkendiagramm. Diese werden in Abbildung 3.3 dargestellt und sind als Video im digitalen Anhang zu sehen (DA2). Außerdem zeigt Abbildung 3.4 die Winkelbereiche der Ansichten und Übergänge. Der Übergang von der Choroplethenkarte zur Prism Map ist nicht animiert und besitzt daher einen eigenen Winkelbereich. Innerhalb dieses Winkelbereichs wächst bzw. schrumpft die Höhe der Provinzen linear mit dem Neigungswinkel. Diesen Übergang behielt ich bei, da mehrere Personen ihn als natürlich und angenehm empfanden. Alle anderen Übergänge haben keinen Winkelbereich, da sie animiert sind. Das bedeutet, dass der Übergang zu einer Ansicht animiert wird, sobald sich der Neigungswinkel im Winkelbereich dieser Ansicht befindet. Durch die animierten Übergänge haben die Ansichten größere Winkelbereiche.

Die nutzende Person kann die Tilt Map greifen, wodurch sie den Neigungswinkel und demzufolge die Ansicht verändern kann. In jeder Ansicht außer dem Balkendiagramm wird über jeder Provinz ihr Name als dreistellige Abkürzung dargestellt. Die Namen richten sich automatisch zur nutzenden Person aus. Im Balkendiagramm befinden sich die Namen unter den Balken und sind wie diese ausgerichtet.

Die visuellen Darstellungen der Choroplethenkarte und der Prism Map sind ähnlich zu denen der ursprünglichen Tilt Map. Die Ansicht der Prism Map mit Balken ist in der ursprünglichen Tilt Map nicht vorhanden. Diese fügte ich als eigenständige Ansicht hinzu, da mehrere Personen sie als nützlich empfanden. In dieser Ansicht werden die Provinzen als Balken an ihrer geografischen Position dargestellt. Da die Balken dieselbe Breite und Tiefe haben, entstehen weniger Verdeckungen. Dadurch lassen sich die Balken besser vergleichen. Das Balkendiagramm besitzt eine horizontale und eine vertikale Achse. An der vertikalen Achse sind Werte angegeben, von denen horizontale Hilfslinien ausgehen. Diese erleichtern den Vergleich der Balkenhöhen.

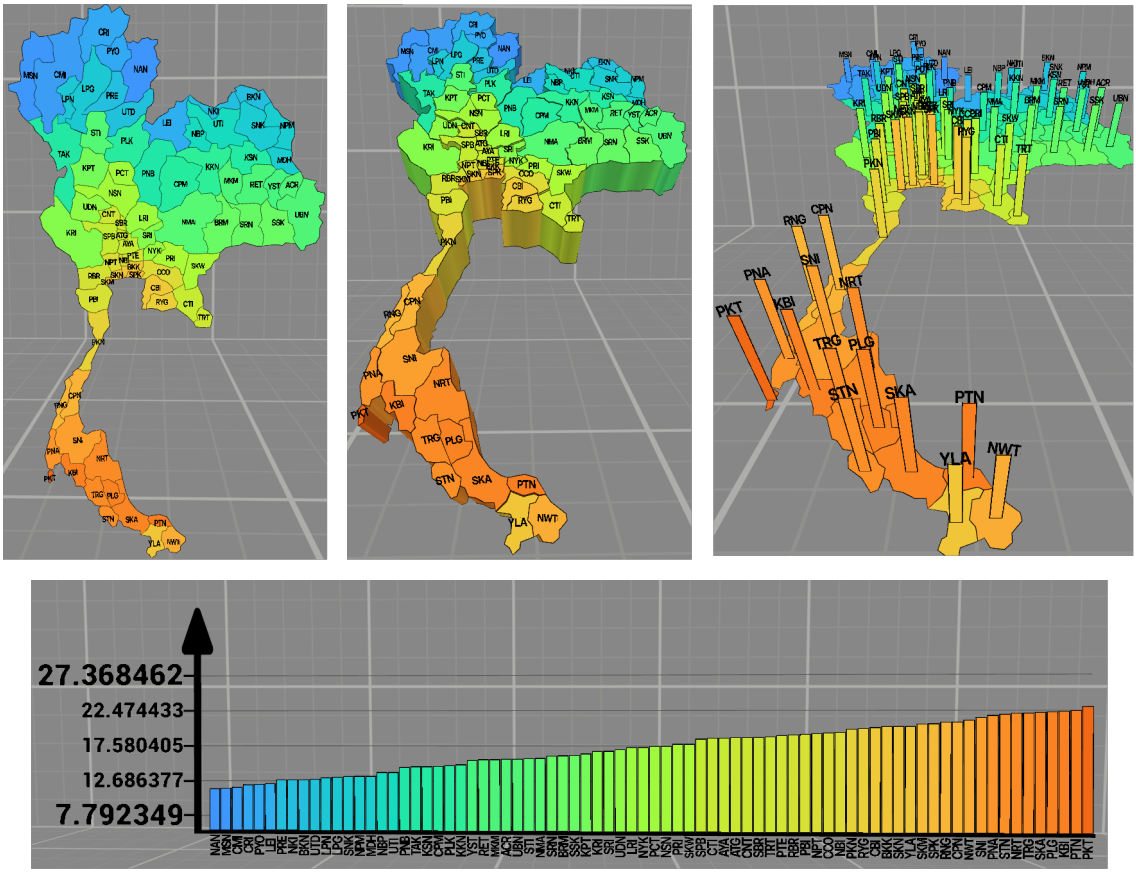


Abbildung 3.3 Ansichten der erweiterten Tilt Map. Die obere Reihe zeigt von links nach rechts die Choroplethenkarte, die Prism Map und die Prism Map mit Balken. Unten ist das Balkendiagramm dargestellt.

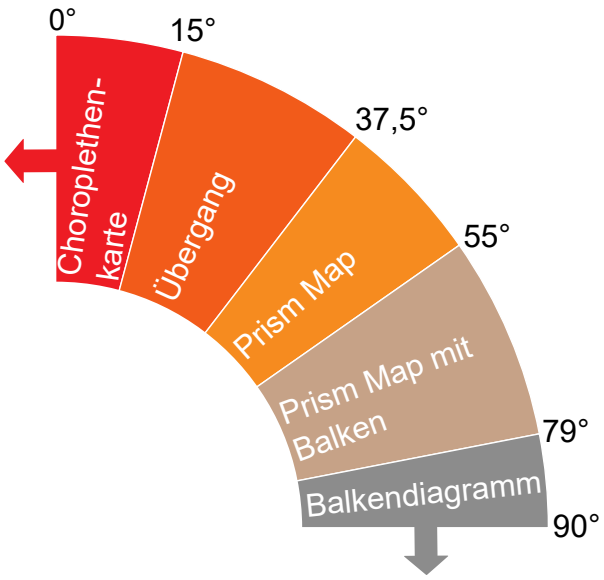


Abbildung 3.4 Winkelbereiche der erweiterten Tilt Map.

3.3 Einzelne Tilt Map und Tilt Map Gruppe

Die erweiterte Tilt Map kann beliebige Variablen einlesen und verwenden. Aktuell liegen Daten zu folgenden Variablen vor: Minimaltemperatur, Maximaltemperatur, Durchschnittstemperatur, Niederschlag, spezifische Luftfeuchtigkeit, relative Luftfeuchtigkeit, Bevölkerungszahl, Taupunkt, Sättigungsdefizit, Ost-West-Windkomponente in 10 Metern Höhe, Nord-Süd-Windkomponente in 10 Metern Höhe, Windgeschwindigkeit und Fallzahlen des Dengue-Fiebers.

Die erweiterte Tilt Map kann mehrere Variablen gleichzeitig darstellen. Dies kann mithilfe einer einzelnen Tilt Map oder einer Tilt Map Gruppe erreicht werden.

3.3.1 Einzelne Tilt Map

Die einzelne Tilt Map stellt jeweils eine Variable über die Farbe und eine Variable über die Höhe dar. Dadurch lassen sich zwei Variablen gleichzeitig untersuchen. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit, dieselbe Variable über die Farbe und die Höhe darzustellen. Der über die Farbe dargestellte Wert kann mithilfe der eingeblendeten Farblegende interpretiert werden. Diese ist in Abbildung 3.5 zu sehen. Der über die Höhe dargestellte Wert kann im Balkendiagramm abgelesen werden. Darüber hinaus können mit dem Laser die genauen Werte angezeigt werden. Der Laser wird in Kapitel 3.4.3 thematisiert.

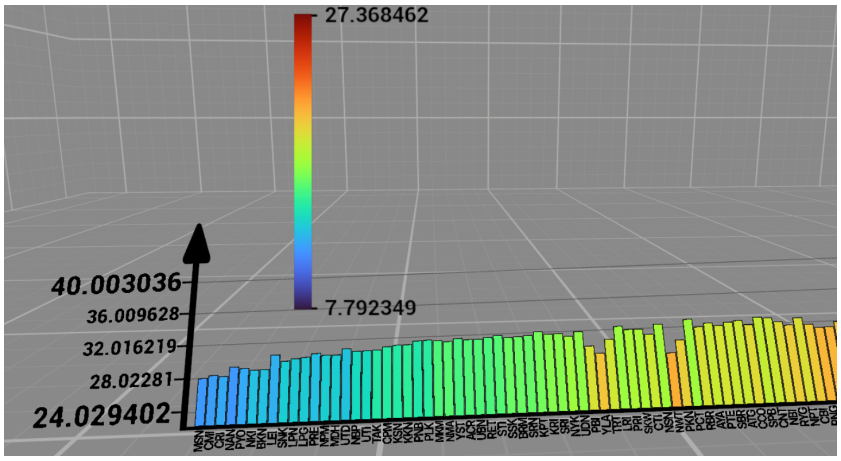


Abbildung 3.5 Balkendiagramm mit der Farblegende.

3.3.2 Tilt Map Gruppe

Eine leere Tilt Map Gruppe wird als grauer Balken dargestellt. Der Gruppe können beliebig viele einzelne Tilt Maps hinzugefügt werden. Diese werden nebeneinander auf dem Balken angeordnet. Das bedeutet, dass beim Greifen der Gruppe gleichzeitig alle darin enthaltenen Tilt Maps gegriffen werden. Da die Tilt Maps der Gruppe nebeneinander auf der gleichen Höhe angeordnet sind, lassen sie sich miteinander vergleichen. Abbildung 3.6 zeigt eine Tilt Map Gruppe in der Prism Map. Außerdem ist im digitalen Anhang ein Video (DA3) von den Ansichten der Tilt Map Gruppe zu sehen.

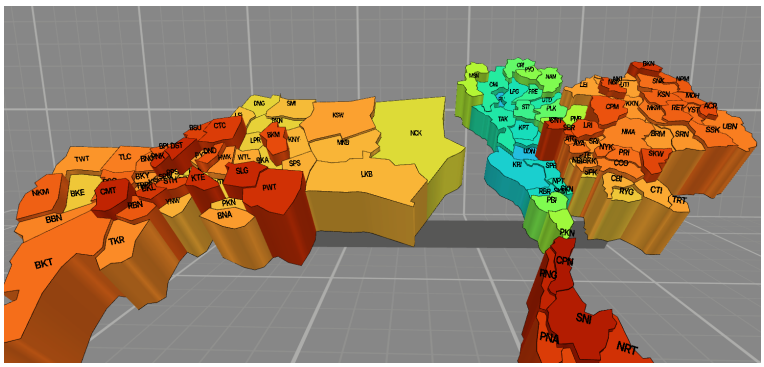


Abbildung 3.6 Tilt Map Gruppe in der Prism Map.

Tilt Maps können einer Gruppe hinzugefügt werden, wenn deren Datensätze denselben Zeitraum und dieselbe zeitliche Auflösung haben. Somit können Tilt Maps gleicher oder unterschiedlicher Gebiete in einer Gruppe sein. Beispielsweise kann eine Gruppe aus zwei Tilt Maps von Thailand und einer Tilt Map von Bangkok bestehen. Da die Tilt Maps einer Gruppe unterschiedliche Datensätze und somit auch unterschiedliche Minimal- und Maximalwerte haben können, werden ihre Werte linear auf den Bereich von 0 bis 100 skaliert. Dadurch lassen sich die Werte besser miteinander vergleichen.

Um die Balken der einzelnen Tilt Maps im Balkendiagramm unterscheiden zu können, implementierte ich zwei Varianten des Balkendiagramms. Bei der ersten Variante bilden die Balken aller Tilt Maps ein gemeinsames Balkendiagramm. Damit die Zuordnung der Balken zu ihren Tilt Maps nachvollzogen werden kann, werden die Balken unterschiedlicher Tilt Maps mit unterschiedlichen Farben umrandet. Die zweite Variante erzeugt pro Tilt Map ein Balkendiagramm. Diese sind übereinander angeordnet. Wenn mehrere Tilt Maps des gleichen Gebiets in einer Gruppe sind, werden die Balken dieser Tilt Maps in der gleichen Reihenfolge sortiert. Das bedeutet, wenn beispielsweise zwei Tilt Maps von Thailand in einer Gruppe sind, befindet sich der Balken von Bangkok in beiden Balkendiagrammen an der gleichen Position. Die Reihenfolge orientiert sich dabei an der zuerst hinzugefügten Tilt Map

der Gruppe. Dies wird in Abbildung 3.7 dargestellt. Am Ende verwendete ich die zweite Variante, da die Zuordnung der Balken eindeutiger ist.

Mithilfe einzelner Tilt Maps und Tilt Map Gruppen können mehrere Variablen gleichzeitig betrachtet werden. Dadurch können mögliche Zusammenhänge zwischen den Variablen entdeckt werden.

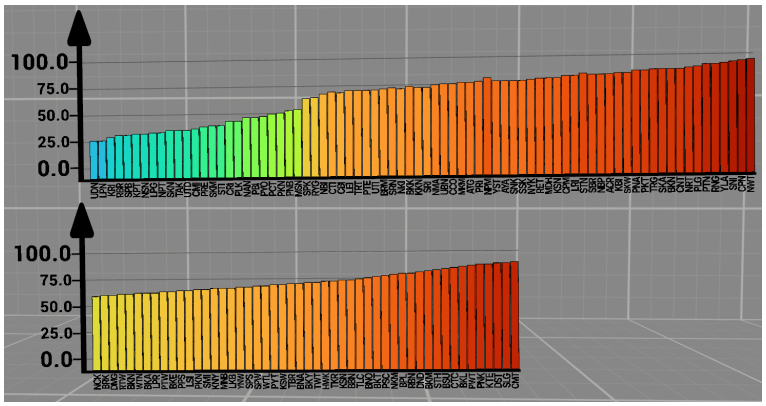


Abbildung 3.7 Tilt Map Gruppe im Balkendiagramm.

3.4 Interaktionsmöglichkeiten und Werkzeuge

Die virtuelle Umgebung besteht aus einem simpel gestalteten Raum. Dadurch werden Ablenkungen reduziert und Texte wie die Namen der Provinzen oder die Werte im Balkendiagramm lassen sich besser ablesen. Die Hände der nutzenden Person werden durch zwei virtuelle Hände repräsentiert. Dies wird mithilfe von zwei VR-Controllern umgesetzt, deren Bewegungen in die virtuelle Umgebung übertragen werden. Sobald die Person eine Tilt Map greift, wird diese an die entsprechende Hand gekoppelt. Das bedeutet, dass die Position und Rotation der Tilt Map relativ zu denen der Hand sind.

Da das HMD die Position und die Kopfbewegungen der nutzenden Person erfasst und in die virtuelle Umgebung überträgt, kann sie sich durch Gehen fortbewegen und durch Kopfbewegungen umsehen. Darüber hinaus kann sie sich in der virtuellen Umgebung teleportieren. Dazu wählt sie einen Zielpunkt auf dem Boden aus und wird anschließend direkt an diese Position gebracht. Zusätzlich kann sie sich mithilfe des Controllers drehen. Abbildung 3.8 zeigt die Auswahl eines Zielpunktes für die Teleportation und im digitalen Anhang ist ein Video (DA4), das die Fortbewegung demonstriert.

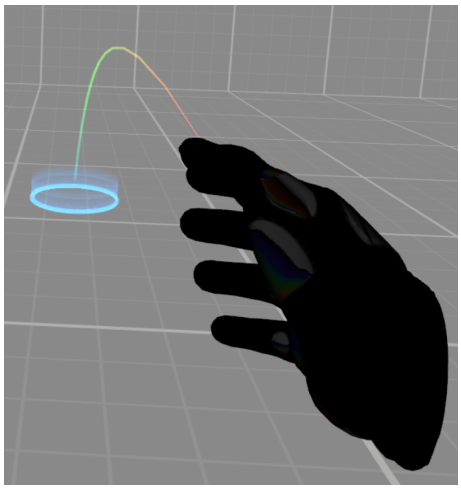


Abbildung 3.8 Auswahl eines Zielpunktes für die Teleportation.

3.4.1 Arbeitsmodus und Bearbeitungsmodus

Innerhalb der Anwendung gibt es den Arbeitsmodus und den Bearbeitungsmodus. Die nutzende Person kann per Knopfdruck zwischen den Modi wechseln. Sobald sich die Person im Bearbeitungsmodus befindet, wird oben links der Text „Edit Mode“ eingeblendet.

Der Arbeitsmodus ist der Hauptmodus, in dem die nutzende Person Tilt Maps und Gruppen untersucht. Im Bearbeitungsmodus können Tilt Maps und Gruppen erstellt und gelöscht werden. Außerdem können Tilt Maps zu Gruppen hinzugefügt werden. Das Erstellen von Tilt Maps und Gruppen erfolgt über die Benutzeroberfläche, die sich in der virtuellen Umgebung befindet. Diese beschreibe ich in Kapitel 3.4.5.

Löschen von Tilt Maps und Tilt Map Gruppen

Im Bearbeitungsmodus befindet sich ein Mülleimer in der virtuellen Umgebung. Um eine Tilt Map oder eine Gruppe zu löschen, muss das Objekt über den Mülleimer gehalten werden, woraufhin der Mülleimer rot wird. Außerdem wird eine Meldung eingeblendet, die darauf hinweist, dass das Objekt beim Loslassen gelöscht wird. Sobald die nutzende Person das Objekt loslässt, wird es gelöscht. Anschließend wird eine Meldung eingeblendet, die bestätigt, dass der Vorgang erfolgreich war. Dies wird in Abbildung 3.9 veranschaulicht. Das erste Bild zeigt den Mülleimer, das zweite eine Tilt Map über dem Mülleimer und das dritte den Mülleimer, nachdem die Tilt Map erfolgreich gelöscht wurde. Zusätzlich wird dieser Vorgang als Video im digitalen Anhang gezeigt (DA5).

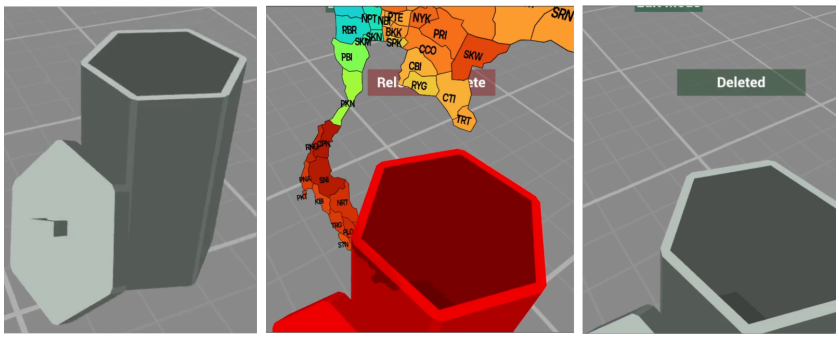


Abbildung 3.9 Löschvorgang einer Tilt Map. Das 3D-Modell des Mülleimers, das ich für diese Arbeit anpasste, stammt von Sketchfab (NTSC, 2018).

Hinzufügen von Tilt Maps zu Tilt Map Gruppen

Eine Tilt Map kann im Bearbeitungsmodus einer Gruppe hinzugefügt werden, indem sie in die Nähe der Gruppe gebracht wird. Wenn die Tilt Map gegriffen wird, erscheint eine Linie aus grünen Kugeln, die von der Tilt Map zur nächsten gültigen Gruppe führt. Diese Linie signalisiert der nutzenden Person, dass die gegriffene Tilt Map dieser Gruppe hinzugefügt werden kann. Eine Tilt Map ist für eine Gruppe gültig, wenn sie denselben Zeitraum und dieselbe zeitliche Auflösung hat wie die bereits enthaltenen Tilt Maps der Gruppe. Sobald die Tilt Map losgelassen wird, ist sie Teil der Gruppe. Abbildung 3.10 veranschaulicht den Prozess des Hinzufügens einer Tilt Map zu einer leeren Gruppe.

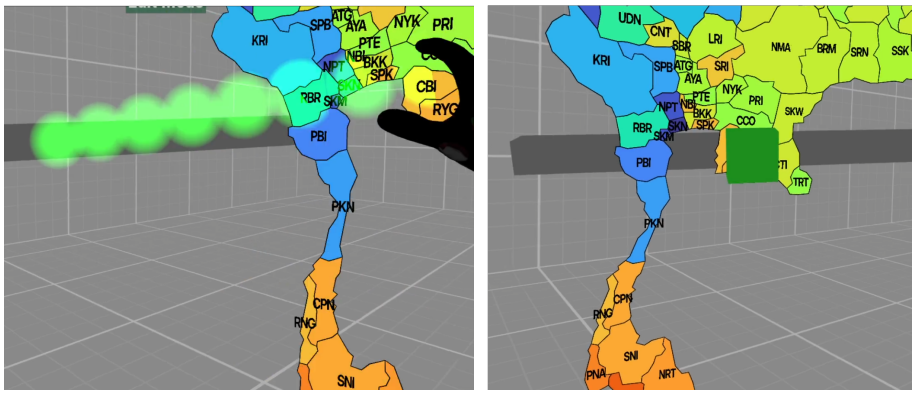


Abbildung 3.10 Tilt Map einer Gruppe hinzufügen.

Im Bearbeitungsmodus wird für jede Tilt Map einer Gruppe ein grüner Würfel in der Mitte der jeweiligen Tilt Map eingeblendet. Der Würfel zeigt, an welcher Stelle die nutzende Person greifen muss, um die Tilt Map von der Gruppe zu lösen. Nachdem die Tilt Map an der Position des grünen Würfels gegriffen wurde, muss sie aus der Nähe der Gruppe bewegt werden, bis die grüne Linie verschwindet. Danach ist die Tilt Map nicht mehr Teil

der Gruppe. Das Hinzufügen einer Tilt Map zu einer Gruppe und das Entfernen daraus sind im digitalen Anhang in Videoform zu sehen (DA6).

3.4.2 Zeitregler

Der Zeitregler ist ein 3D-Schieberegler, mit dem sich der aktuelle Zeitpunkt der Daten verändern lässt. Dieser verändert den Zeitpunkt der zuletzt gegriffenen Tilt Map oder Gruppe. Das obere Bild in Abbildung 3.11 zeigt den Zeitregler. In diesem Beispiel hat der Datensatz der Tilt Map Gruppe eine monatliche Auflösung und umfasst den Zeitraum von Januar 1960 bis Dezember 1970. Dies ergibt insgesamt 132 Zeitpunkte $((1970-1960+1)\cdot 12)$. Dem Zeitregler wird eine von der nutzenden Person festgelegte Anzahl an Zeitpunkten zugeordnet. In diesem Fall sind es 12 Zeitpunkte. Links wird der Startzeitpunkt (1.1960) angezeigt und rechts der Endzeitpunkt (12.1960). Der grüne Würfel ist der Griff (Handle) des Zeitreglers. Dieser kann verschoben werden, um den aktuellen Zeitpunkt der Daten zu verändern. Der aktuelle Zeitpunkt wird unter dem Griff eingeblendet. Rechts neben dem Zeitregler befindet sich ein virtueller Knopf mit der Beschriftung „+“. Wenn die nutzende Person diesen mit der Hand berührt, mit der sie den Zeitregler nicht bedient, verschiebt sich der Zeitraum des Zeitreglers in die Zukunft. Dementsprechend reicht der Zeitraum nach einer Berührung von Januar 1961 bis Dezember 1961. Dies ist auf dem unteren Bild in Abbildung 3.11 zu sehen. Links neben dem Zeitregler befindet sich ein Knopf mit der Beschriftung „–“. Wird dieser berührt, verschiebt sich der Zeitraum in die Vergangenheit. Mithilfe der beiden Knöpfe kann die Person durch den gesamten Zeitraum des Datensatzes navigieren.

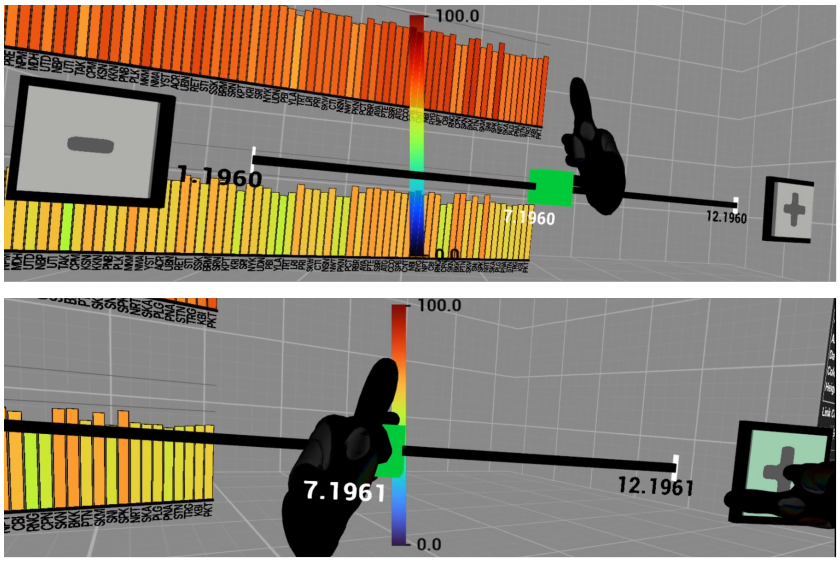


Abbildung 3.11 Interaktion mit dem Zeitregler.

Der Zeitregler wird sichtbar, sobald die nutzende Person die entsprechende Taste auf dem Controller gedrückt hält. Dabei wird dieser automatisch positioniert, sodass der Griff in der Hand der Person erscheint. Wird die Taste losgelassen, wird der Zeitregler ausgeblendet. Für die Ausrichtung des Zeitreglers testete ich verschiedene Varianten. Am Ende wählte ich eine Variante, bei der sich die Ausrichtung nach der Blickrichtung richtet. Die Interaktion mit dem Zeitregler ist im digitalen Anhang als Video (DA7) zu sehen.

3.4.3 Laser

Mit dem Laser kann auf eine Provinz gezeigt werden. Diese wird dadurch markiert und visuell hervorgehoben. Zusätzlich werden der Name der Provinz, die Variablen und ihre genauen Werte eingeblendet. Dadurch kann die nutzende Person die Werte einer Provinz überprüfen, wenn sie sich bei der Interpretation der Farbe oder der Höhe unsicher ist. Die Interaktion mit dem Laser ist in allen Ansichten möglich und wird in Abbildung 3.12 gezeigt. Außerdem ist sie im digitalen Anhang als Video (DA8) zu sehen.

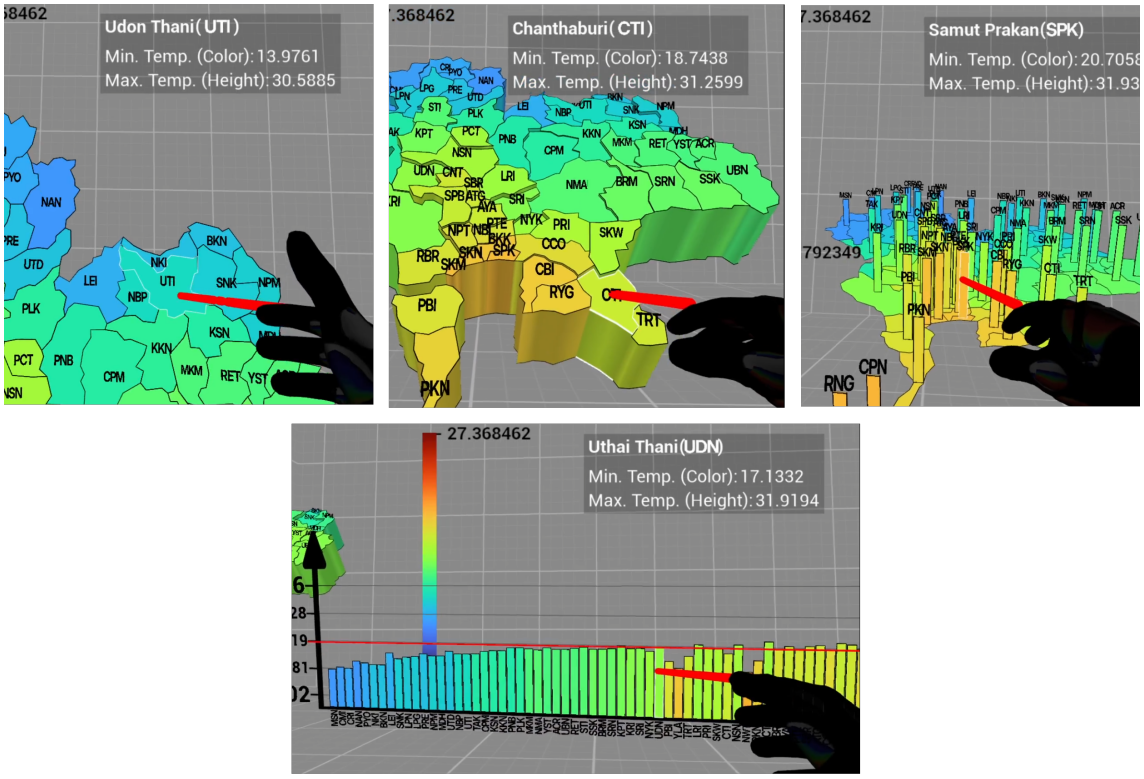


Abbildung 3.12 Interaktion mit dem Laser.

Darüber hinaus wird im Balkendiagramm eine rote Hilfslinie eingeblendet, sobald ein Balken markiert wird. Dies ist im unteren Bild der Abbildung 3.12 zu sehen. Die Hilfslinie befindet sich auf der Höhe des markierten Balkens und erleichtert den Vergleich der Balkenhöhen. Außerdem kann die Markierung eines Balkens festgesetzt werden. In diesem Fall verändert sie sich nicht mehr, wenn auf einen anderen Balken gezeigt wird. Nachdem die Markierung und die zugehörige Hilfslinie festgesetzt wurden, kann der Zeitpunkt mit dem Zeitregler verändert werden. Dadurch lassen sich Werte unterschiedlicher Zeitpunkte miteinander vergleichen.

Wenn in einer Tilt Map Gruppe ein Balken markiert wird, wird die Hilfslinie auf der gleichen Höhe in allen Balkendiagrammen eingeblendet. So lassen sich Balken aus unterschiedlichen Tilt Maps miteinander vergleichen. In Abbildung 3.13 ist diese Hilfslinie in einer Tilt Map Gruppe zu sehen.

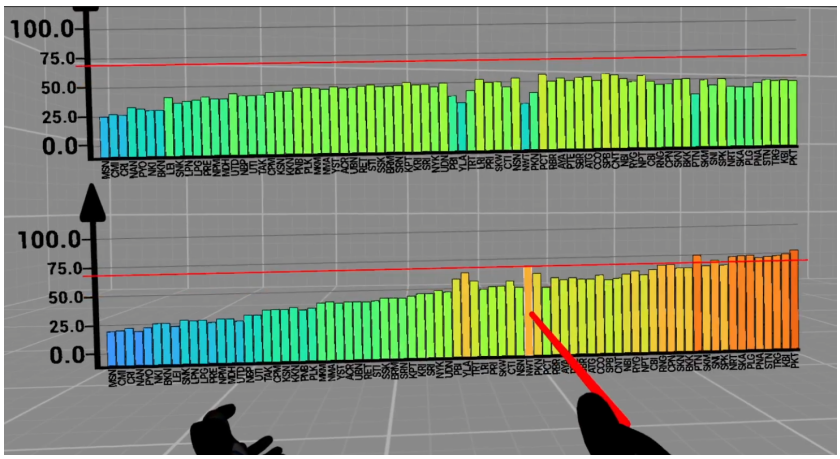


Abbildung 3.13 Hilfslinie bei einer Tilt Map Gruppe.

3.4.4 Drilldown

Die Daten einer Tilt Map können mithilfe einer Drilldown-Funktion tiefer untersucht werden. Angenommen, es wird mit einer Tilt Map von Thailand gearbeitet. Dann kann mithilfe des Lasers eine Provinz markiert werden. Wenn die Taste für den Drilldown gedrückt wird, verschwindet diese Provinz aus der Tilt Map und landet in der Hand der nutzenden Person. Daraufhin hat die Person die Möglichkeit, den Vorgang abzubrechen oder eine weitere Tilt Map der ausgewählten Provinz mit ihren Distrikten zu erzeugen. Sobald die Tilt Map erzeugt oder der Vorgang abgebrochen wurde, kehrt die Provinz an ihre ursprüngliche Position in der Tilt Map von Thailand zurück.

Abbildung 3.14 demonstriert diesen Prozess. Auf dem Bild oben links ist die Markierung von Rayong (RYG) mithilfe des Lasers zu sehen. Das Bild oben rechts zeigt Rayong in der virtuellen Hand, nachdem der Drilldown aktiviert wurde. Auf dem unteren Bild wird die erzeugte Tilt Map von Rayong mit ihren Distrikten gezeigt. Zusätzlich ist im digitalen Anhang ein Video (DA9) von der Drilldown-Funktion zu sehen.

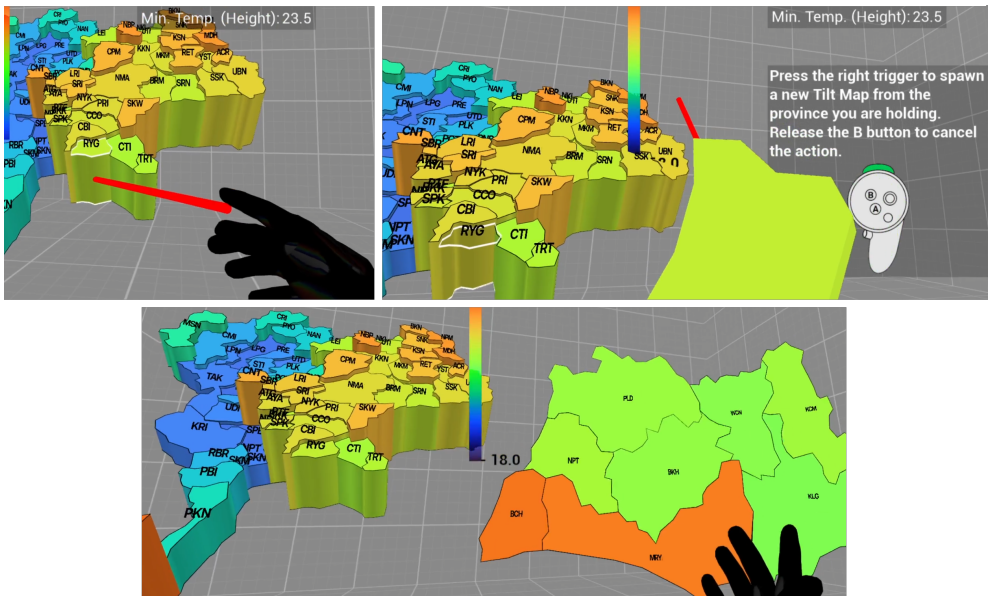


Abbildung 3.14 Drilldown-Funktion.

3.4.5 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche ist als Objekt in der virtuellen Umgebung platziert. Sie kann per Knopfdruck zur nutzenden Person und anschließend wieder an ihre ursprüngliche Position gebracht werden. Bewegt sich die nutzende Person in die Nähe der Benutzeroberfläche, wird der Boden unter ihr grün. Damit wird signalisiert, dass die Benutzeroberfläche bedient werden kann. Dies ist in Abbildung 3.15 zu sehen. Die Interaktion mit der Benutzeroberfläche wird außerdem in einem Video (DA10) im digitalen Anhang gezeigt.

Die Benutzeroberfläche einer Tilt Map ist im linken Bild der Abbildung 3.16 zu sehen. Im rechten Bild ist die Benutzeroberfläche einer Tilt Map Gruppe. Sie zeigt die Daten der Tilt Map bzw. Gruppe an, die zuletzt gegriffen wurde. Mithilfe von Drop-down-Menüs lassen sich der Datensatz, die über die Farbe dargestellte Variable, die über die Höhe dargestellte Variable und der aktuelle Zeitpunkt auswählen. Die Werte einiger Variablen können zusätzlich gefiltert werden. Bei den Fallzahlen des Dengue-Fiebers kann beispielsweise über ein weiteres Drop-down-Menü zwischen weiblich, männlich und gesamt gewählt werden. Bei einer Tilt Map

Gruppe sind diese Drop-down-Menüs für jede in der Gruppe enthaltene Tilt Map vorhanden. Enthält eine Gruppe beispielsweise zwei Tilt Maps, sind die Drop-down-Menüs zweimal vorhanden. Die Option „Link Color & Height“ kann aktiviert werden, damit für die Farbe und die Höhe dieselbe Variable verwendet wird. Wird die Variable für die Farbe geändert, wird automatisch die Variable für die Höhe angepasst.

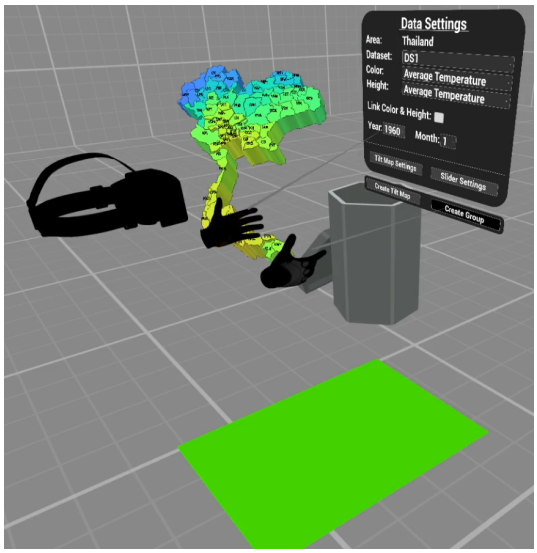


Abbildung 3.15 Bedienung der Benutzeroberfläche in der virtuellen Umgebung.



Abbildung 3.16 Benutzeroberfläche einer Tilt Map und einer Tilt Map Gruppe.

Wenn sich die nutzende Person im „Edit Mode“ befindet, wird unten eine weitere Leiste mit den Schaltflächen „Create Tilt Map“ und „Create Group“ eingeblendet. Durch die Auswahl von „Create Group“ wird eine leere Tilt Map Gruppe in der virtuellen Umgebung erzeugt. Über die Schaltflächen „Create Tilt Map“, „Tilt Map Settings“, „Group Settings“ und „Slider Settings“ gelangt die nutzende Person in die jeweiligen Untermenüs.

Create Tilt Map

Mithilfe des Menüs „Create Tilt Map“ lässt sich eine Tilt Map erstellen. Dazu wird die gewünschte Tilt Map über Drop-down-Menüs konfiguriert. Dabei werden das Gebiet, wie z. B. Thailand oder Bangkok, sowie der Datensatz ausgewählt. Über die Schaltfläche „Create“ wird die Tilt Map erzeugt. Abbildung 3.17 zeigt dieses Menü.



Abbildung 3.17 Benutzeroberfläche zum Erstellen einer Tilt Map.

Tilt Map Settings und Group Settings

Im Menü „Tilt Map Settings“ lassen sich die Eigenschaften der Tilt Map anpassen. Dazu zählen die Reihenfolge der Balken im Balkendiagramm, die Farblegende, die Größe und Höhe der Tilt Map, die Breite der Balken und der Abstand zwischen den Balken. Über „Group Settings“ lassen sich dieselben Einstellungen für die gesamte Tilt Map Gruppe vornehmen. Zusätzlich lässt sich jede enthaltene Tilt Map einzeln skalieren und um die Z-Achse rotieren. Abbildung 3.18 zeigt links „Tilt Map Settings“ und rechts „Group Settings“.

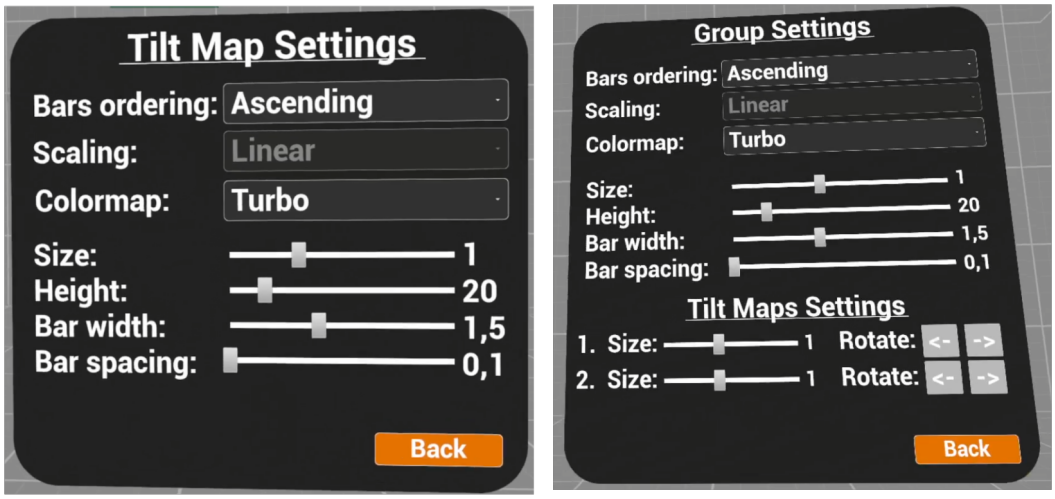


Abbildung 3.18 Benutzeroberfläche für die Einstellungen der Tilt Map und der Tilt Map Gruppe.

Slider Settings

Über das Menü „Slider Settings“ lässt sich einstellen, wie viele Zeitpunkte dem Zeitregler zugeordnet werden sollen. Dazu kann die nutzende Person ein Untermenü öffnen und die gewünschte Anzahl eingeben. „Slider Settings“ und das Untermenü sind in Abbildung 3.19 zu sehen.

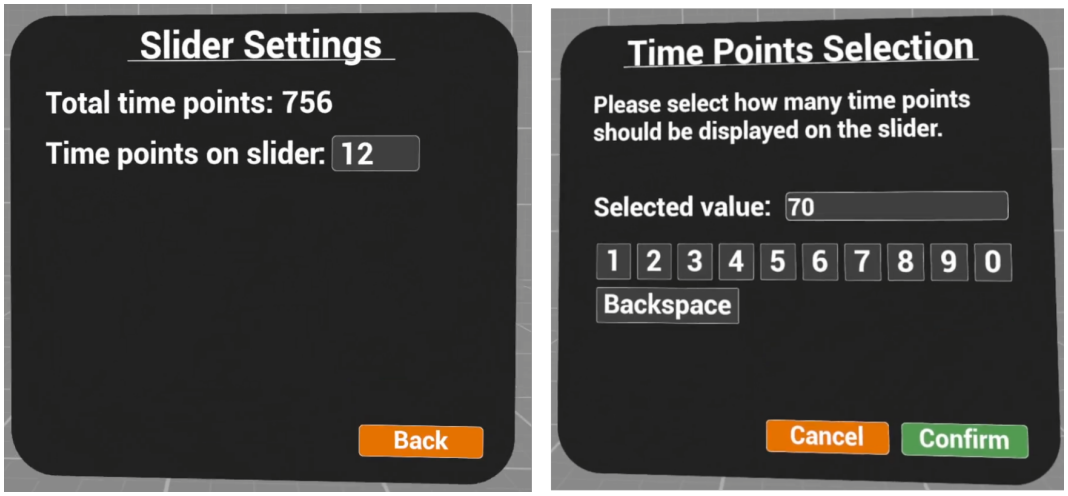


Abbildung 3.19 Benutzeroberfläche für die Einstellungen des Zeitreglers.

3.5 Technische Umsetzung

Die erweiterte Tilt Map implementierte ich in der Unreal Engine 5.4.4[1]. Als Hardware nutzte ich die Meta Quest 3[2]. Wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben, eignen sich VR-Controller für Distanzaktionen besser als eine freie Handsteuerung. Deshalb werden zur Interaktion mit der virtuellen Umgebung die Controller der Meta Quest 3 verwendet. Als Grundlage für die Anwendung verwendete ich das VR-Template[3] der Unreal Engine. Dadurch musste ich Funktionen wie das Greifen, Teleportieren und Drehen in der virtuellen Umgebung nicht von Grund auf neu implementieren.

Abbildung 3.20 zeigt ein vereinfachtes Komponentendiagramm der zentralen Bestandteile der Anwendung und ihrer Beziehungen. Dadurch soll ein Überblick über den Aufbau geschaffen werden.

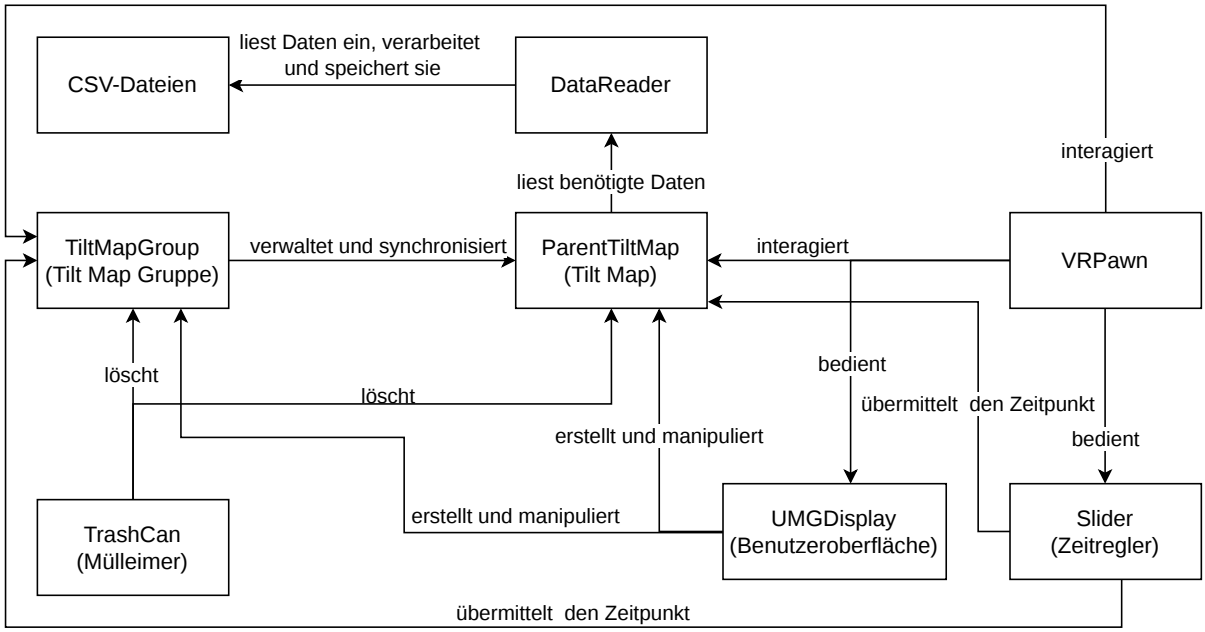


Abbildung 3.20 Vereinfachtes Komponentendiagramm der zentralen Bestandteile und ihrer Beziehungen.

Die Datensätze müssen als CSV-Dateien vorliegen. Diese werden durch den *DataReader* eingelesen, verarbeitet und in einem geeigneten Format gespeichert. *ParentTiltMap* dient als Basisklasse und stellt die Logik für die Tilt Map zur Verfügung. Sie liest die benötigten Daten aus dem *DataReader*. Die Klassen der einzelnen Tilt Maps, beispielsweise für Thailand

[1] Unreal Engine 5.4.4: www.unrealengine.com
[2] Meta Quest 3: https://www.meta.com/de/quest/quest-3
[3] VR-Template: https://dev.epicgames.com/documentation/unreal-engine/vr-template-in-unreal-engine

oder Bangkok, erben von *ParentTiltMap* und fügen die 3D-Modelle der entsprechenden Gebiete hinzu. *TiltMapGroup* kann beliebig viele Tilt Maps verwalten und synchronisieren, damit diese als Gruppe agieren. *TrashCan* ist der Mülleimer und löscht Tilt Maps und Tilt Map Gruppen. *UMGDisplay* ist die Benutzeroberfläche. Sie manipuliert Tilt Maps und Tilt Map Gruppen, indem sie beispielsweise deren Datensätze, Variablen oder Eigenschaften verändert. Zusätzlich werden über die Benutzeroberfläche Tilt Maps und Tilt Map Gruppen erstellt. *Slider* ist der Zeitregler und übergibt den aktualisierten Zeitpunkt an die Tilt Map oder die Tilt Map Gruppe. *VRPawn* ist die Repräsentation der nutzenden Person in der virtuellen Umgebung. Diese Komponente enthält unter anderem die Kamera sowie die Logik für den Laser und den Drilldown. Außerdem verarbeitet sie die Controller-Eingaben, bedient die Benutzeroberfläche und den Zeitregler. Sie interagiert mit den Tilt Maps und Tilt Map Gruppen, indem sie diese greift und deren Position und Rotation verändert.

3.5.1 Optimierung

Aufgrund der gleichzeitigen Skalierung und Positionierung der Provinzen sowie der Änderung ihrer Materialien ist der Prozessor der Flaschenhals (Bottleneck) der Anwendung. Damit die Anwendung auf schwächerer Hardware mit einer hohen Bildrate läuft, nahm ich einige Optimierungen vor.

Mithilfe von Instanced Meshes kann dasselbe 3D-Modell beliebig oft dargestellt werden, ohne jede Kopie als eigenes Objekt zu behandeln (Epic Games, 2026). Dadurch wird der Prozessor entlastet, weil weniger Draw Calls an die Grafikkarte geschickt werden müssen. Da die Balken der Provinzen aus skalierten Würfeln bestehen, implementierte ich sie als Instanced Meshes. Des Weiteren nutzte ich Instanced Meshes zur Darstellung der abgekürzten Namen der Provinzen und Distrikte. Dazu erstellte ich für jeden der insgesamt 1055 Namen eine Textur mit einem transparenten Hintergrund in GIMP[4]. Die Texturen verwendete ich in einem Material als 2D Texture Array. Dadurch lassen sich alle Namen mit demselben 3D-Modell und demselben Material als Instanced Meshes umsetzen. Welche Textur aus dem 2D Texture Array dargestellt wird, lässt sich für jede Instanz zur Laufzeit anpassen.

Die Geodaten von Thailand stammen von geoBoundaries[5]. Die Polygone reduzierte ich mithilfe von Mapshaper[6]. Anschließend exportierte ich die Daten als SVG-Dateien, wandelte sie in Blender[7] in 3D-Modelle um und bearbeitete sie. Danach importierte ich die Modelle in die Unreal Engine. Auf diese Weise erstellte ich insgesamt 1055 3D-Modelle. Durch die

[4] GIMP 2.10.34: www.gimp.org
[5] geoBoundaries: https://www.geoboundaries.org
[6] Mapshaper: https://mapshaper.org
[7] Blender 4.0: https://www.blender.org

geringere geometrische Komplexität der Modelle wird der Rechenaufwand der Grafikkarte reduziert. Die Umrisse der Provinzen und Distrikte setzte ich mithilfe separater 3D-Modelle um. Auf einen Shader verzichtete ich, da die Umrisse aufgrund des Foveated Renderings verwaschen oder teilweise gar nicht angezeigt wurden.

Den Tonemapper und die Schatten deaktivierte ich, damit die Farben der Tilt Map nicht verfälscht dargestellt werden. Um der nutzenden Person trotzdem einen räumlichen Eindruck der Tilt Map zu vermitteln, färbte ich die seitlichen Flächen der Provinzen dunkler. Abbildung 3.21 zeigt im oberen Bild die Tilt Map ohne dunkler gefärbte Seiten und im unteren Bild mit dunkler gefärbten Seiten.

Um das Einlesen der CSV-Dateien zu beschleunigen, speichert die Anwendung die Daten nach dem ersten Einlesen im Binärformat. Dadurch beträgt die Ladezeit nur wenige Sekunden.

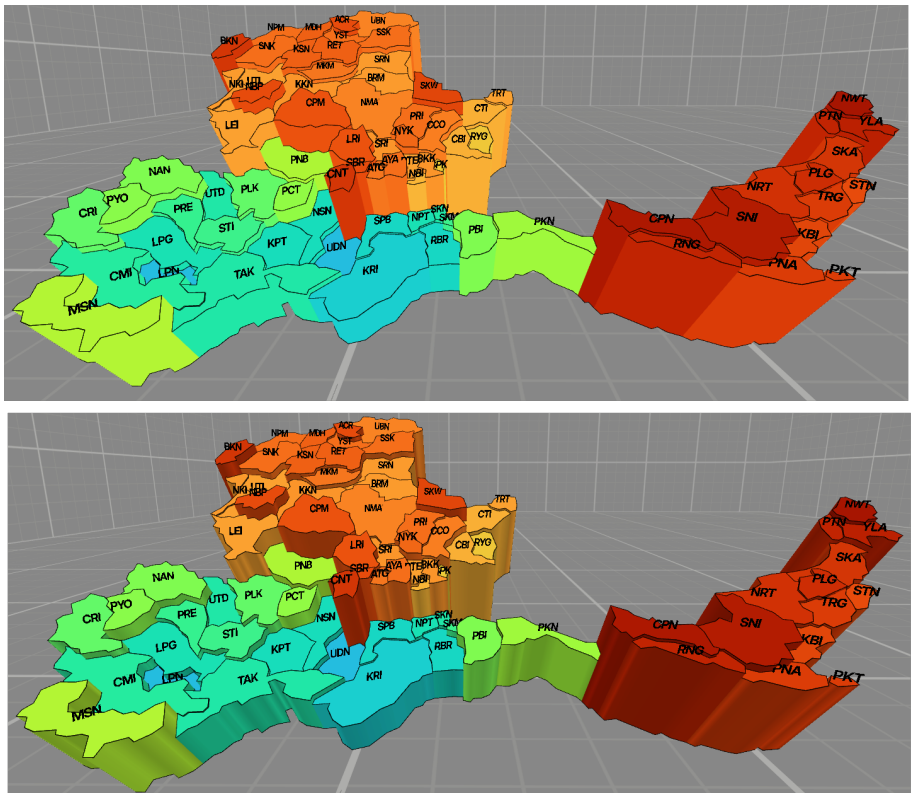


Abbildung 3.21 Vergleich der Tilt Map mit gleichfarbigen seitlichen Flächen (oben) und dunkler gefärbten seitlichen Flächen (unten).

Kapitel 4

Studie: Einzelne Tilt Map vs. Tilt Map Gruppe

Die erweiterte Tilt Map bietet zwei Varianten, um zwei Variablen gleichzeitig darzustellen. Bei einer einzelnen Tilt Map wird eine Variable durch die Farbe und die andere durch die Höhe dargestellt. Die zweite Variante verwendet eine Tilt Map Gruppe, die aus zwei Tilt Maps besteht. Innerhalb jeder Tilt Map stellen die Farbe und die Höhe dieselbe Variable dar. Somit zeigt jede Tilt Map eine andere Variable. Beide Varianten können Vor- und Nachteile haben. Um zu untersuchen, welche Variante sich für bestimmte Aufgaben besser eignet, führte ich eine vergleichende Nutzerstudie durch. In diesem Kapitel erläutere ich zunächst das Ziel und die Hypothesen der Studie. Danach beschreibe ich die Methodik und die Durchführung. Anschließend präsentiere ich die Ergebnisse.

4.1 Ziel und Hypothesen der Studie

Das Ziel der Studie ist es, die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe bei unterschiedlichen Aufgaben zu vergleichen. Dabei untersuche ich die Korrektheit, die Bearbeitungszeit, die subjektive Sicherheit, die wahrgenommene Arbeitsbelastung und die subjektive Bewertung. Zusätzlich messe ich die Nutzung der Ansichten und des Lasers. Zur Beantwortung der Forschungsfragen formulierte ich zwei Hypothesen.

H1: Bei Aufgaben zur Identifikation von Maximalwerten ist die Korrektheit mit der Tilt Map Gruppe höher und die Bearbeitungszeit kürzer als mit der einzelnen Tilt Map.

Dies ist dadurch begründet, dass Unterschiede anhand der Höhe genauer wahrgenommen werden können als anhand der Farbe (Cleveland und McGill, 1984). Zusätzlich sind die Variablen doppelt kodiert und durch zwei unterschiedliche Tilt Maps räumlich voneinander getrennt.

H2: Bei Zusammenhangsaufgaben ist die Korrektheit mit der einzelnen Tilt Map höher und die Bearbeitungszeit kürzer als mit der Tilt Map Gruppe.

Dies ist dadurch begründet, dass die Teilnehmenden die Farbe und die Höhe innerhalb derselben Tilt Map auf einen Blick wahrnehmen können. Bei der Tilt Map Gruppe müssen sie ihre Aufmerksamkeit zwischen zwei räumlich getrennten Tilt Maps wechseln, um die Variablen miteinander zu vergleichen und Zusammenhänge zu erkennen.

4.2 Methodik

Die beiden Bedingungen der Studie sind die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe. Da sich die Teilnehmenden in ihren Vorkenntnissen und im Umgang mit Tilt Maps unterscheiden können, führte ich die Studie im Within-Subjects-Design durch. Das bedeutet, dass die Teilnehmenden alle Aufgaben unter beiden Bedingungen bearbeiteten. So konnte ich die Ergebnisse der Bedingungen innerhalb derselben Person vergleichen. Die Reihenfolge der Bedingungen wechselte ich zwischen den Teilnehmenden ab. Weitere Details dazu werden in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Außerdem wurden nur die notwendigsten Funktionalitäten der erweiterten Tilt Map für die Studie verwendet. Diese werden in Kapitel 4.2.3 erläutert.

4.2.1 Aufgaben der Studie

Die Studie führte ich mit einer Tilt Map bzw. Tilt Map Gruppe von Thailand durch. Die Aufgaben sind in Tabelle 4.1 zu sehen und lassen sich in zwei Kategorien unterteilen. Zur ersten Kategorie gehören Aufgaben, bei denen der Maximalwert der Variablen ermittelt werden soll. Dazu zählen die Aufgaben 1 und 2. Zur zweiten Kategorie gehören Aufgaben, bei denen der Zusammenhang zwischen den Variablen beurteilt werden soll. Dazu zählen die Aufgaben 3 bis 5. Für diese Aufgaben stehen drei Antwortmöglichkeiten zur Auswahl. Antwort A beschreibt einen positiven Zusammenhang zwischen den Variablen, Antwort B einen negativen Zusammenhang und Antwort C keinen klaren Zusammenhang. Bei Aufgabe 3 ist Antwort A korrekt, bei Aufgabe 4 Antwort B und bei Aufgabe 5 Antwort C.

Zu jeder Aufgabe zeichnete ich die Bearbeitungszeit auf. Zusätzlich erfasste ich, wie lange sich die Teilnehmenden in den einzelnen Ansichten aufhielten und wie häufig sie zwischen den Ansichten wechselten. So lässt sich vergleichen, unter welcher Bedingung die Bearbeitungszeit kürzer war und welche Ansichten häufiger und länger genutzt wurden. Außerdem kann ermittelt werden, ob sich die Nutzung der Ansichten zwischen den beiden Bedingungen unterscheidet. Darüber hinaus zeichnete ich auf, wie häufig und wie lange die Teilnehmenden den Laser verwendeten. Für die Zusammenhangsaufgaben kann damit

untersucht werden, in welchem Umfang der Laser eingesetzt wurde. Außerdem ermittelte ich, welche Strecke die Teilnehmenden während der Aufgaben zurücklegten und um wie viele Grad sie ihren Kopf insgesamt rotierten. Dazu verwendete ich die Positions- und Rotationsdaten des HMDs. Zusätzlich speicherte ich die Positions- und Rotationsdaten der Teilnehmenden sowie der Tilt Map bzw. der Tilt Map Gruppe. Dadurch kann geprüft werden, ob die Teilnehmenden ihre Position veränderten, um die Visualisierung aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten oder ob sie stattdessen die Tilt Map bzw. die Tilt Map Gruppe bewegten und rotierten. Um die Korrektheit der Antworten zu überprüfen, protokollierte ich die Antworten der Teilnehmenden. Außerdem fragte ich nach jeder Aufgabe auf einer Likert-Skala von 0 bis 4, wie sicher sie sich bei ihrer Antwort waren. Dabei steht 0 für sehr unsicher und 4 für sehr sicher. Dadurch kann die subjektive Sicherheit zwischen den Bedingungen verglichen und geprüft werden, ob sie bei korrekten Antworten höher ist als bei falschen Antworten.

Tabelle 4.1 Aufgaben der Studie.

Nr.	**Aufgabe**
1	Finde jeweils den höchsten Wert der Temperatur und des Niederschlags. Gib jeweils die Provinz und den Wert an.
2	Nutze den Zeitregler. Finde im sichtbaren Zeitraum jeweils den höchsten Wert der Temperatur und des Niederschlags. Gib jeweils den Monat, die Provinz und den Wert an.
3–5	Nutze den Zeitregler und vergleiche die Temperatur und den Niederschlag über den sichtbaren Zeitraum. Wähle die Aussage aus, die am besten zu den sichtbaren Daten passt. A: Wenn die Temperatur steigt, steigt der Niederschlag meistens auch. Wenn die Temperatur sinkt, sinkt der Niederschlag meistens auch. B: Wenn die Temperatur steigt, sinkt der Niederschlag meistens. Wenn die Temperatur sinkt, steigt der Niederschlag meistens. C: Es ist kein klarer Zusammenhang erkennbar.

Vor der Studie führte ich zwei Probedurchläufe durch, die durchschnittlich 45 Minuten dauerten. Deshalb beschränkte ich die Studie auf fünf Aufgaben pro Bedingung. Eine längere Bearbeitungsdauer könnte Beschwerden wie Kopfschmerzen oder Müdigkeit verursachen und dadurch die Konzentration verringern. Dies könnte die Ergebnisse beeinflussen. In den Probedurchläufen bezeichnete ich die Variablen zunächst als Variable A und Variable B. Dadurch wollte ich verhindern, dass Annahmen oder Vorkenntnisse über einen möglichen Zusammenhang zwischen den Variablen die Ergebnisse beeinflussen. Für eine Person waren die Bezeichnungen Variable A und Variable B jedoch zu abstrakt, wodurch sie die Aufgaben

nicht richtig verstand. Deshalb nannte ich die Variablen in der Studie Temperatur und Niederschlag.

Datensätze

Für jede Aufgabe erstellte ich die beiden Datensätze A und B. Diese gestaltete ich so, dass sie eine vergleichbare Schwierigkeit haben. Alle Datensätze haben eine monatliche Auflösung und die Legenden sind von 0 bis 100 skaliert.

In den Datensätzen für Aufgabe 1 haben die Provinzen, die nicht den Maximalwert haben, Werte zwischen 20 und 78. In Datensatz A hat Phetchaburi die höchste Temperatur mit einem Wert von 87 und Phrae den höchsten Niederschlag mit einem Wert von 91. In Datensatz B hat Roi Et die höchste Temperatur mit einem Wert von 90 und Suphan Buri den höchsten Niederschlag mit einem Wert von 88. Die Werte wählte ich bewusst so, dass sie nicht zu nah an den Endpunkten 0 und 100 der Legende liegen. Bei den Provinzen mit den höchsten Werten achtete ich darauf, dass diese ähnlich weit voneinander entfernt und ähnlich groß sind.

Die Datensätze für Aufgabe 2 erstellte ich so, dass die Werte einen zeitlichen Verlauf haben. In dem Monat, in dem eine Provinz die höchste Temperatur oder den höchsten Niederschlag hat, haben die benachbarten Monate geringere Werte. Je größer der Abstand zum Monat mit dem höchsten Wert ist, desto stärker nehmen die Werte ab. Damit die Daten nicht zu künstlich wirken, fügte ich den monatlichen Veränderungen der Werte ein Rauschen hinzu. Den Zeitraum der Daten beschränkte ich auf Januar bis Dezember 2025. In Datensatz A hat Kamphaeng Phet im April die höchste Temperatur mit einem Wert von 62 und Rayong im September den höchsten Niederschlag mit einem Wert von 21. In Datensatz B hat Phayao im Mai die höchste Temperatur mit einem Wert von 56 und Nongbua Lamphu im August den höchsten Niederschlag mit einem Wert von 39.

In den Datensätzen für die Aufgaben 3 bis 5 haben die Temperatur und der Niederschlag für jede Provinz einen Startwert zwischen 25 und 75. Die Werte können im Verlauf einen Minimalwert von 10 und einen Maximalwert von 90 erreichen. Dabei achtete ich darauf, dass sich die Variablen bei einem Zusammenhang in jedem Zeitschritt in die gleiche bzw. entgegengesetzte Richtung entwickeln. Durch ein hinzugefügtes Rauschen verändern sie sich nicht gleich stark, damit die Daten nicht zu künstlich wirken. Wenn ein Wert einen der Grenzwerte überschreiten würde, findet ein Richtungswechsel statt. Außerdem legte ich fest, dass maximal ein zufälliger Richtungswechsel stattfinden darf, damit die Werte nicht ständig steigen und sinken. Den Zeitraum der Daten beschränkte ich auf Januar bis Dezember 2025, damit die Teilnehmenden nicht mit einem zu großen Zeitraum überfordert werden. Bei einem

zu großen Zeitraum könnte sich ansonsten die Bearbeitungszeit erhöhen. Die Datensätze befinden sich im digitalen Anhang (DA11).

Gegenbalancierung

Da die Teilnehmenden alle Aufgaben unter beiden Bedingungen bearbeiteten, konnten Effekte durch die Reihenfolge entstehen. Zudem konnten sich die Datensätze trotz ihrer vergleichbaren Gestaltung in ihrer Schwierigkeit unterscheiden. Deshalb führte ich eine Gegenbalancierung durch, um mögliche Lerneffekte und Unterschiede zwischen den Datensätzen gleichmäßig auf beide Bedingungen zu verteilen. Die zuerst verwendete Bedingung wechselte ich zwischen den Teilnehmenden ab. Die erste Person bearbeitete die Aufgaben zunächst mit der einzelnen Tilt Map und danach mit der Tilt Map Gruppe. Die zweite Person begann mit der Tilt Map Gruppe und verwendete danach die einzelne Tilt Map. Diese Abfolge führte ich für die weiteren Teilnehmenden fort. Für die zuerst bearbeitete Bedingung verwendete ich immer Datensatz A und für die zweite Bedingung Datensatz B. Durch die wechselnde Reihenfolge der Bedingungen wurden beide Datensätze gleichmäßig der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe zugeordnet. Innerhalb jeder Bedingung bearbeiteten die Teilnehmenden als Erstes die Aufgaben 1 und 2. Für die Aufgaben 3 bis 5 verwendete ich sechs mögliche Reihenfolgen. Diese sind in Tabelle 4.2 zu sehen. Nach der sechsten Person begann ich wieder mit der ersten Reihenfolge.

Tabelle 4.2 Übersicht der Gegenbalancierung für die Aufgaben 3 bis 5.

Nr.	1. Bedingung und Reihenfolge	2. Bedingung und Reihenfolge
1	Datensatz A, Einzelne Tilt Map: 3→4→5	Datensatz B, Tilt Map Gruppe: 5→4→3
2	Datensatz A, Tilt Map Gruppe: 3→4→5	Datensatz B, Einzelne Tilt Map: 5→4→3
3	Datensatz A, Einzelne Tilt Map: 4→5→3	Datensatz B, Tilt Map Gruppe: 3→5→4
4	Datensatz A, Tilt Map Gruppe: 4→5→3	Datensatz B, Einzelne Tilt Map: 3→5→4
5	Datensatz A, Einzelne Tilt Map: 5→3→4	Datensatz B, Tilt Map Gruppe: 4→3→5
6	Datensatz A, Tilt Map Gruppe: 5→3→4	Datensatz B, Einzelne Tilt Map: 4→3→5

4.2.2 Datenerhebung

Neben den während der Aufgaben aufgezeichneten Daten erhob ich weitere Daten mithilfe von Fragebögen. Die Fragebögen erstellte ich über SoSci Survey[1]. Es gab einen Fragebogen mit demografischen Fragen und einen mit Fragen zur Vorerfahrung. Außerdem gab es gesundheitliche Fragen, die vor und nach der Studie beantwortet wurden. Die gesundheitlichen Fragen dienten dazu, mögliche negative Auswirkungen der Studie auf das Wohlbefinden sowie mögliche Benachteiligungen durch eine Sehschwäche zu erfassen. Nach jeder Bedingung beantworteten die Teilnehmenden den NASA-TLX. Dieser ist ein Fragebogen zur subjektiven Erfassung der Arbeitsbelastung in verschiedenen Dimensionen (Hart und Staveland, 1988). Dazu gehören die geistige Anforderung, die körperliche Anforderung, die zeitliche Anforderung, die Leistung, die Anstrengung und die Frustration. Der NASA-TLX wurde aus Zeitgründen nicht nach jeder Aufgabe beantwortet, sondern nachdem alle fünf Aufgaben einer Bedingung bearbeitet wurden. Auf die Gewichtung der Dimensionen verzichtete ich aus demselben Grund. Den NASA-TLX verwendete ich, weil er seit vielen Jahren ein etabliertes Werkzeug zur Messung der Arbeitsbelastung ist (Hart, 2006). Dies ermöglicht einen Vergleich zwischen den beiden Bedingungen. Zum Abschluss beantworteten die Teilnehmenden vergleichende Fragen zu beiden Bedingungen und sie hatten die Möglichkeit, Feedback zu hinterlassen. Alle Fragen und deren Antwortmöglichkeiten sind im Anhang A in den Tabellen A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 und A.6 zu finden.

4.2.3 Versuchsaufbau und Ablauf der Studie

Die Studie führte ich mit einer Meta Quest 3 und den zugehörigen Controllern durch. Um Verbindungsprobleme während der Studie zu vermeiden, wurde die Meta Quest mithilfe eines Meta Quest Link-Kabels[2] mit dem Computer verbunden. Die Teilnehmenden hatten während der Studie einen großen Arbeitsbereich, damit sie sich frei in der virtuellen Umgebung bewegen konnten.

Da die erweiterte Tilt Map viele Funktionen und Tasten zum Bedienen hat, beschränkte ich die Funktionalität für die Studie auf das Notwendigste. Die Teilnehmenden bewegten sich in der virtuellen Umgebung, indem sie sich in der realen Umgebung bewegten. Außerdem konnten sie die Tilt Map greifen und den Laser nutzen. Die Drilldown-Funktion des Lasers deaktivierte ich. Der Zeitregler stand ebenfalls zur Verfügung. Alle Aktionen konnten sowohl mit dem rechten als auch mit dem linken Controller durchgeführt werden.

[1] SoSci Survey: https://www.soscisurvey.de/

[2] Meta Quest Link-Kabel: https://www.meta.com/de/quest/accessories/link-cable/

Vor der Bearbeitung der Aufgaben mussten die Teilnehmenden ein Tutorial absolvieren. Darin lernten sie, wie die einzelne Tilt Map bzw. die Tilt Map Gruppe bedient wird, welche Funktionen zur Verfügung stehen und wie diese verwendet werden. Außerdem erklärte ich, welche Bedeutung die Farbe und die Höhe haben. Während des Tutorials wurde an der Wand vor der teilnehmenden Person ein Video abgespielt, in dem gezeigt wurde, wie die jeweilige Aufgabe des Tutorials erfolgreich absolviert wird. In einem Video rechts daneben wurde gezeigt, welche Tasten dafür benötigt werden. Links neben den Videos wurde die Farblegende angezeigt. Abbildung 4.1 zeigt einen Ausschnitt der virtuellen Umgebung des Tutorials.

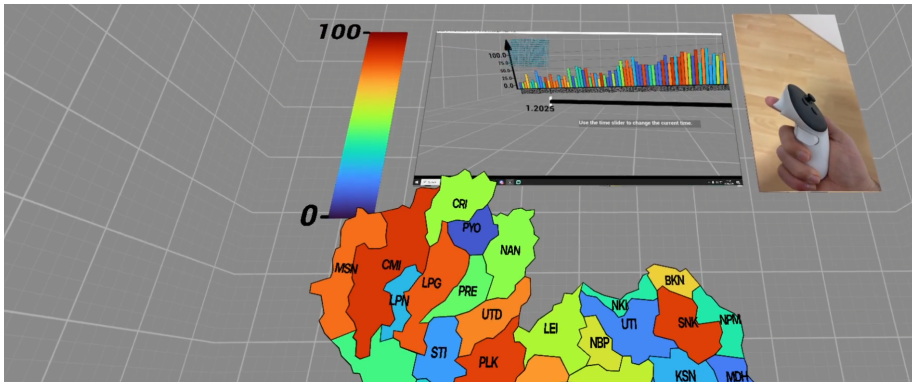


Abbildung 4.1 Virtuelle Umgebung des Tutorials.

In der virtuellen Umgebung, in der die Aufgaben der Studie bearbeitet wurden, wurde die Aufgabe mittig auf der Wand vor der teilnehmenden Person angezeigt. Links daneben wurde die Farblegende eingeblendet. Rechts von der Aufgabe wurde angezeigt, welche Variable durch die Farbe und die Höhe bzw. durch die linke und die rechte Tilt Map dargestellt wird. An der Wand rechts von der teilnehmenden Person war eine Abbildung der Tasten des Controllers und ihrer Funktionen zu sehen. Die virtuelle Umgebung, in der die Aufgaben der Studie bearbeitet wurden, ist in Abbildung 4.2 zu sehen.

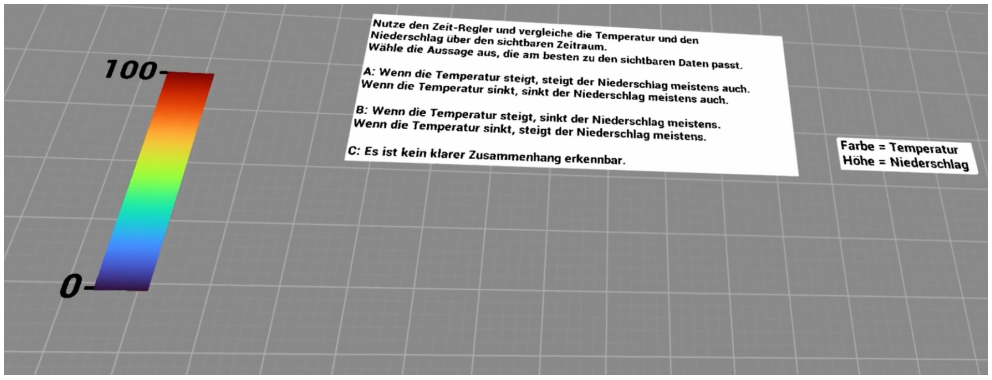


Abbildung 4.2 Virtuelle Umgebung der Studie.

Ablauf der Studie

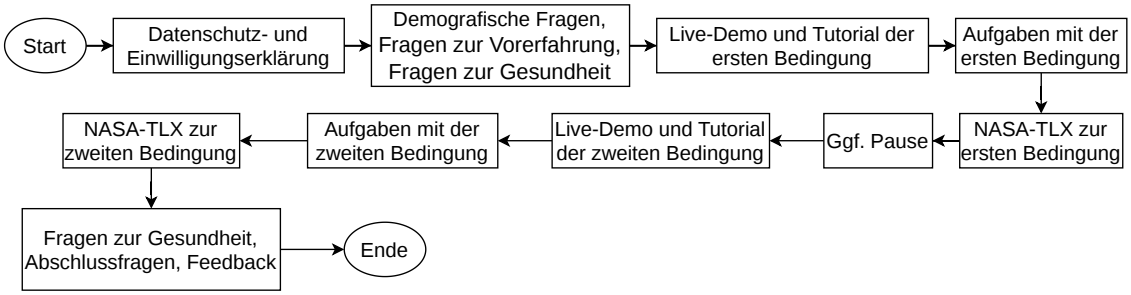


Abbildung 4.3 Ablauf der Studie in kompakter Form.

Der Ablauf der Studie ist in kompakter Form in Abbildung 4.3 visualisiert. Die Fragebögen wurden auf einem Laptop beantwortet. Zu Beginn der Studie erhielten die Teilnehmenden eine Datenschutzerklärung und eine Einwilligungserklärung. Anschließend beantworteten sie die demografischen Fragen sowie die Fragen zur Vorerfahrung und Gesundheit.

Bevor die Teilnehmenden die Aufgaben mit der ersten Bedingung bearbeiteten, führte ich ihnen die Interaktionen und Funktionen dieser Bedingung vor. Auf einem Monitor konnten die Teilnehmenden die Darstellung im HMD sehen und gleichzeitig die Vorführung von außen beobachten. So konnten sie vor dem Betreten der virtuellen Umgebung sehen, welche Tasten benötigt werden und wie die Interaktionen funktionieren. Außerdem erklärte ich ihnen dabei das für die Studie benötigte Wissen. Danach absolvierten sie das Tutorial der ersten Bedingung, um die Interaktion mit der einzelnen Tilt Map bzw. der Tilt Map Gruppe zu lernen. Das Tutorial bestand aus fünf kurzen Aufgaben, in denen alle für die Studie benötigten Funktionen verwendet wurden. Daraufhin konnten die Teilnehmenden so lange üben, bis sie sich für die Aufgaben der Studie bereit fühlten.

Vor dem Beginn der Aufgaben der ersten Bedingung überprüfte ich, ob sie die Bedeutung der Farbe und der Höhe bzw. der linken und rechten Tilt Map verstanden hatten. Außerdem erklärte ich, dass die Temperatur und der Niederschlag für beliebige Variablen stehen und auch als Variable A und Variable B betrachtet werden können. Zusätzlich wies ich darauf hin, dass es keine echten Daten sind. Danach teilte ich den Teilnehmenden mit, dass die Bearbeitungszeit gemessen wird, die Korrektheit der Antworten jedoch wichtiger ist als eine schnelle Bearbeitung. Während der gesamten Studie konnten sie Fragen stellen und Anmerkungen machen, die ich notierte. Zu Beginn jeder Aufgabe lasen die Teilnehmenden zunächst die Aufgabenstellung. Sobald sie diese verstanden hatten, wurde die einzelne Tilt Map bzw. die Tilt Map Gruppe vor ihnen platziert und die Bearbeitung begann. Sobald die Teilnehmenden eine Antwort nannten, notierte ich diese und beendete die Aufgabe. Nach

den fünf Aufgaben beantworteten die Teilnehmenden die Fragen des NASA-TLX zur ersten Bedingung. Anschließend hatten sie die Möglichkeit, eine Pause zu machen.

Nach der Pause führte ich ihnen die zweite Bedingung vor und sie absolvierten das zugehörige Tutorial. Danach bearbeiteten sie die fünf Aufgaben mit der zweiten Bedingung und beantworteten die Fragen des NASA-TLX zu dieser Bedingung. Zum Abschluss beantworteten die Teilnehmenden die gesundheitlichen und vergleichenden Fragen. Außerdem hatten sie die Möglichkeit, Feedback zu hinterlassen.

4.2.4 Datenauswertung

Die Ergebnisse der Studie wertete ich mit Python[3] und den Bibliotheken pandas[4], NumPy[5], SciPy[6], statsmodels[7] und Matplotlib[8] aus. Für die statistischen Tests legte ich ein Signifikanzniveau von 0,05 fest. Da die gepaarten Differenzen der Teilnehmenden nicht durchgehend normalverteilt sind, verwendete ich nichtparametrische Tests.

Für den Vergleich zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe nutzte ich den zweiseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test. Die Differenzen berechnete ich als *einzelne Tilt Map – Tilt Map Gruppe*. Messpaare mit einer Differenz von 0 schloss ich von der Berechnung aus. Wenn es keine Bindungen (Ties) gab, verwendete ich die exakte Berechnung. Bindungen sind vorhanden, wenn mehrere Differenzen der Messpaare die gleichen Beträge haben. Wenn Bindungen vorhanden waren, berechnete ich den p-Wert mithilfe einer vollständigen Permutation aller möglichen Vorzeichenbelegungen. Außerdem berechnete ich die rangbiseriale Korrelation (r_{rb}) als Effektstärke. Positive Werte zeigen höhere Werte bei der einzelnen Tilt Map und negative Werte höhere Werte bei der Tilt Map Gruppe an. Je näher der Wert bei 1 bzw. -1 ist, desto stärker ist der Effekt. Beim Vergleich der durchschnittlichen Verteilung der Bearbeitungszeiten auf die Ansichten korrigierte ich die p-Werte innerhalb jeder Aufgabe zusätzlich mit der Holm-Korrektur (p_{Holm}). Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit verringert, zufällig einen signifikanten Unterschied zu erhalten.

Da bei der Korrektheit nur zwischen richtig und falsch unterschieden wurde, berechnete ich den p-Wert mit dem exakten McNemar-Test. Die Ergebnisse werden als gestapelte Balkendiagramme, Boxplots und Punktediagramme visualisiert.

[3] Python 3.13.5: https://www.python.org/
[4] Pandas 2.2.3: https://pandas.pydata.org/
[5] NumPy 2.3.5: https://numpy.org/
[6] SciPy 1.17.0: https://scipy.org/
[7] Statsmodels 0.14.6: https://www.statsmodels.org/
[8] Matplotlib 3.10.8: https://matplotlib.org/

4.3 Ergebnisse

Die Teilnehmenden lud ich über die Universität Bremen sowie aus meinem Freundes- und Bekanntenkreis zur Studie ein. Von den 17 Teilnehmenden identifizierten sich 15 als männlich und 2 als weiblich. 16 Teilnehmende waren zwischen 25 und 34 Jahre alt, 1 Person war 55 Jahre oder älter. 2 Personen verfügten über einen Schulabschluss, 4 über eine abgeschlossene Berufsausbildung, 9 über einen Bachelorabschluss, 1 Person über einen Masterabschluss und 1 Person über einen Doktorabschluss. Die offenen Angaben zum Berufsfeld bzw. Studienfach fasste ich zu übergeordneten Bereichen zusammen. 6 Teilnehmende kamen aus dem Bereich Informatik, 6 aus den Bereichen Wirtschaft, Handel und Verwaltung und 3 aus den Bereichen Technik und Industrie. Eine Person kam aus dem Gesundheitsbereich und eine aus den Sprachwissenschaften.

Abbildung 4.4 zeigt die Vorerfahrung der Teilnehmenden in verschiedenen Bereichen. Die Angaben erfolgten auf einer Likert-Skala von 0 (keine Erfahrung) bis 4 (sehr viel Erfahrung).

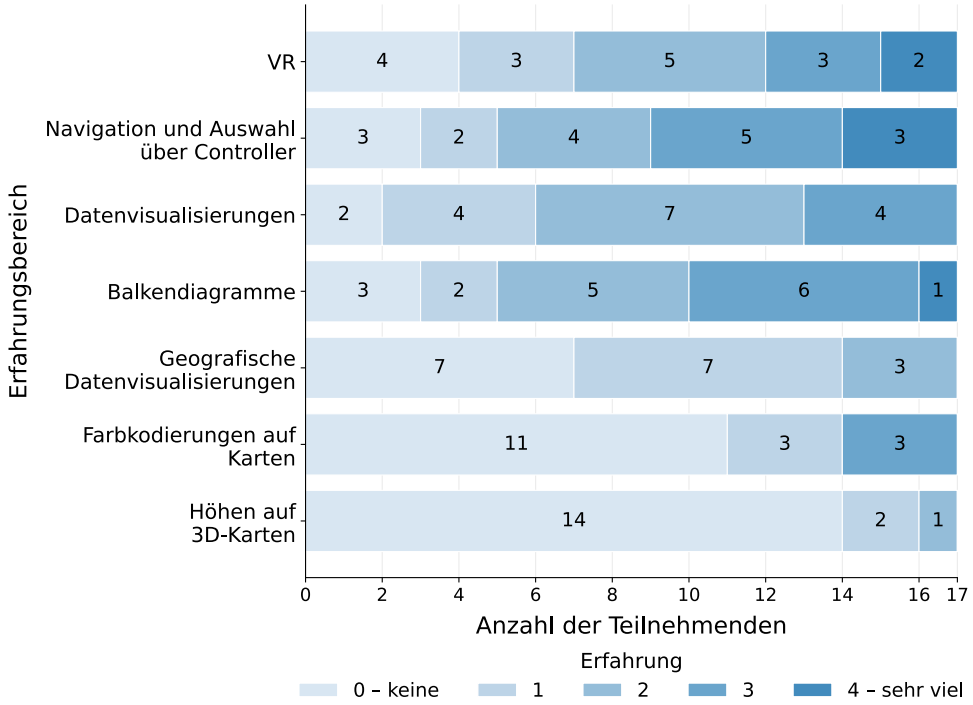


Abbildung 4.4 Verteilung der Vorerfahrung der Teilnehmenden.

In den Bereichen VR, Navigation und Auswahl über Controller sowie Balkendiagramme liegt der Median bei 2 ($IQR = 2$). Bei allgemeinen Datenvisualisierungen liegt der Median bei 2 ($IQR = 1$). Für geografische Datenvisualisierungen liegt der Median bei 1 ($IQR = 1$). Bei Farbkodierungen auf Karten liegt der Median bei 0 ($IQR = 1$). Die geringste Vorerfahrung

besteht bei der Interpretation von Höhen auf 3D-Karten ($Md = 0$, $IQR = 0$). Zusätzlich erhob ich die Vertrautheit der Teilnehmenden mit der geografischen Karte von Thailand. 11 Teilnehmende waren mit der Karte gar nicht vertraut, 5 wenig vertraut und 1 Person mittelmäßig vertraut.

Das körperliche Wohlbefinden erhob ich vor und nach der Studie. Bei 11 Teilnehmenden blieb es unverändert, bei 3 verbesserte es sich und bei 3 verschlechterte es sich. Vor der Studie gaben 3 Teilnehmende Müdigkeit als Beschwerde an. 2 von ihnen berichteten auch während der Studie von Müdigkeit. Insgesamt gaben 5 Teilnehmende Beschwerden während der Studie an. Genannt wurden leichtes Unwohlsein, Schwindel bzw. leichtes Schwindelgefühl, Augenbelastung und Motion Sickness. 11 Teilnehmende hatten eine bekannte Sehschwäche. Keine dieser Personen fühlte sich dadurch während der Studie eingeschränkt. 1 Person berichtete außerdem von einer bekannten Farbsehschwäche.

4.3.1 Aufgabe 1 und 2

Tabelle 4.3 fasst die wichtigsten deskriptiven Ergebnisse und statistischen Vergleiche für die Aufgaben 1 und 2 zusammen. Da alle 17 Teilnehmenden die Aufgaben in beiden Bedingungen korrekt beantwortet haben, führte ich keinen statistischen Vergleich für die Korrektheit durch.

Die Teilnehmenden hatten in beiden Bedingungen eine sehr hohe Sicherheit. Bei Aufgabe 1 gaben mit der einzelnen Tilt Map 15 Personen eine Sicherheit von 4 und 2 eine Sicherheit von 3 an. Mit der Tilt Map Gruppe gaben 17 Teilnehmende eine Sicherheit von 4 an. Der Median ist in beiden Bedingungen 4 ($IQR = 0$). Bei Aufgabe 2 gaben 12 Personen mit der einzelnen Tilt Map eine Sicherheit von 4 an, 3 Personen eine 3 und 2 Personen eine 2 ($Md = 4$, $IQR = 1$). Mit der Tilt Map Gruppe waren es 16 mit einer 4 und 1 Person mit einer 3 ($Md = 4$, $IQR = 0$). Der Unterschied zwischen den Bedingungen ist in Aufgabe 1 und in Aufgabe 2 nicht signifikant.

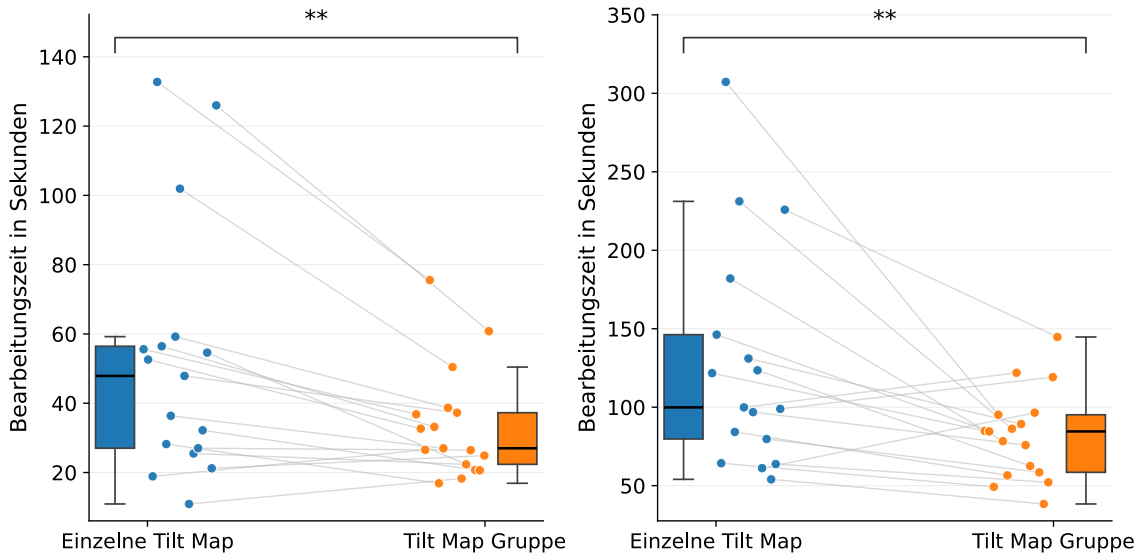
Tabelle 4.3 Deskriptive Ergebnisse und statistische Vergleiche für Aufgabe 1 und 2.

Aufgabe	**Messgröße**	**Einzelne Tilt Map**	**Tilt Map Gruppe**	W	p	r_{rb}
1	Korrektheit	17/17 (100 %)	17/17 (100 %)	–	–	–
	Sicherheit, *Md* (*IQR*)	4 (0)	4 (0)	0	0,500	-1,00
	Bearbeitungszeit in s, *Md* (*IQR*)	47,9 (29,4)	27,0 (14,9)	12	0,001	0,84
2	Korrektheit	17/17 (100 %)	17/17 (100 %)	–	–	–
	Sicherheit, *Md* (*IQR*)	4 (1)	4 (0)	0	0,125	-1,00
	Bearbeitungszeit in s, *Md* (*IQR*)	99,9 (66,5)	84,6 (36,7)	20	0,006	0,74

Bearbeitungszeit

Abbildung 4.5 zeigt die Bearbeitungszeiten für Aufgabe 1 und 2. Diese sind als Boxplots für die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe dargestellt. Die Punkte zeigen die Bearbeitungszeiten der Teilnehmenden. Die Linien verbinden die Werte derselben Person.

Bei Aufgabe 1 liegt der Median der Bearbeitungszeit mit der einzelnen Tilt Map bei 47,9 Sekunden ($IQR = 29,4$) und mit der Tilt Map Gruppe bei 27,0 Sekunden ($IQR = 14,9$). 14 Personen waren mit der Tilt Map Gruppe schneller als mit der einzelnen Tilt Map. Dieser Unterschied ist signifikant ($W = 12$, $p = 0,001$, $r_{rb} = 0,84$). Der Median ist bei Aufgabe 2 mit der einzelnen Tilt Map 99,9 Sekunden ($IQR = 66,5$) und mit der Tilt Map Gruppe 84,6 Sekunden ($IQR = 36,7$). 14 Teilnehmende waren mit der Tilt Map Gruppe schneller. Hier ist der Unterschied signifikant ($W = 20$, $p = 0,006$, $r_{rb} = 0,74$). Bei beiden Aufgaben sind bei der einzelnen Tilt Map extreme Ausreißer vorhanden, während bei der Tilt Map Gruppe in Aufgabe 1 weniger starke Ausreißer auftreten.



(a) Aufgabe 1

(b) Aufgabe 2

Abbildung 4.5 Vergleich der Bearbeitungszeiten zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe für Aufgabe 1 und 2.

Nutzung der Ansichten

In Abbildung 4.6 ist die durchschnittliche Verteilung der Bearbeitungszeit auf die verschiedenen Ansichten zu sehen. Bei beiden Aufgaben nutzten die Teilnehmenden die meiste Zeit das Balkendiagramm. Bei Aufgabe 1 verbrachten sie mit der einzelnen Tilt Map durchschnittlich 57,1 % und mit der Tilt Map Gruppe 65,8 % der Bearbeitungszeit im Balkendiagramm. Nach der Holm-Korrektur zeigt sich für keine der Ansichten ein signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen.

Bei Aufgabe 2 verbrachten die Teilnehmenden mit der einzelnen Tilt Map durchschnittlich 70,0 % und mit der Tilt Map Gruppe 82,1 % der Bearbeitungszeit im Balkendiagramm. Nach der Holm-Korrektur zeigt sich beim Übergang zwischen der Choroplethenkarte und der Prism Map ein signifikanter Unterschied ($W = 13$, $p_{\text{Holm}} = 0,007$, $r_{\text{rb}} = 0,83$). Der Median ist bei der einzelnen Tilt Map 0,56 % ($IQR = 1,32$) und bei der Tilt Map Gruppe 0,12 % ($IQR = 0,21$). Im Anhang A in Tabelle A.7 sind die deskriptiven Ergebnisse und statistischen Vergleiche der zeitlichen Anteile der Ansichten an der Bearbeitungszeit zu sehen.

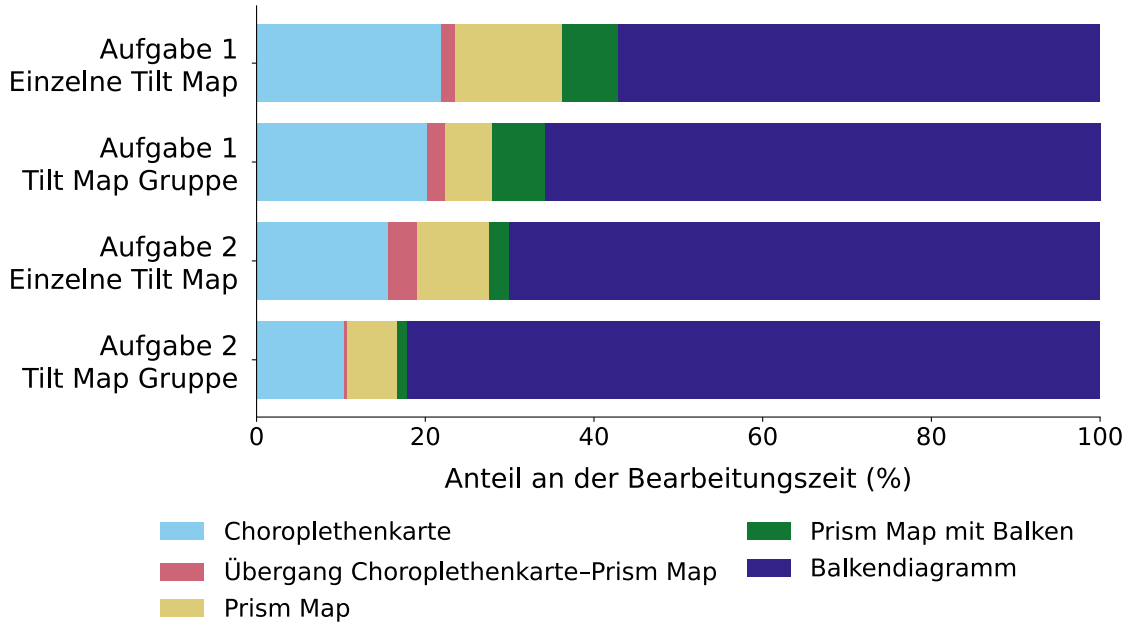


Abbildung 4.6 Durchschnittliche Verteilung der Bearbeitungszeit auf die Ansichten für Aufgabe 1 und 2.

Ergänzende Daten

Tabelle 4.4 zeigt die Ergebnisse der Ansichtswechsel, der Nutzung des Lasers, der zurückgelegten Strecke und der Rotation. Da die Bearbeitungszeiten variierten, normalisierte ich die Messgrößen auf die Bearbeitungszeit. Bei Aufgabe 1 ist die Rotation pro Minute mit der Tilt Map Gruppe höher als mit der einzelnen Tilt Map. Dieser Unterschied ist signifikant ($W = 32$, $p = 0,035$, $r_{\text{rb}} = -0,58$). Bei den anderen Ergebnissen sind die Unterschiede nicht signifikant.

Tabelle 4.4 Deskriptive Ergebnisse und statistische Vergleiche der Ansichtswechsel, Lasernutzung und Bewegungsdaten für Aufgabe 1 und 2.

Aufgabe	Messgröße	Einzelne Tilt Map, *Md (IQR)*	Tilt Map Gruppe, *Md (IQR)*	*W*	*p*	r_{rb}
1	Ansichtswechsel/min	12,2 (8,1)	9,5 (7,1)	75	0,963	0,02
	Laseranteil (%)	68,6 (27,5)	66,7 (16,1)	55	0,329	0,28
	Strecke (cm/min)	348,6 (131,6)	361,4 (218,7)	75	0,963	0,02
	Rotation (°/min)	1282,6 (671,1)	1416,3 (640,6)	32	0,035	-0,58
2	Ansichtswechsel/min	4,3 (3,7)	3,8 (3,4)	45	0,145	0,41
	Laseranteil (%)	70,1 (27,6)	76,9 (24,6)	63	0,548	-0,18
	Strecke (cm/min)	307,9 (157,0)	330,2 (172,6)	69	0,747	-0,10
	Rotation (°/min)	1124,4 (315,6)	1214,3 (332,5)	66	0,644	-0,14

4.3.2 Aufgabe 3 bis 5

Die Tabelle 4.5 zeigt die wichtigsten deskriptiven Ergebnisse und statistischen Vergleiche für die Aufgaben 3 bis 5. Bei allen Aufgaben gibt es für die Korrektheit keinen signifikanten Unterschied zwischen den Bedingungen. Aufgabe 3 beantworteten 16 von 17 Teilnehmenden mit der einzelnen Tilt Map korrekt und 15 mit der Tilt Map Gruppe. Bei Aufgabe 4 wurden mit der einzelnen Tilt Map 16 und mit der Tilt Map Gruppe 14 korrekte Antworten gegeben. Bei Aufgabe 5 gaben mit der einzelnen Tilt Map 14 Personen eine korrekte Antwort an und mit der Tilt Map Gruppe waren es 11. Im Anhang A sind in Tabelle A.8 die gewählten Antworten der Teilnehmenden zu sehen.

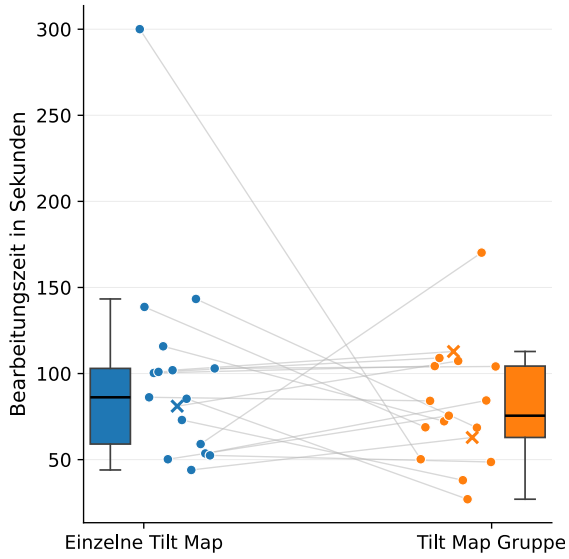
Tabelle 4.5 Deskriptive Ergebnisse und statistische Vergleiche für Aufgabe 3 (positiver Zusammenhang), Aufgabe 4 (negativer Zusammenhang) und Aufgabe 5 (kein Zusammenhang).

Aufgabe	Messgröße	Einzelne Tilt Map	Tilt Map Gruppe	W	p	r_{rb}
3	Korrektheit	16/17 (94,1 %)	15/17 (88,2 %)	–	1,000	–
	Sicherheit, *Md* (*IQR*)	4 (2)	3 (1)	27,5	1,000	0,00
	Bearbeitungszeit in s, *Md* (*IQR*)	86,2 (43,9)	75,5 (41,5)	66	0,644	0,14
4	Korrektheit	16/17 (94,1 %)	14/17 (82,4 %)	–	0,625	–
	Sicherheit, *Md* (*IQR*)	3 (0)	3 (2)	21	0,615	-0,24
	Bearbeitungszeit in s, *Md* (*IQR*)	81,4 (61,6)	95,4 (57,3)	71	0,818	-0,07
5	Korrektheit	14/17 (82,4 %)	11/17 (64,7 %)	–	0,250	–
	Sicherheit, *Md* (*IQR*)	3 (2)	3 (1)	21	0,615	0,24
	Bearbeitungszeit in s, *Md* (*IQR*)	107,8 (84,7)	83,3 (50,5)	47	0,174	0,39

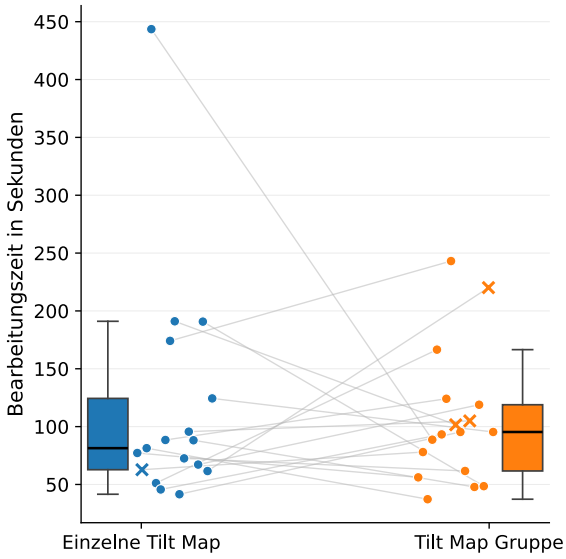
In Bezug auf die Sicherheit gibt es in allen Aufgaben keinen signifikanten Unterschied. Die Teilnehmenden schätzten ihre Sicherheit bei allen Aufgaben überwiegend hoch bis sehr hoch ein. Bei Aufgabe 3 liegt der Median mit der einzelnen Tilt Map bei 4 ($IQR = 2$) und mit der Tilt Map Gruppe bei 3 ($IQR = 1$). Bei den anderen Aufgaben beträgt der Median in beiden Bedingungen 3.

Bearbeitungszeit

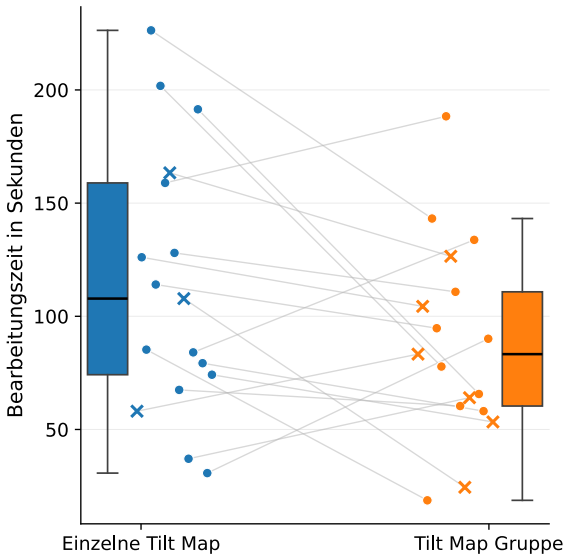
Abbildung 4.7 zeigt die Bearbeitungszeiten der Teilnehmenden für die Aufgaben 3 bis 5. Falsche Antworten sind durch ein Kreuz gekennzeichnet. Es gibt bei keiner der Aufgaben einen signifikanten Unterschied zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe. In allen Aufgaben und beiden Bedingungen liegt der Median der Bearbeitungszeit zwischen 75,5 und 107,8 Sekunden. Der *IQR* liegt zwischen 41,5 und 84,7 Sekunden. Bei Aufgabe 3 und 4 waren jeweils 9 Teilnehmende mit der einzelnen Tilt Map schneller als mit der Tilt Map Gruppe. Bei Aufgabe 5 waren 12 Personen mit der Tilt Map Gruppe schneller. Aufgabe 3 und 4 zeigen extreme Ausreißer bei der einzelnen Tilt Map, während bei der Tilt Map Gruppe weniger starke Ausreißer vorhanden sind. Bei Aufgabe 5 ist ein Ausreißer bei der Tilt Map Gruppe vorhanden. Die Streuung der Daten ist bei Aufgabe 5 mit der einzelnen Tilt Map deutlich größer als mit der Tilt Map Gruppe.



(a) Aufgabe 3



(b) Aufgabe 4



(c) Aufgabe 5

Abbildung 4.7 Vergleich der Bearbeitungszeiten zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe für Aufgabe 3 bis 5.

Nutzung der Ansichten

Abbildung 4.8 zeigt die durchschnittliche Verteilung der Bearbeitungszeit auf die verschiedenen Ansichten für die Aufgaben 3 bis 5. Bei allen Aufgaben nutzten die Teilnehmenden das Balkendiagramm am meisten. Mit der einzelnen Tilt Map waren es zwischen 44,8 % und 48,5 % der Zeit. Mit der Tilt Map Gruppe waren es zwischen 50,6 % und 60,0 %. Nach der Holm-Korrektur ist bei den Aufgaben 3 und 4 für keine der Ansichten ein signifikanter Unterschied zwischen den Bedingungen vorhanden.

Bei Aufgabe 5 ist der Unterschied für die Choroplethenkarte zwischen den Bedingungen signifikant ($W = 20, p_{Holm} = 0,028, r_{rb} = -0,74$). Der Median beträgt mit der einzelnen Tilt Map 2,45 % ($IQR = 2,11$) und mit der Tilt Map Gruppe 4,33 % ($IQR = 2,52$). Im Anhang A in Tabelle A.7 sind die deskriptiven Ergebnisse und statistischen Vergleiche der zeitlichen Anteile der Ansichten an der Bearbeitungszeit zu sehen.

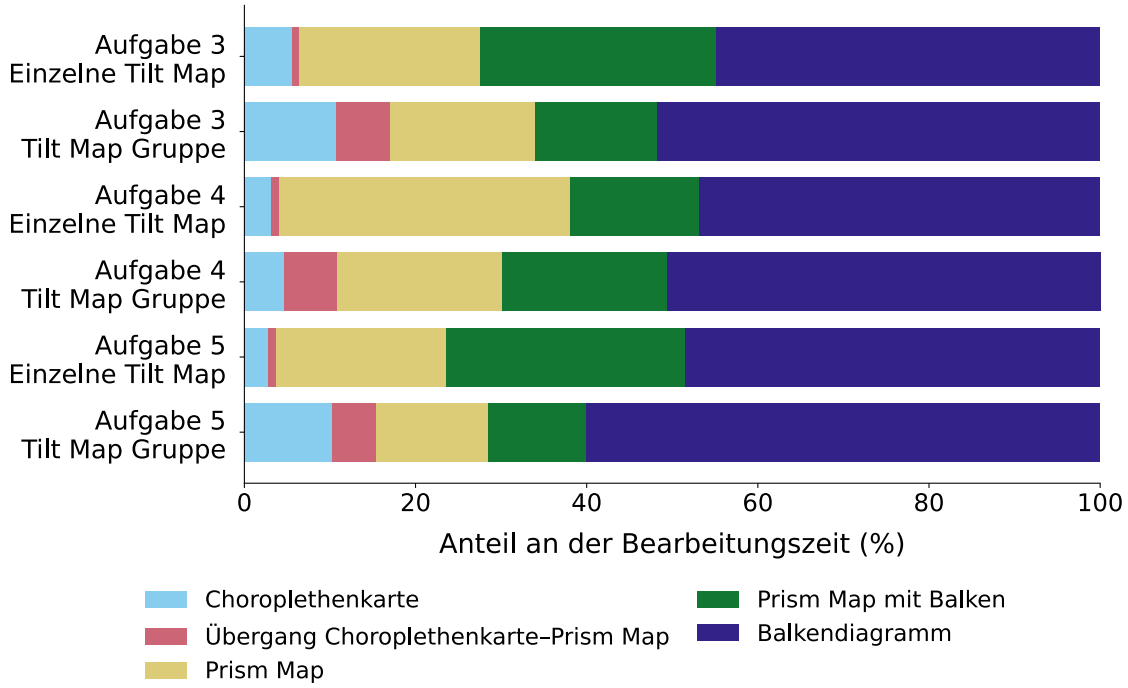


Abbildung 4.8 Durchschnittliche Verteilung der Bearbeitungszeit auf die Ansichten für Aufgabe 3 bis 5.

Ergänzende Daten

In der Tabelle 4.6 sind die Ergebnisse der Ansichtswechsel, der Nutzung des Lasers, der zurückgelegten Strecke und der Rotation für die Aufgaben 3 bis 5. Die Messgrößen normalisierte ich auf die Bearbeitungszeit. Es gibt in allen Aufgaben keinen signifikanten Unterschied zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe.

Tabelle 4.6 Deskriptive Ergebnisse und statistische Vergleiche der Ansichtswechsel, Lasernutzung und Bewegungsdaten für die Aufgaben 3 bis 5.

Aufgabe	Messgröße	Einzelne Tilt Map, *Md (IQR)*	Tilt Map Gruppe, *Md (IQR)*	*W*	*p*	r_{rb}
3	Ansichtswechsel/min	5,5 (4,3)	6,9 (9,2)	42	0,109	-0,45
	Laseranteil (%)	31,0 (83,3)	40,5 (84,4)	42	0,839	-0,08
	Strecke (cm/min)	274,7 (178,6)	271,1 (231,1)	74	0,927	-0,03
	Rotation (°/min)	915,1 (487,2)	920,9 (445,5)	68	0,712	-0,11
4	Ansichtswechsel/min	4,5 (5,5)	6,4 (3,8)	63	0,548	-0,18
	Laseranteil (%)	0,0 (54,8)	60,5 (80,6)	23	0,068	-0,56
	Strecke (cm/min)	276,3 (171,3)	281,5 (203,1)	75	0,963	-0,02
	Rotation (°/min)	1110,0 (560,9)	936,5 (587,1)	61	0,487	0,20
5	Ansichtswechsel/min	6,5 (5,9)	4,6 (6,5)	68	0,712	-0,11
	Laseranteil (%)	32,5 (86,4)	33,2 (87,7)	44	0,626	0,16
	Strecke (cm/min)	274,3 (175,7)	254,2 (126,3)	72	0,854	0,06
	Rotation (°/min)	1021,9 (534,1)	915,0 (341,7)	58	0,404	0,24

4.3.3 NASA-TLX

Die Bewertungen der sechs Dimensionen des NASA-TLX für die einzelne Tilt Map und für die Tilt Map Gruppe sind als Boxplots in Abbildung 4.9 zu sehen. Die höchste Bewertung hat die geistige Anforderung in beiden Bedingungen. Die körperliche Anforderung, zeitliche Anforderung und die Frustration wurden überwiegend niedrig bewertet. Der Median des ungewichteten Gesamtwertes der Dimensionen beträgt mit der einzelnen Tilt Map 30,8 ($IQR = 21,7$) und mit der Tilt Map Gruppe 36,7 ($IQR = 19,2$). Der Unterschied zwischen den Bedingungen ist nicht signifikant ($W = 52$, $p = 0,258$, $r_{rb} = 0,32$). Auch bei den einzelnen Dimensionen gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Bedingungen. Im Anhang A in der Tabelle A.9 sind die deskriptiven Ergebnisse und statistischen Vergleiche der Bewertungen des NASA-TLX.

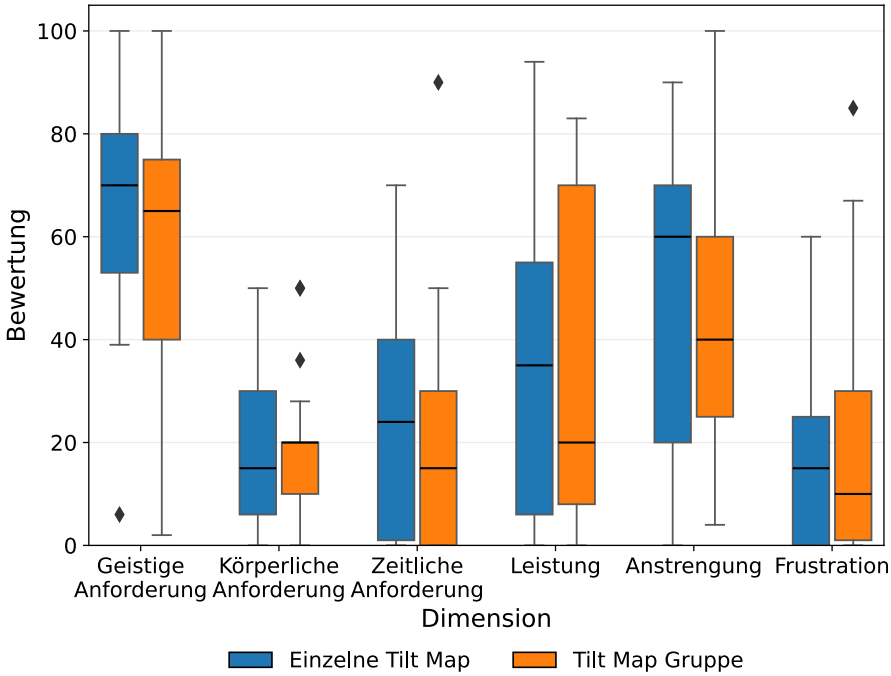


Abbildung 4.9 Ergebnisse des NASA-TLX.

4.3.4 Abschließende Fragen

Abbildung 4.10 zeigt die Ergebnisse der abschließenden Fragen. Dort wählten die Teilnehmenden, welche Bedingung sie zum Ablesen einzelner Werte und zum Erkennen von Zusammenhängen bevorzugten. Außerdem gaben sie an, welche Bedingung sie visuell besser strukturiert fanden, welche sich leichter interpretieren ließ und welche sie insgesamt bevorzugten. Die Tilt Map Gruppe wurde bei allen fünf Aspekten häufiger gewählt.

Zu jedem Aspekt konnten die Teilnehmenden eine Begründung angeben, weshalb sie sich für die jeweilige Bedingung entschieden hatten. Zum Ablesen einzelner Werte schrieben 3 Teilnehmende in Bezug auf die Tilt Map Gruppe, dass ihnen die visuelle Trennung der Variablen durch zwei Tilt Maps half. 3 weitere schrieben, dass die Tilt Map Gruppe übersichtlicher war. 1 Person, welche die einzelne Tilt Map wählte, konnte die höchsten Werte beider Variablen schneller und einfacher erkennen. Zum Erkennen von Zusammenhängen schrieben 3 Teilnehmende, dass ihnen die Trennung der Variablen durch zwei Tilt Maps half. 2 Personen nannten die bessere Übersichtlichkeit der Tilt Map Gruppe und 1 Person schrieb, dass sie weniger nachdenken musste. Zur visuellen Strukturierung schrieb 1 Person, dass ihr die Trennung der Variablen durch zwei Tilt Maps half. 1 Person schrieb, dass die Tilt Map Gruppe übersichtlicher war. 1 Person, welche die einzelne Tilt Map wählte, fand es anfangs verwirrend, beide Variablen gleichzeitig zu betrachten. Zur leichteren Interpretation schrieb 1 Person, dass die Tilt Map Gruppe übersichtlicher war, und 1 weitere Person, dass die Trennung der Variablen durch zwei Tilt Maps die Interpretation erleichterte.

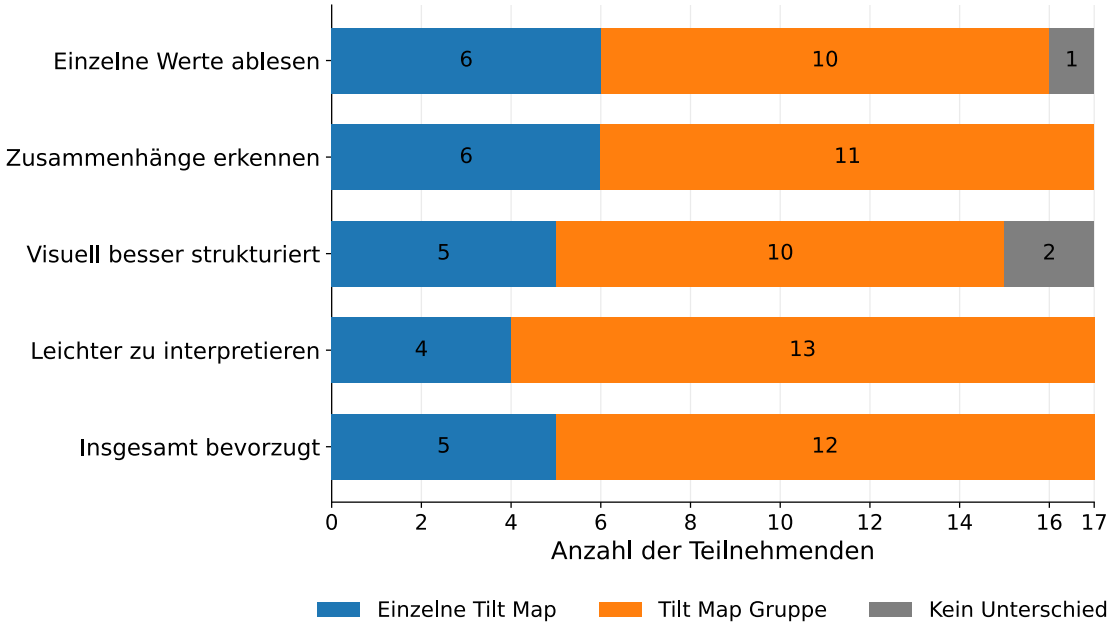


Abbildung 4.10 Bevorzugte Bedingung der Teilnehmenden in verschiedenen Aspekten

1 Person, welche die Tilt Map Gruppe insgesamt bevorzugte, schrieb, dass sie die einzelne Tilt Map präferiert hätte, wenn es noch mehr Karten geben würde. 1 weitere schrieb, dass die Tilt Map Gruppe übersichtlicher ist. 1 Person begründete es mit der Trennung durch zwei Tilt Maps. 1 Person schrieb, dass sie die Tilt Map Gruppe wählte, weil sie eine Farbsehschwäche hat. Diese Person erwähnte ebenfalls während der Durchführung der Studie mit der einzelnen Tilt Map, dass sie die Farben teilweise gar nicht unterscheiden konnte und die Aufgaben nur durch die Hilfe des Lasers schaffen konnte.

Ich fragte die Teilnehmenden, ob es eine Aufgabe oder Situation gab, in der eine Bedingung besser funktionierte. Neben den vorherigen Begründungen schrieben 2 Teilnehmende, dass das Balkendiagramm die beste Darstellung war. 1 Person meinte, dass die einzelne Tilt Map für die ersten beiden Aufgaben und die Tilt Map Gruppe für die Zusammenhangsaufgaben besser geeignet waren. 1 Person schrieb, dass es bei den ersten beiden Aufgaben keinen Unterschied zwischen den Bedingungen gab und die einzelne Tilt Map für die Zusammenhangsaufgaben besser geeignet war.

Als Verbesserungsvorschlag schrieb 1 Person, dass sich der angezeigte Wert von einer Provinz verändern soll, wenn diese mit einer Markierung festgesetzt wurde und der Zeitpunkt verändert wird. 1 Person schrieb, dass sich mehrere Provinzen gleichzeitig markieren und festsetzen lassen sollten. 1 Person wünschte sich eine Farbskala mit weniger Farben, beispielsweise Blau, Gelb und Rot. 1 Person schrieb, dass die Werte zu weit oben angezeigt wurden und dass sie die Taste zum Greifen mit der Taste des Zeitreglers tauschen würde.

1 Person schrieb, dass beim Setzen einer Markierung ein Vergleichsbild angezeigt werden sollte, wenn der Zeitpunkt geändert wird.

Als weitere Anmerkungen lobten 3 Teilnehmende die Studie und die Durchführung. 1 Person schrieb, dass sie bereits vor der Studie wusste, dass sie von Motion Sickness betroffen ist. 1 Person wünschte sich mehr Aufgaben.

Kapitel 5

Diskussion

In diesem Kapitel interpretiere und diskutiere ich die Ergebnisse der Studie. Zuerst behandle ich die Aufgaben zur Identifikation von Maximalwerten und danach die Zusammenhangsaufgaben. Daraufhin thematisiere ich die Nutzungsdauer der Ansichten, die Bewegungsdaten und den NASA-TLX. Abschließend beantworte ich die Forschungsfragen.

5.1 Identifikation von Maximalwerten

Mit der Hypothese H1 untersuchte ich, ob es mit der Tilt Map Gruppe zu einer höheren Korrektheit und zu einer kürzeren Bearbeitungszeit in den ersten beiden Aufgaben kommt. Hinsichtlich der Korrektheit wird diese Hypothese nicht bestätigt. Die ersten beiden Aufgaben beantworteten alle Teilnehmenden mit der einzelnen Tilt Map und mit der Tilt Map Gruppe korrekt. Deshalb führte ich für die Korrektheit keinen statistischen Test durch.

Ein Grund für diese hohe Korrektheit könnte sein, dass die Maximalwerte zu offensichtlich waren oder sich zu stark von den anderen Werten unterschieden. Auch der Laser kann dazu beigetragen haben. Die Teilnehmenden könnten bei der Interpretation der Farbe oder der Höhe unsicher gewesen sein und ihre Vermutungen mit dem Laser überprüft haben. Die teilnehmende Person, die eine Farbsehschwäche hat, erwähnte während der Studie, dass sie die Farben teilweise kaum bis gar nicht unterscheiden konnte. Sie meinte, dass sie sich bei den Aufgaben mit der einzelnen Tilt Map auf den Laser verlassen hat. Diese Person beantwortete alle Aufgaben korrekt. Eine weitere Studie sollte untersuchen, wie sich die Verfügbarkeit des Lasers auf die Korrektheit der Antworten auswirkt. Außerdem deuten die korrekten Antworten in den ersten beiden Aufgaben darauf hin, dass die Teilnehmenden die Funktionsweise und die Interaktion mit dem Laser und dem Zeitregler verstanden haben. In den abschließenden Fragen der Studie bevorzugte die Mehrheit die Tilt Map Gruppe zum Ablesen einzelner Werte. Nur eine Person empfand die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe als

gleich gut, obwohl sich die Korrektheit zwischen den Bedingungen nicht unterschied. Die Präferenz ist daher nicht ausschließlich auf korrekte Antworten zurückzuführen.

Die Sicherheit war bei den ersten beiden Aufgaben in beiden Bedingungen überwiegend sehr hoch. Außerdem unterschieden sich die Bewertungen der Sicherheit zwischen den Bedingungen kaum bis gar nicht. Bei Aufgabe 1 unterschieden sich 2 Messpaare zwischen den Bedingungen und bei Aufgabe 2 waren es 4. Aufgrund der wenigen unterschiedlichen Messpaare sind die p-Werte und Effektstärken nur eingeschränkt aussagekräftig. Die hohe Sicherheit der Teilnehmenden könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Aufgaben vergleichsweise einfach waren. Der Laser könnte zusätzlich dazu beigetragen haben, dass die Teilnehmenden ihre Antworten sicherer einschätzten.

5.1.1 Bearbeitungszeit

Hinsichtlich der Bearbeitungszeit lässt sich die Hypothese H1 bestätigen. Die Bearbeitungszeit war in den ersten beiden Aufgaben mit der Tilt Map Gruppe signifikant kürzer als mit der einzelnen Tilt Map. Die rangbiserialen Korrelationen deuten ebenfalls auf starke Effekte hin.

Einige Teilnehmende begründeten ihre Präferenz für die Tilt Map Gruppe zum Ablesen einzelner Werte. Sie nannten die visuelle Trennung der Variablen durch zwei Tilt Maps und eine bessere Übersichtlichkeit. Möglicherweise fiel es ihnen leichter, sich zunächst auf eine Tilt Map und anschließend auf die andere zu konzentrieren, anstatt innerhalb derselben Tilt Map zwischen Farbe und Höhe wechseln zu müssen. Durch die getrennten Tilt Maps konnten sie für beide eine ähnliche Strategie anwenden, um den höchsten Wert zu finden. Die geringe Erfahrung der Teilnehmenden mit Farbkodierungen auf Karten könnte dazu geführt haben, dass sie sich stärker an den Höhen als an den Farben orientierten. Mit der Tilt Map Gruppe konnten sie durch die doppelte Kodierung selbst entscheiden, ob sie die Farbe oder die Höhe nutzen. Mit der einzelnen Tilt Map waren sie dazu gezwungen, die Farbe zu interpretieren, obwohl sie damit wenig Erfahrung hatten. Dadurch könnte die kürzere Bearbeitungszeit mit der Tilt Map Gruppe zustande gekommen sein. Eine Folgestudie könnte untersuchen, ob sich die Teilnehmenden mit der Tilt Map Gruppe stärker an den Farben oder an den Höhen orientieren. Dabei könnten Personen mit unterschiedlich großer Erfahrung mit Farbkodierungen verglichen werden.

Zwischen den Bedingungen gibt es keinen signifikanten Unterschied bei der Nutzungsdauer des Lasers. Dennoch könnte die geringe Erfahrung mit Farbkodierungen dazu geführt haben, dass die Teilnehmenden bei der einzelnen Tilt Map häufiger den Laser zur Überprüfung der Werte verwendeten. Diese Vermutung ist schwer zu überprüfen, da die

Teilnehmenden den Laser oft eingeschaltet ließen, obwohl sie diesen nicht aktiv verwendeten. Deshalb ist die Nutzungsdauer des Lasers in dieser Studie weniger aussagekräftig.

Wie bereits in Abbildung 4.5 gezeigt, gab es bei Aufgabe 1 bei der Bearbeitungszeit mit der einzelnen Tilt Map 3 extreme Ausreißer und mit der Tilt Map Gruppe 2 weniger starke Ausreißer. Eine mögliche Erklärung ist, dass es sich um die erste Aufgabe mit der jeweiligen Bedingung handelte und die Teilnehmenden sich zunächst eine geeignete Strategie überlegen mussten. Die extremen Ausreißer bei der einzelnen Tilt Map können ebenfalls mit der geringen Erfahrung der Teilnehmenden mit Farbkodierungen zusammenhängen. Einzelne Personen benötigten möglicherweise mehr Zeit, um zu verstehen und zu verinnerlichen, welcher Farbbereich welche Werte repräsentiert. Bei Aufgabe 2 trat nur 1 Ausreißer bei der einzelnen Tilt Map auf.

5.2 Zusammenhangsaufgaben

Mit der Hypothese H2 untersuchte ich, ob es mit der einzelnen Tilt Map zu einer höheren Korrektheit und zu einer kürzeren Bearbeitungszeit bei den Zusammenhangsaufgaben kommt. Hinsichtlich der Korrektheit wird die Hypothese nicht bestätigt, da bei keiner der Zusammenhangsaufgaben (Aufgabe 3–5) ein signifikanter Unterschied besteht. Jedoch gab es bei jeder Aufgabe mehr korrekte Antworten mit der einzelnen Tilt Map als mit der Tilt Map Gruppe. Aufgrund der hohen Anzahl korrekter Antworten sollten die p-Werte vorsichtig interpretiert werden.

Bei Aufgabe 3 (positiver Zusammenhang) und Aufgabe 4 (negativer Zusammenhang) hatten die Teilnehmenden mit der einzelnen Tilt Map jeweils 16 korrekte Antworten. Mit der Tilt Map Gruppe waren es 15 korrekte Antworten bei Aufgabe 3 und 14 korrekte Antworten bei Aufgabe 4. Im Vergleich dazu gab es bei Aufgabe 5 (kein Zusammenhang) nur 14 korrekte Antworten mit der einzelnen Tilt Map und 11 korrekte Antworten mit der Tilt Map Gruppe. Hier war auch der Unterschied zwischen den Bedingungen am größten. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass es den Teilnehmenden leichter fiel, einen vorhandenen Zusammenhang zu erkennen, als einen nicht vorhandenen Zusammenhang zu identifizieren. Eine mögliche Erklärung für die geringere Korrektheit bei Aufgabe 5 ist, dass die Teilnehmenden nicht genügend Provinzen überprüft haben. Sie könnten nur Provinzen betrachtet haben, die zufällig einen Zusammenhang haben.

Die Unterschiede bei der Korrektheit können darauf zurückzuführen sein, dass die Tilt Map Gruppe die Variablen durch zwei Tilt Maps trennt. Dadurch waren die Teilnehmenden gezwungen, ihre Blickrichtung zu verändern, um Zusammenhänge zu erkennen. Sie mussten zum Vergleichen zwei unterschiedliche Positionen betrachten. Bei der einzelnen Tilt Map

konnten sie ihren Fokus auf eine Position richten. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass es möglich ist, mit der erweiterten Tilt Map Zusammenhänge zwischen verschiedenen Variablen zu erkennen. Dabei besteht eine Tendenz zugunsten der einzelnen Tilt Map. Da die Unterschiede nicht signifikant sind, gibt es keine eindeutige Überlegenheit.

Obwohl die Mehrheit der Teilnehmenden bei den abschließenden Fragen die Tilt Map Gruppe leichter zu interpretieren fand und als besser zum Erkennen von Zusammenhängen bewertete, gab es mit der einzelnen Tilt Map mehr korrekte Antworten. Dies zeigt, dass sich die subjektive Einschätzung einer Person von ihrer tatsächlichen Leistung unterscheiden kann. Bei einer teilnehmenden Person ist die falsche Einschätzung besonders ersichtlich. Sie beantwortete alle Zusammenhangsaufgaben mit der einzelnen Tilt Map korrekt und mit der Tilt Map Gruppe falsch. In den abschließenden Fragen präferierte sie die Tilt Map Gruppe in jedem Aspekt. Die Einschätzung kann auch mit ihrer geringen Vorerfahrung mit Farbkodierungen zusammenhängen.

Bei allen Zusammenhangsaufgaben waren sich die meisten Teilnehmenden bei ihren Antworten in beiden Bedingungen sicher bis sehr sicher. Dadurch wird ersichtlich, dass eine hohe Sicherheit nicht zwangsläufig mit einer korrekten Antwort einhergeht.

5.2.1 Bearbeitungszeit

Hinsichtlich der Bearbeitungszeit wird die Hypothese H2 nicht bestätigt, da es bei keiner Zusammenhangsaufgabe einen signifikanten Unterschied gibt. Bei den Aufgaben 3 und 5 hatten die Teilnehmenden mit der Tilt Map Gruppe eine kürzere Bearbeitungszeit und bei Aufgabe 4 mit der einzelnen Tilt Map. Auffällig ist bei Aufgabe 5 die große Streuung mit der einzelnen Tilt Map, die in der bereits gezeigten Abbildung 4.7 zu sehen ist. Diese ist mit der Tilt Map Gruppe deutlich geringer. Eine Studie mit einer größeren Anzahl an Aufgaben kann überprüfen, ob die große Streuung bei keinem Zusammenhang mit der einzelnen Tilt Map weiterhin besteht oder ob es sich um einen Zufall handelt.

In Bezug auf die Nutzung des Lasers gibt es bei keiner der drei Aufgaben einen signifikanten Unterschied zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe. Obwohl der Laser für die Aufgaben nicht benötigt wurde, verwendeten ihn viele Teilnehmende. Tendenziell wurde der Laser mit der Tilt Map Gruppe länger verwendet als mit der einzelnen Tilt Map. Möglicherweise nutzten die Teilnehmenden den Laser im Balkendiagramm, um die Höhen der Balken mithilfe der Hilfslinien zu vergleichen. Mit der einzelnen Tilt Map ist die Hilfslinie dafür weniger hilfreich, da die Variablen durch Farbe und Höhe getrennt sind. Dort könnten die Teilnehmenden den Laser verwendet haben, um die farbkodierten Werte abzulesen, wenn sie sich unsicher waren, ob der Wert einer Variable gestiegen oder gesunken ist. Die Nutzung des Lasers bei den Zusammenhangsaufgaben ist ein Indiz dafür, dass die

Teilnehmenden ihn als nützliches Werkzeug zur Untersuchung der Daten wahrgenommen haben.

5.3 Nutzungsdauer der Ansichten

Wie bereits in den Abbildungen 4.6 und 4.8 gezeigt, nutzten die Teilnehmenden bei allen fünf Aufgaben das Balkendiagramm am längsten. Dies könnte daran liegen, dass die meisten Teilnehmenden mittelmäßige bis hohe Vorerfahrung mit Balkendiagrammen hatten. Im Vergleich zu den anderen Ansichten war die Vorerfahrung mit dem Balkendiagramm am höchsten. Außerdem schrieben einige Teilnehmende in den abschließenden Fragen, dass das Balkendiagramm für sie die beste Ansicht war.

Auch bei den Zusammenhangsaufgaben nutzten die Teilnehmenden das Balkendiagramm am längsten, jedoch weniger als bei den ersten beiden Aufgaben. Dort verwendeten sie häufiger auch die Prism Map und die Prism Map mit Balken, um Zusammenhänge zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass die Teilnehmenden unterschiedliche Strategien verwendeten und ihre Untersuchung nicht nur auf das Balkendiagramm beschränkten. Möglicherweise würden die Teilnehmenden das Balkendiagramm seltener verwenden, wenn sie beispielsweise den Ausbruchsort einer Krankheit bestimmen müssten.

Bei allen Zusammenhangsaufgaben nutzten die Teilnehmenden das Balkendiagramm mit der einzelnen Tilt Map weniger als mit der Tilt Map Gruppe. Möglicherweise lag dies an der unterschiedlichen Darstellung der Variablen. Mit der Tilt Map Gruppe konnten die Teilnehmenden die Höhen der Balken direkt miteinander vergleichen. Die Hilfslinien des Lasers im Balkendiagramm könnten dies zusätzlich begünstigt haben. Bei der einzelnen Tilt Map war dies nicht möglich, da die Variablen durch Farbe und Höhe getrennt wurden. Da die Unterschiede nicht signifikant sind, lässt sich daraus lediglich eine mögliche Tendenz ableiten.

Einen signifikanten Unterschied zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe gibt es bei Aufgabe 2 beim Übergang von der Choroplethenkarte zur Prism Map. Der Median beträgt jedoch mit der einzelnen Tilt Map nur 0,56 % und mit der Tilt Map Gruppe 0,12 %, weshalb es keine sinnvolle Schlussfolgerung gibt. Außerdem ist der Unterschied bei Aufgabe 5 bei der Nutzung der Choroplethenkarte signifikant. Mit der Tilt Map Gruppe wurde die Choroplethenkarte für einen größeren Anteil der Bearbeitungszeit verwendet. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass mit der einzelnen Tilt Map in der Choroplethenkarte nur eine Variable anhand der Farbe untersucht werden kann.

5.4 Bewegungsdaten

Aufgrund der zwei getrennten Tilt Maps in der Tilt Map Gruppe könnte vermutet werden, dass sich die Teilnehmenden mit dieser mehr bewegten als mit der einzelnen Tilt Map. Bei der zurückgelegten Strecke pro Minute zeigt sich jedoch kein signifikanter Unterschied. Während der Studie beobachtete ich, dass sich die Teilnehmenden insgesamt wenig bewegten. Einige Teilnehmende gingen einen Schritt, um das Balkendiagramm vollständig im Sichtfeld zu haben. Keine Person lief um die Tilt Map herum, um sie von einer anderen Seite zu betrachten. Stattdessen arbeiteten die Teilnehmenden überwiegend stationär und bewegten und rotierten die Tilt Map.

Nur bei Aufgabe 1 gibt es einen signifikanten Unterschied bei der Rotation pro Minute. Der Median ist mit der Tilt Map Gruppe höher als mit der einzelnen Tilt Map. Da sich ein solcher Unterschied bei den anderen Aufgaben nicht zeigt, lässt sich daraus keine allgemeine Tendenz ableiten. Bei den Aufgaben 3 und 5 ist der Median beispielsweise mit der einzelnen Tilt Map höher.

5.5 NASA-TLX

Die wahrgenommene Arbeitsbelastung zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe unterscheidet sich in keiner Dimension signifikant. Wie bereits in Abbildung 4.9 gezeigt, wurden die geistige Anforderung und die Anstrengung in beiden Bedingungen vergleichsweise hoch bewertet. Dies deutet darauf hin, dass die Teilnehmenden sich für die Bearbeitung der Aufgaben stark konzentrieren und viel nachdenken mussten. Ein NASA-TLX nach jeder Aufgabe hätte eine genauere Zuordnung der wahrgenommenen Belastung zu den einzelnen Aufgaben ermöglicht. Dadurch könnte untersucht werden, ob bestimmte Aufgaben als belastender wahrgenommen werden.

5.6 Forschungsfragen

Im Folgenden beantworte ich die Forschungsfragen.

FF1: Wie kann die Tilt Map erweitert werden, um die explorative Analyse multivariater raum-zeitlicher und hierarchischer Geodaten zu unterstützen?

Die ursprüngliche Tilt Map kann um die Darstellung mehrerer Variablen, einen Zeitregler, zusätzliche Interaktionsmöglichkeiten und Werkzeuge für die explorative Analyse multivariater raum-zeitlicher und hierarchischer Geodaten erweitert werden. Die einzelne Tilt Map stellt zwei Variablen gleichzeitig durch die Farbe und die Höhe dar. Die Tilt Map Gruppe kann mehrere Variablen mithilfe mehrerer Tilt Maps darstellen. Diese können gemeinsam bedient werden. In Kombination mit dem Zeitregler lassen sich zeitliche Veränderungen untersuchen und Zusammenhänge erkennen. Der Laser unterstützt das Ablesen und Vergleichen einzelner Werte. Außerdem ermöglicht er, in jedem Balkendiagramm eine Hilfslinie einzublenden. Dadurch können die Balkenhöhen verschiedener Zeitpunkte miteinander verglichen werden. Darüber hinaus ermöglicht die Drilldown-Funktion des Lasers, die Daten in einer tieferen Ebene zu untersuchen. Über die Benutzeroberfläche kann die nutzende Person Tilt Maps und Gruppen erstellen und deren Eigenschaften anpassen. Außerdem kann sie die Daten bzw. Variablen beliebig konfigurieren und dadurch gezielt unterschiedliche Fragestellungen untersuchen.

FF2: Wie unterscheiden sich die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe hinsichtlich der Korrektheit und Bearbeitungszeit bei Analyseaufgaben?

Bei den Aufgaben zur Identifikation von Maximalwerten beantworteten alle Teilnehmenden die Aufgaben mit der einzelnen Tilt Map und mit der Tilt Map Gruppe korrekt. Die Bearbeitungszeit ist mit der Tilt Map Gruppe signifikant kürzer. Bei den Zusammenhangsaufgaben unterscheidet sich die Korrektheit zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe nicht signifikant. Es zeigt sich lediglich eine Tendenz zugunsten der einzelnen Tilt Map, da es mit dieser bei jeder Aufgabe mehr korrekte Antworten gab. Bei der Bearbeitungszeit der Zusammenhangsaufgaben ist der Unterschied nicht signifikant und es ist keine Tendenz zu erkennen.

FF3: Wie sicher sind sich die Teilnehmenden bei der Beantwortung von Analyseaufgaben mit der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe?

Die Teilnehmenden waren sich bei der Identifikation von Maximalwerten und bei den Zusammenhangsaufgaben mit der einzelnen Tilt Map und mit der Tilt Map Gruppe überwiegend sicher bis sehr sicher. Signifikante Unterschiede gibt es nicht. Bei den Zusammenhangsaufgaben zeigt sich, dass eine hohe Sicherheit nicht immer im Zusammenhang mit einer korrekten Antwort steht.

FF4: Wie unterscheiden sich die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe hinsichtlich der Nutzung der Ansichten bei Analyseaufgaben?

Die Nutzung der Ansichten unterscheidet sich insgesamt wenig zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe. Bei der Identifikation von Maximalwerten und bei den Zusammenhangsaufgaben nutzten die Teilnehmenden die meiste Zeit das Balkendiagramm. Tendenziell war der Anteil des Balkendiagramms mit der Tilt Map Gruppe höher. Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant. Einen signifikanten Unterschied gibt es bei Aufgabe 2 beim Übergang von der Choroplethenkarte zur Prism Map. Mit der einzelnen Tilt Map war der Anteil an der Bearbeitungszeit höher. Bei Aufgabe 5 ist der Unterschied ebenfalls signifikant. Dort war der Anteil der Choroplethenkarte mit der Tilt Map Gruppe höher als mit der einzelnen Tilt Map.

FF5: Wie werden die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe von den Teilnehmenden subjektiv bewertet?

Insgesamt bevorzugte die Mehrheit der Teilnehmenden die Tilt Map Gruppe. Auch bei dem Ablesen von Werten, dem Erkennen von Zusammenhängen, der visuellen Struktur und der Interpretation bevorzugten sie die Tilt Map Gruppe. Der NASA-TLX zeigt, dass die wahrgenommene Arbeitsbelastung in allen Dimensionen bei der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe ähnlich war.

Kapitel 6

Limitierungen und Ausblick

In diesem Kapitel zeige ich die Limitierungen der Studie auf. Daraufhin schlage ich Ansätze für künftige Studien mit der erweiterten Tilt Map vor. Zum Schluss empfehle ich sinnvolle Erweiterungen für die erweiterte Tilt Map.

6.1 Limitierungen

Die Stichprobe der Studie ist mit 17 Teilnehmenden klein. Ein großer Teil der Teilnehmenden war männlich und zwischen 25 und 34 Jahre alt. Die Ergebnisse lassen sich daher nur eingeschränkt auf andere Personengruppen übertragen. Die Vorerfahrungen könnten die Ergebnisse ebenfalls beeinflusst haben. Die meisten Teilnehmenden hatten eine mittelmäßige bis hohe Erfahrung mit Balkendiagrammen, aber nur wenig Erfahrung mit Farbkodierungen. Möglicherweise konzentrierten sie sich deshalb stärker auf die Höhen und das Balkendiagramm. Auch die Studiendauer von etwa 45 Minuten kann die Leistung einiger Personen beeinflusst haben. Aufgrund der Studiendauer wurden nicht alle Aufgabentypen untersucht. Beispielsweise fehlen Aufgaben, bei denen der Ausgangspunkt der Ausbreitung einer Krankheit bestimmt werden soll. Viele Teilnehmende beantworteten die Aufgaben mit der einzelnen Tilt Map und mit der Tilt Map Gruppe korrekt und gaben eine ähnliche Sicherheit an. Dadurch basieren die statistischen Tests teilweise auf wenigen unterschiedlichen Messpaaren. Eventuell waren die Aufgaben zu einfach. Bei den Zusammenhangsaufgaben wurde den Teilnehmenden mitgeteilt, dass eine Antwortmöglichkeit mehrfach korrekt sein kann. Dennoch könnten einige Teilnehmende vermutet haben, dass jede Antwortmöglichkeit genau einmal korrekt ist.

Die verwendeten Datensätze der Studie hatte ich so erstellt, dass die Aufgaben möglichst ähnlich schwierig sind. Trotzdem könnten einige Personen die Datensätze als unterschiedlich schwierig empfunden haben. Genauso lassen sich Effekte durch die Reihenfolge der Auf-

gaben und durch die verwendeten Datensätze nicht komplett mit einer Gegenbalancierung ausschließen. Hinzu kommt, dass es für die Zusammenhangsaufgaben sechs mögliche Reihenfolgen gab. Deshalb konnten die Reihenfolgen nicht gleichmäßig auf die 17 Teilnehmenden verteilt werden.

Viele Teilnehmende ließen den Laser eingeschaltet, obwohl sie ihn nicht aktiv verwendeten. Daher sind die Daten zur Nutzungsdauer des Lasers eingeschränkt aussagekräftig. Um die Dauer der Studie zu reduzieren, wurde der NASA-TLX einmal nach allen Aufgaben mit der einzelnen Tilt Map und einmal nach allen Aufgaben mit der Tilt Map Gruppe erhoben. Dadurch kann die wahrgenommene Arbeitsbelastung nicht den einzelnen Aufgaben zugeordnet werden. Außerdem wurde die Funktionalität der erweiterten Tilt Map auf die notwendigsten Funktionen beschränkt. Es war z. B. die Drilldown-Funktion des Lasers deaktiviert und das Erstellen und Konfigurieren von Tilt Maps war kein Bestandteil der Aufgaben. Deshalb wurden nicht alle Funktionen der erweiterten Tilt Map untersucht.

6.2 Ausblick

In weiteren Studien kann die erweiterte Tilt Map mit einer breiteren Personengruppe getestet werden. Vor allem sollten auch Personen teilnehmen, die viel Erfahrung mit Farbkodierungen, Choroplethenkarten, Prism Maps und Balkendiagrammen haben. Dadurch kann geprüft werden, inwiefern sich die Vorerfahrungen auf die Ergebnisse auswirken.

Außerdem können sich Studien über mehrere Sitzungen erstrecken. In der ersten Sitzung lernen die Teilnehmenden das Prinzip und den Umgang mit der Tilt Map. In einer zweiten Sitzung bearbeiten sie Zusammenhangsaufgaben und in den folgenden Sitzungen weitere Aufgabentypen. Dadurch können mehr Aufgaben und Aufgabentypen mit unterschiedlichen Schwierigkeiten bearbeitet werden, ohne dass eine einzelne Sitzung zu lange dauert. So lassen sich Unterschiede bei der Korrektheit zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe zuverlässiger erkennen. Der NASA-TLX kann nach jeder Aufgabe erhoben werden, damit die wahrgenommene Arbeitsbelastung den einzelnen Aufgaben zugeordnet wird.

Der Laser muss genauer untersucht werden, indem die Teilnehmenden vergleichbare Aufgaben mit und ohne Laser bearbeiten. Zusätzlich sollten sie darum gebeten werden, den Laser zu deaktivieren, wenn sie ihn nicht verwenden. Dadurch kann festgestellt werden, ob die Nutzung des Lasers zu besseren Ergebnissen führt.

Die für die Studie deaktivierten Funktionen müssen ebenfalls untersucht werden. Dazu gehören die Drilldown-Funktion sowie das Erstellen und Konfigurieren von Tilt Maps und

Tilt Map Gruppen. Auch zukünftige Erweiterungen sollten getestet werden, um ihren Einfluss auf die Nutzung und die Analyseleistung zu bestimmen.

Aktuell ist es möglich, beliebig viele einzelne Tilt Maps in einer Tilt Map Gruppe zu verwenden. Dabei können Farbe und Höhe jeweils unterschiedliche Variablen darstellen. In einer weiteren Studie kann untersucht werden, ob sich Zusammenhänge erkennen lassen, wenn eine Tilt Map Gruppe aus mehreren Tilt Maps besteht, die jeweils zwei Variablen durch Farbe und Höhe darstellen. Dabei sollte geprüft werden, ab welcher Anzahl an Variablen die Darstellung für die Teilnehmenden zu komplex wird und die Anzahl falscher Antworten steigt. Darüber hinaus kann verglichen werden, ob zwei Tilt Maps, bei denen Farbe und Höhe jeweils unterschiedliche Variablen darstellen, besser geeignet sind als vier Tilt Maps, bei denen Farbe und Höhe jeweils dieselbe Variable darstellen.

6.2.1 Künftige Erweiterungen

In Zukunft sollen die bisherigen Funktionen erweitert werden. Mit dem Laser soll in der Prism Map und in der Prism Map mit Balken eine Hilfsebene eingeblendet werden, die den Vergleich der Höhen der Provinzen erleichtert. Sie soll ähnlich wie die Hilfslinie im Balkendiagramm funktionieren. Des Weiteren müssen mehrere Provinzen gleichzeitig markiert werden können, um ihre Werte gemeinsam abzulesen.

Die Balken im Balkendiagramm lassen sich aktuell nur über die Benutzeroberfläche nach ihrer Höhe sortieren. Zwei virtuelle Knöpfe unter dem Balkendiagramm sollen eine Sortierung nach der Höhe und der Farbe ermöglichen. Darüber hinaus soll ein frei konfigurierbares Radialmenü implementiert werden, in dem sich häufig verwendete Funktionen ablegen lassen. Eine Sprachsteuerung kann implementiert werden, um den Nutzenden eine natürlichere Interaktion mit den Daten zu ermöglichen. Sie könnten z. B. per Sprachbefehl die Balken sortieren, den Datensatz oder den Zeitpunkt verändern. Außerdem kann die Vibration der Controller einen weiteren Sinneskanal ansprechen. So könnten die Controller eine Rückmeldung geben, wenn eine Aktion erfolgreich durchgeführt wurde. Ebenfalls könnten sie in einem stark pulsierenden Rhythmus vibrieren, wenn die nutzende Person mit dem Laser auf eine Provinz mit einem sehr hohen Wert zeigt.

Für die zeitliche Untersuchung wäre eine Abspielfunktion sinnvoll. Die nutzende Person kann einen Anfangs- und Endzeitpunkt festlegen und den Verlauf der Tilt Map wie ein Video abspielen. Dabei soll sich die Geschwindigkeit anpassen lassen und die Wiedergabe pausiert werden können. Der Zeitregler kann ähnlich wie in der vorgestellten Arbeit von Cheymol et al. (Cheymol et al., 2022) überarbeitet werden. Statt den Zeitraum über zwei virtuelle Knöpfe zu verschieben, kann die nutzende Person den Zeitregler biegen, um den dargestellten Zeitraum zu vergrößern oder zu verkleinern.

Datenpanels können implementiert werden, die sich wie Tilt Maps greifen und im Raum platzieren lassen. Auf einem Datenpanel sollen weitere Diagramme und Informationen angezeigt werden. Ein Liniendiagramm kann den zeitlichen Verlauf ausgewählter Provinzen zeigen, wodurch zeitliche Zusammenhänge leichter erkannt werden könnten. Die Auswahl trifft die nutzende Person über das Markieren und Festsetzen mit dem Laser. Genauso kann ein Balkendiagramm dargestellt werden, das nur markierte Provinzen anzeigt. Ein Boxplot veranschaulicht die Verteilung der Daten. Wenn eine Provinz markiert wird, wird der zugehörige Datenpunkt im Boxplot eingeblendet. Zusätzlich soll es möglich sein, die Provinzen mit eigenen Anmerkungen zu versehen, die beim Markieren auf dem Datenpanel angezeigt werden.

Weitere Variablen können durch Partikel oder Eigenschaften der Materialien dargestellt werden. Winddaten können durch Partikel visualisiert werden, deren Richtung und Geschwindigkeit die Windrichtung und Windstärke repräsentieren. Die Dichte von Punkten auf der Oberfläche einer Provinz kann den Wert einer weiteren Variable darstellen. Auch die Rauheit der Oberfläche kann dafür verwendet werden. Dabei muss geprüft werden, welche dieser Eigenschaften zuverlässig erkannt werden können.

Um Provinzen nach bestimmten Kriterien filtern zu können, muss eine Filterfunktion eingebaut werden. Es könnten nur Provinzen angezeigt werden, deren Werte sich innerhalb eines bestimmten Bereichs befinden oder die zu einer bestimmten Region gehören. Damit die Zugehörigkeit der Provinzen auch im Balkendiagramm nachvollzogen werden kann, sollten die Balken abhängig von ihrer Region farblich unterschiedliche Umrisse haben.

Die Tilt Map ist aufgrund fehlender 3D-Modelle auf Thailand, die Provinzen und die Distrikte beschränkt. Deshalb müssen 3D-Modelle der Unterbezirke und Dörfer von Thailand erstellt werden, damit die Daten mit der Drilldown-Funktion in einer noch tieferen Ebene untersucht werden können. Zudem können 3D-Modelle anderer Länder erstellt und hinzugefügt werden.

Zusätzliche Funktionen können entwickelt werden, mit denen sich neue Daten generieren lassen. Ein Algorithmus könnte auf Grundlage vorhandener Datensätze zukünftige Werte erzeugen. Datensätze mit einer täglichen Auflösung könnten automatisch zu wöchentlichen oder monatlichen Werten zusammengefasst werden.

Für längere Analysen fehlen Funktionen zum Speichern und Laden des aktuellen Zustands der Tilt Maps. Dies ermöglicht es, die Analyse in einer späteren Sitzung fortzusetzen. Screenshots und Videoaufnahmen können wichtige Ergebnisse festhalten und eine Präsentation außerhalb der Anwendung ermöglichen. Die erweiterte Tilt Map kann um einen Multiplayer-Modus erweitert werden. Dadurch können mehrere Personen ortsunabhängig gemeinsam Daten untersuchen und besprechen.

Kapitel 7

Fazit

Die ursprüngliche Tilt Map (Yang et al., 2021) stellt eine Variable zu einem bestimmten Zeitpunkt dar und ist damit in ihrem Nutzen stark eingeschränkt. In dieser Arbeit entwickelte ich die erweiterte Tilt Map zur explorativen Analyse multivariater raum-zeitlicher und hierarchischer Geodaten. Dazu implementierte ich zwei Varianten, mit denen sich mehrere Variablen gleichzeitig darstellen lassen. Bei der einzelnen Tilt Map kodieren die Farbe und die Höhe jeweils eine Variable. Die Tilt Map Gruppe besteht aus mehreren Tilt Maps, die gemeinsam bedient werden können. Dabei kodiert jede Tilt Map eine Variable. Mithilfe der Benutzeroberfläche können Nutzende die Eigenschaften der Tilt Maps und Gruppen konfigurieren. Außerdem können sie selbst entscheiden, welche Daten und welches Gebiet sie untersuchen. Der Zeitregler ermöglicht es, die Daten zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu betrachten. Der Laser unterstützt das Ablesen und Vergleichen einzelner Werte. Darüber hinaus bietet er eine Drilldown-Funktion, mit der sich die Daten in einer tieferen Ebene untersuchen lassen.

Um die einzelne Tilt Map mit der Tilt Map Gruppe zu vergleichen, führte ich eine Nutzerstudie mit 17 Teilnehmenden durch. In dieser sollten sie Maximalwerte identifizieren und Zusammenhänge zwischen zwei Variablen erkennen. Bei der Identifikation von Maximalwerten beantworteten alle Teilnehmenden die Aufgaben mit beiden Varianten korrekt. Mit der Tilt Map Gruppe benötigten sie allerdings signifikant weniger Zeit. Bei den Zusammenhangsaufgaben zeigen sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Korrektheit und der Bearbeitungszeit. Dennoch wurden alle drei Aufgaben mit der einzelnen Tilt Map häufiger korrekt beantwortet als mit der Tilt Map Gruppe. Dies deutet auf eine Tendenz zugunsten der einzelnen Tilt Map bei der Erkennung von Zusammenhängen hin. Die Teilnehmenden waren sich bei der Beantwortung der Aufgaben mit beiden Varianten ähnlich sicher. Bei den Zusammenhangsaufgaben zeigte sich jedoch, dass eine hohe Sicherheit nicht immer mit einer korrekten Antwort einhergeht. Die Nutzung der Ansichten unterschied sich nur wenig zwi-

schen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe. Bei allen Aufgaben verbrachten die Teilnehmenden den größten Anteil der Bearbeitungszeit im Balkendiagramm. Hinsichtlich der wahrgenommenen Arbeitsbelastung gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten.

Obwohl es bei den Zusammenhangsaufgaben mehr korrekte Antworten mit der einzelnen Tilt Map gab, bevorzugte die Mehrheit die Tilt Map Gruppe in allen Aspekten. Zu diesen Aspekten gehören das Ablesen von Werten, das Erkennen von Zusammenhängen, die visuelle Struktur und die Interpretation. Dies zeigt, dass die subjektive Präferenz nicht immer mit der Leistung übereinstimmt.

Die Ergebnisse sprechen dafür, dass die Varianten unterschiedliche Stärken haben. Die Tilt Map Gruppe ermöglicht eine schnellere Identifikation von Maximalwerten. Die einzelne Tilt Map scheint tendenziell besser zu sein, um Zusammenhänge zu erkennen. Die Auswahl der Variante sollte daher abhängig von der Analyseaufgabe getroffen werden.

Aufgrund der kleinen und eingeschränkten Stichprobe sollten die Ergebnisse vorsichtig betrachtet werden. Weitere Studien sollten die erweiterte Tilt Map mit einer größeren und vielfältigeren Stichprobe untersuchen. Vor allem werden Personen benötigt, die Erfahrungen mit Farbkodierungen, Choroplethenkarten, Prism Maps und Balkendiagrammen haben. Außerdem sollten zusätzliche Aufgabentypen und die für die Studie deaktivierten Funktionen wie der Drilldown untersucht werden.

Literaturverzeichnis

Abbas, J. R., O'Connor, A., Ganapathy, E., Isba, R., Payton, A., McGrath, B., Tolley, N., und Bruce, I. A. (2023). What is Virtual Reality? A healthcare-focused systematic review of definitions. *Health Policy and Technology*, 12(2):100741.

Bennett, R., Zielinski, D. J., und Kopper, R. (2014). Comparison of interactive environments for the archaeological exploration of 3D landscape data. In *2014 IEEE VIS International Workshop on 3DVis (3DVis)*, Seiten 67–71.

Cheymol, A., Fouché, G., Gramoli, L., Hirao, Y., Hummel, E., Mavromatis, M., Moullec, Y., Argelaguet, F., und Nouviale, F. (2022). The Rubber Slider Metaphor: Visualisation of Temporal and Geolocated Data. In *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, Seiten 904–905.

Cleveland, W. S. und McGill, R. (1984). Graphical Perception: Theory, Experimentation, and Application to the Development of Graphical Methods. *Journal of the American Statistical Association*, 79(387):531–554.

Cordeil, M., Cunningham, A., Bach, B., Hurter, C., Thomas, B. H., Marriott, K., und Dwyer, T. (2019). IATK: An Immersive Analytics Toolkit. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, Seiten 200–209. IEEE.

Cordeil, M., Cunningham, A., Dwyer, T., Thomas, B. H., und Marriott, K. (2017). ImAxes: Immersive Axes as Embodied Affordances for Interactive Multivariate Data Visualisation. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, Seite 71–83, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

Dwyer, T., Marriott, K., Isenberg, T., Klein, K., Riche, N., Schreiber, F., Stuerzlinger, W., und Thomas, B. H. (2018). *Immersive Analytics: An Introduction*, Seiten 1–23. Springer International Publishing, Cham.

Epic Games (2026). Instanced Static Mesh Component. https://dev.epicgames.com/documentation/unreal-engine/instanced-static-mesh-component-in-unreal-engine. abgerufen am 15. Juli 2026.

Filho, J. A. W., Stuerzlinger, W., und Nedel, L. (2020). Evaluating an Immersive Space-Time Cube Geovisualization for Intuitive Trajectory Data Exploration. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(1):514–524.

Gigante, M. A. (1993). 1 - Virtual Reality: Definitions, History and Applications. In Earnshaw, R., Gigante, M., und Jones, H., Herausgeber, *Virtual Reality Systems*, Seiten 3–14. Academic Press, Boston.

Hart, S. G. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, Band 50, Seiten 904–908. Sage publications Sage CA: Los Angeles, CA.

Hart, S. G. und Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In Hancock, P. A. und Meshkati, N., Herausgeber, *Human Mental Workload*, Band 52 in *Advances in Psychology*, Seiten 139–183. North-Holland.

Hayatpur, D., Xia, H., und Wigdor, D. (2020). DataHop: Spatial Data Exploration in Virtual Reality. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, Seite 818–828, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

Hurter, C., Riche, N. H., Drucker, S. M., Cordeil, M., Alligier, R., und Vuillemot, R. (2019). FiberClay: Sculpting Three Dimensional Trajectories to Reveal Structural Insights. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 25(1):704–714.

Klein, K., Sedlmair, M., und Schreiber, F. (2022). Immersive analytics: An overview. *it - Information Technology*, 64(4-5):155–168.

Kraus, M., Angerbauer, K., Buchmüller, J., Schweitzer, D., Keim, D. A., Sedlmair, M., und Fuchs, J. (2020a). Assessing 2D and 3D Heatmaps for Comparative Analysis: An Empirical Study. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, Seite 1–14, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

Kraus, M., Klein, K., Fuchs, J., Keim, D. A., Schreiber, F., und Sedlmair, M. (2021). The Value of Immersive Visualization. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 41(4):125–132.

Kraus, M., Weiler, N., Oelke, D., Kehrer, J., Keim, D. A., und Fuchs, J. (2020b). The Impact of Immersion on Cluster Identification Tasks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(1):525–535.

Lakes, T. (2009). Geodata. RatSWD Working Paper 89, Berlin.

Lee, B., Hu, X., Cordeil, M., Prouzeau, A., Jenny, B., und Dwyer, T. (2021). Shared Surfaces and Spaces: Collaborative Data Visualisation in a Co-located Immersive Environment. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(2):1171–1181.

Luong, T., Cheng, Y. F., Möbus, M., Fender, A., und Holz, C. (2023). Controllers or Bare Hands? A Controlled Evaluation of Input Techniques on Interaction Performance and Exertion in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(11):4633–4643.

Milgram, P. und Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12):1321–1329.

Montano-Murillo, R. A., Nguyen, C., Kazi, R. H., Subramanian, S., DiVerdi, S., und Martinez-Plasencia, D. (2020). Slicing-Volume: Hybrid 3D/2D Multi-target Selection Technique for Dense Virtual Environments. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, Seiten 53–62.

Murray, J. H. (1997). *Hamlet on the holodeck: The future of narrative in cyberspace*. The Free Press, New York.

NTSC (2018). Trash Cans. https://sketchfab.com/3d-models/trash-cans-d4bb72c7650f44769370f3e9af00dad1. abgerufen am 1. Juli 2026.

Prachyabrued, M., Haddawy, P., Tengputtipong, K., Yin, M. S., Bicout, D., und Laosiritaworn, Y. (2020). Immersive Visualization of Dengue Vector Breeding Sites Extracted from Street View Images. In *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*, Seiten 37–42.

Prouzeau, A., Cordeil, M., Robin, C., Ens, B., Thomas, B. H., und Dwyer, T. (2019). Scaptics and Highlight-Planes: Immersive Interaction Techniques for Finding Occluded Features in 3D Scatterplots. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, Seite 1–12, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

Quach, Q. und Jenny, B. (2020). Immersive visualization with bar graphics. *Cartography and Geographic Information Science*, 47(6):471–480.

Sadiku, M., Shadare, A. E., Musa, S. M., Akujuobi, C. M., und Perry, R. (2016). Data visualization. *International Journal of Engineering Research And Advanced Technology (IJERAT)*, 2(12):11–16.

Shekhar, S., Jiang, Z., Ali, R. Y., Eftelioglu, E., Tang, X., Gunturi, V. M. V., und Zhou, X. (2015). Spatiotemporal Data Mining: A Computational Perspective. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4):2306–2338.

Sherman, W. R. und Craig, A. B. (2018). *Understanding virtual reality: Interface, application, and design*. Morgan Kaufmann, 2. Auflage.

Shibata, T. (2002). Head mounted display. *Displays*, 23(1):57–64.

Slater, M. (2003). A note on presence terminology. *Presence connect*, 3(3):1–5.

Slater, M. und Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, 6(6):603–616.

Statista (2025). Volumen der jährlich generierten/replizierten digitalen Datenmenge weltweit von 2010 bis 2024 und Prognose für 2029 (in Zettabyte). https://de.statista.com/statistik/daten/studie/267974/umfrage/prognose-zum-weltweit-generierten-datenvolumen/. abgerufen am 5. Juli 2026.

Vögtle, F., Haddawy, P., Yin, M. S., Barkowsky, T., Bicout, D., Prachyabrued, M., und Lawpoolsri, S. (2022). A Collaborative Platform Supporting Distributed Teams in Visualization and Analysis of Infectious Disease Data. In *2022 IEEE 10th International Conference on Healthcare Informatics (ICHI)*, Seiten 226–232.

Yang, Y., Dwyer, T., Jenny, B., Marriott, K., Cordeil, M., und Chen, H. (2019). Origin-Destination Flow Maps in Immersive Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 25(1):693–703.

Yang, Y., Dwyer, T., Marriott, K., Jenny, B., und Goodwin, S. (2021). Tilt Map: Interactive Transitions Between Choropleth Map, Prism Map and Bar Chart in Immersive Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(12):4507–4519.

Yoh, M.-S. (2001). The reality of virtual reality. In *Proceedings Seventh International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, Seiten 666–674.

Zhang, Y., Ens, B., Satriadi, K. A., Prouzeau, A., und Goodwin, S. (2022). TimeTables: Embodied Exploration of Immersive Spatio-Temporal Data. In *2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, Seiten 599–605.

Zhang, Y., Wang, Z., Zhang, J., Shan, G., und Tian, D. (2023). A survey of immersive visualization: Focus on perception and interaction. *Visual Informatics*, 7(4):22–35.

Digitaler Anhang

Hinweis: Die Videos im digitalen Anhang entsprechen nicht der exakten visuellen Darstellung im HMD. Da die Aufnahmen auf einem 2D-Monitor-Mirroring basieren, wird nur eine einäugige, unkorrigierte Perspektive wiedergegeben. Dies führt dazu, dass z. B. die Farblegende in der Aufnahme perspektivisch verzerrt wirkt oder teilweise durch 3D-Objekte verdeckt wird. Im HMD wird die Farblegende hingegen mittels eines Stereo-Layers umgesetzt, der über das Bild gerendert wird. Zudem wurden die Aufnahmen mit 30 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet, während die Anwendung im HMD mit 120 Bildern pro Sekunde läuft.

DA1: Video zur animierten Lösung vom sprunghaften Wechsel, wenn die Tilt Map von der anderen Seite gegriffen wird.
Pfad: `Videos/SprunghafterAnimierterWechsel.mp4`

DA2: Video zu den Ansichten der Tilt Map.
Pfad: `Videos/AnsichtenTiltMap.mp4`

DA3: Video zu den Ansichten der Tilt Map Gruppe.
Pfad: `Videos/AnsichtenTiltMapGruppe.mp4`

DA4: Video zur Fortbewegung in der virtuellen Umgebung.
Pfad: `Videos/Fortbewegung.mp4`

DA5: Video zum Löschen einer Tilt Map.
Pfad: `Videos/TiltMapLoeschen.mp4`

DA6: Video zum Hinzufügen einer Tilt Map zu einer Gruppe und das Entfernen einer Tilt Map aus einer Gruppe.
Pfad: `Videos/TiltMapHinzufuegenEntfernen.mp4`

DA7: Video zum Zeitregler.
Pfad: `Videos/Zeitregler.mp4`

DA8: Video zum Laser.
Pfad: `Videos/Laser.mp4`

DA9: Video zur Drilldown-Funktion.
Pfad: `Videos/DrillDown.mp4`

DA10: Video zur Interaktion mit der Benutzeroberflaeche.
Pfad: `Videos/Benutzeroberflaeche.mp4`

DA11: Datensätze, mit denen die Studie durchgeführt wurde.
Pfad: `Studie/Datensaetze`

DA12: Skripte mit denen die Datensätze für die Studie erstellt wurden.
Pfad: `Studie/Datensaetze/Scripts`

DA13: Erhobene Daten der Studie.
Pfad: `Studie/Daten`

DA14: Unreal Engine Projekt der erweiterten Tilt Map.
Pfad: `EnhancedTiltMap/EnhancedTiltMapProject`

DA15: Packaged Unreal Engine Projekt der erweiterten Tilt Map.
Pfad: `EnhancedTiltMap/EnhancedTiltMapApp`

Anhang A

Fragen der Studie und zusätzliche Ergebnisse

Dieses Kapitel beinhaltet die Fragen der Studie. Dazu gehören demografische Fragen, Fragen zur Vorerfahrung, Fragen zur Gesundheit, Fragen des NASA-TLX und die Abschlussfragen. Außerdem beinhaltet das Kapitel weitere Ergebnisse der Studie als Tabellen.

Tabelle A.1 Demografische Fragen der Studie.

Frage	**Antwortmöglichkeiten**
Welchem Geschlecht ordnen Sie sich zu?	Weiblich Männlich Divers / nicht-binär Keine Angabe
In welcher Altersgruppe befinden Sie sich?	18–24 Jahre 25–34 Jahre 35–44 Jahre 45–54 Jahre 55 Jahre oder älter Keine Angabe
Was ist Ihr höchster abgeschlossener Bildungsabschluss?	Kein Schulabschluss Schulabschluss Berufsausbildung Bachelorabschluss Masterabschluss Doktorabschluss Anderer Abschluss (mit Freitextfeld) Keine Angabe
In welchem Berufsfeld oder Studienfach sind Sie tätig?	Freitextfeld Checkbox: Keine Angabe

Tabelle A.2 Fragen zur Vorerfahrung.

Frage	**Antwortmöglichkeiten**
Wie viel Erfahrung haben Sie mit Virtual Reality?	Likert-Skala: 0 (Keine Erfahrung) – 4 (Sehr viel Erfahrung)
Wie viel Erfahrung haben Sie mit der Navigation und Auswahl über Controller, z. B. in VR-Anwendungen, Videospielen oder 3D-Anwendungen?	Likert-Skala: 0 (Keine Erfahrung) – 4 (Sehr viel Erfahrung)
Wie viel Erfahrung haben Sie mit Datenvisualisierungen, z. B. Diagrammen oder interaktiven Visualisierungen?	Likert-Skala: 0 (Keine Erfahrung) – 4 (Sehr viel Erfahrung)
Wie viel Erfahrung haben Sie mit geografischen Datenvisualisierungen (Geovisualisierungen)?	Likert-Skala: 0 (Keine Erfahrung) – 4 (Sehr viel Erfahrung)
Wie viel Erfahrung haben Sie mit der Interpretation von Farbkodierungen auf Karten, z. B. bei Wetterkarten oder Choroplethenkarten (Choropleth Maps)?	Likert-Skala: 0 (Keine Erfahrung) – 4 (Sehr viel Erfahrung)
Wie viel Erfahrung haben Sie mit der Interpretation von Höhen auf 3D-Karten, z. B. bei Prismenkarten (Prism Maps)?	Likert-Skala: 0 (Keine Erfahrung) – 4 (Sehr viel Erfahrung)
Wie viel Erfahrung haben Sie mit der Interpretation von Balkendiagrammen (Bar Chart)?	Likert-Skala: 0 (Keine Erfahrung) – 4 (Sehr viel Erfahrung)
Wie vertraut sind Sie mit der geografischen Karte von Thailand?	Likert-Skala: 0 (Gar nicht vertraut) – 4 (Sehr vertraut)

Tabelle A.3 Gesundheitliche Fragen vor der Studie.

Frage	**Antwortmöglichkeiten**
Ist bei Ihnen eine Farbsehschwäche bekannt?	Ja Nein Keine Angabe
Ist bei Ihnen eine Sehschwäche bekannt?	Ja Nein Keine Angabe
Wie beurteilen Sie Ihr aktuelles körperliches Wohlbefinden?	Likert-Skala: 0 (Sehr schlecht) – 4 (Sehr gut)
Haben Sie aktuell Beschwerden wie Müdigkeit, Unwohlsein, Schwindel, Übelkeit, Kopfschmerzen, Augenbelastung oder ähnliche Beschwerden?	Ja (mit Freitextfeld: Falls ja, welche?) Nein

Tabelle A.4 Gesundheitliche Fragen nach der Studie.

Frage	**Antwortmöglichkeiten**
Wie beurteilen Sie Ihr aktuelles körperliches Wohlbefinden?	Likert-Skala: 0 (Sehr schlecht) – 4 (Sehr gut)
Haben Sie während der Nutzung Müdigkeit, Unwohlsein, Schwindel, Übelkeit, Kopfschmerzen, Augenbelastung oder ähnliche Beschwerden wahrgenommen?	Ja (mit Freitextfeld: Falls ja, welche?) Nein
Haben Sie sich durch eine Sehschwäche während der Studie eingeschränkt gefühlt?	Ja Nein Keine Angabe

Tabelle A.5 Vergleichende Abschlussfragen der Studie und Feedbackfragen.

Frage	**Antwortmöglichkeiten**
In welchem Szenario konnten Sie einzelne Werte besser einschätzen und ablesen?	Einzelne Tilt Map Tilt Map Gruppe Kein Unterschied Freitextfeld (Optionale Begründung)
In welchem Szenario konnten Sie Zusammenhänge zwischen den beiden Variablen besser erkennen?	Einzelne Tilt Map Tilt Map Gruppe Kein Unterschied Freitextfeld (Optionale Begründung)
Welches Szenario war für Sie visuell besser strukturiert?	Einzelne Tilt Map Tilt Map Gruppe Kein Unterschied Freitextfeld (Optionale Begründung)
Welches Szenario war für Sie leichter zu interpretieren?	Einzelne Tilt Map Tilt Map Gruppe Kein Unterschied Freitextfeld (Optionale Begründung)
Welches Szenario würden Sie insgesamt bevorzugen?	Einzelne Tilt Map Tilt Map Gruppe Kein Unterschied Freitextfeld (Optionale Begründung)
Gab es eine Aufgabe oder Situation, bei der ein Szenario besser funktioniert hat? Falls ja, welche?	Freitextfeld (Optional)
Gab es etwas, das Sie bei einem der Szenarien verwirrt hat?	Freitextfeld (Optional)
Was würden Sie an der Visualisierung oder Interaktion verbessern?	Freitextfeld (Optional)
Gibt es sonst noch etwas, das Sie zur Studie oder zu den Szenarien anmerken möchten?	Freitextfeld (Optional)

Tabelle A.6 Die sechs Dimensionen und Fragen des NASA-TLX.

Dimension	**Frage**	**Antwortmöglichkeiten**
Geistige Anforderung	Wie viel geistige und wahrnehmungsbezogene Aktivität war erforderlich, z. B. Denken, Entscheiden, Berechnen, Erinnern, Schauen, Suchen usw.? Waren die Aufgaben einfach oder anspruchsvoll, simpel oder komplex, genauigkeitsfordernd oder fehlertolerant?	Schieberegler: 0 (gering) – 100 (hoch)
Körperliche Anforderung	Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich, z. B. Drücken, Ziehen, Drehen, Steuern, Aktivieren usw.? Waren die Aufgaben einfach oder anspruchsvoll, langsam oder zügig, locker oder anstrengend, erholsam oder mühsam?	Schieberegler: 0 (gering) – 100 (hoch)
Zeitliche Anforderung	Wie viel Zeitdruck haben Sie aufgrund der Geschwindigkeit oder des Tempos empfunden, mit dem die Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten? War das Tempo langsam und gemächlich oder schnell und hektisch?	Schieberegler: 0 (gering) – 100 (hoch)
Leistung	Wie erfolgreich waren Sie Ihrer Meinung nach bei der Erfüllung der vom Versuchsleiter oder von Ihnen selbst gesetzten Ziele der Aufgaben? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Erfüllung dieser Ziele?	Schieberegler: 0 (gut) – 100 (schlecht)
Anstrengung	Wie stark mussten Sie geistig und körperlich arbeiten, um Ihr Leistungsniveau zu erreichen?	Schieberegler: 0 (gering) – 100 (hoch)
Frustration	Wie unsicher, entmutigt, gereizt, gestresst und verärgert im Gegensatz zu sicher, zufrieden, entspannt und gelassen fühlten Sie sich während der Aufgaben?	Schieberegler: 0 (gering) – 100 (hoch)

Tabelle A.7 Deskriptive Ergebnisse und statistische Vergleiche der zeitlichen Anteile der Ansichten an der Bearbeitungszeit für Aufgabe 1 bis 5.

Aufgabe	Ansicht	Einzelne Tilt Map, *Md (IQR)*	Tilt Map Gruppe, *Md (IQR)*	*W*	*p*	p_{Holm}	r_{rb}
1	Choroplethenkarte	7,78 (41,53)	9,69 (4,24)	70	0,782	1,000	-0,08
	Übergang Choroplethenkarte–Prism Map	0,94 (1,97)	0,79 (2,11)	76	1,000	1,000	0,01
	Prism Map	1,69 (3,39)	1,13 (3,07)	43	0,120	0,601	0,44
	Prism Map mit Balken	3,71 (5,80)	1,84 (2,87)	42	0,193	0,771	0,38
	Balkendiagramm	60,76 (58,24)	81,02 (21,11)	54	0,495	1,000	-0,21
2	Choroplethenkarte	8,83 (28,57)	3,29 (2,76)	29	0,023	0,070	0,62
	Übergang Choroplethenkarte–Prism Map	0,56 (1,32)	0,12 (0,21)	13	0,001	0,007	0,83
	Prism Map	0,71 (1,09)	0,26 (0,45)	35	0,051	0,101	0,54
	Prism Map mit Balken	1,05 (1,36)	0,98 (0,92)	67	0,678	0,678	0,12
	Balkendiagramm	77,95 (33,80)	95,16 (7,77)	22	0,016	0,062	-0,68
3	Choroplethenkarte	3,85 (3,03)	4,20 (3,29)	67	0,678	1,000	-0,12
	Übergang Choroplethenkarte–Prism Map	0,45 (0,74)	0,48 (0,93)	42	0,109	0,436	-0,45
	Prism Map	0,80 (42,67)	1,53 (3,47)	68	0,712	1,000	0,11
	Prism Map mit Balken	1,25 (76,74)	1,37 (3,55)	54	0,306	0,918	0,29
	Balkendiagramm	41,14 (92,80)	57,33 (87,07)	14	0,013	0,067	-0,73
4	Choroplethenkarte	3,56 (1,64)	2,81 (3,56)	60	0,459	1,000	-0,22
	Übergang Choroplethenkarte–Prism Map	0,54 (1,31)	0,37 (1,01)	70	0,782	1,000	0,08
	Prism Map	1,19 (89,36)	0,81 (19,44)	44	0,132	0,662	0,42
	Prism Map mit Balken	0,99 (3,41)	2,00 (19,11)	51	0,404	1,000	-0,25
	Balkendiagramm	41,32 (94,32)	62,85 (93,56)	49	0,561	1,000	-0,18
5	Choroplethenkarte	2,45 (2,11)	4,33 (2,52)	20	0,006	0,028	-0,74
	Übergang Choroplethenkarte–Prism Map	0,33 (1,10)	0,32 (1,24)	69	0,747	1,000	-0,10
	Prism Map	1,08 (13,00)	0,39 (2,32)	67	0,678	1,000	0,12
	Prism Map mit Balken	1,31 (54,60)	0,47 (1,49)	29	0,083	0,333	0,52
	Balkendiagramm	28,52 (95,01)	87,74 (94,70)	56	0,847	1,000	0,07

Tabelle A.8 Häufigkeiten der gewählten Zusammenhänge für die einzelne Tilt Map und die Tilt Map Gruppe.

Bedingung	Tatsächlicher Zusammenhang	Positiv gewählt	Negativ gewählt	Kein Zusammenhang gewählt
Einzelne Tilt Map	Positiv (Aufgabe 3)	16	0	1
	Negativ (Aufgabe 4)	1	16	0
	Kein Zusammenhang (Aufgabe 5)	2	1	14
Tilt Map Gruppe	Positiv (Aufgabe 3)	15	2	0
	Negativ (Aufgabe 4)	2	14	1
	Kein Zusammenhang (Aufgabe 5)	2	4	11

Tabelle A.9 Deskriptive Ergebnisse und statistische Vergleiche der Bewertungen des NASA-TLX zwischen der einzelnen Tilt Map und der Tilt Map Gruppe.

Dimension	**Einzelne Tilt Map,** ***Md (IQR)***	**Tilt Map Gruppe,** ***Md (IQR)***	***W***	***p***	r_{rb}
Ungewichteter Gesamtwert	30,8 (21,7)	36,7 (19,2)	52	0,258	0,32
Geistige Anforderung	70,0 (27,0)	65,0 (35,0)	45	0,247	0,34
Körperliche Anforderung	15,0 (24,0)	20,0 (10,0)	51,5	0,964	-0,02
Zeitliche Anforderung	24,0 (39,0)	15,0 (30,0)	30	0,296	0,34
Leistung	35,0 (49,0)	20,0 (62,0)	58,5	0,946	0,03
Anstrengung	60,0 (50,0)	40,0 (35,0)	60	0,696	0,12
Frustration	15,0 (25,0)	10,0 (29,0)	27	0,622	-0,18

Anhang B

Nutzung KI-basierter Anwendungen

In den folgenden Tabellen wird die Nutzung von KI dokumentiert.

Tabelle B.1 Dokumentation der KI-Nutzung (Teil 1).

KI-basiertes Hilfsmittel	**Einsatzform**	**Betroffene Teile der Arbeit**	**Beschreibung der Eingabe (Prompt)**	**Bemerkungen**
ChatGPT	Hilfe bei der Titelfindung	Titel der Arbeit	Ich habe für meine Masterarbeit eine Tilt Map implementiert, mit der räumliche und zeitliche Geodaten interaktiv in VR untersucht werden können. Dabei lassen sich mehrere Variablen gleichzeitig untersuchen. Hast du ein paar Vorschläge für den Titel der Arbeit?	Dadurch habe ich Anregungen und Ideen für den Titel meiner Masterarbeit erhalten.
ChatGPT	Unterstützung bei der Implementierung der Anwendung	Implementierung der Anwendung	Wie kann ich den Tone Mapper in Unreal Engine ausschalten? Mit welcher Blueprint-Node kann ich einen bestimmten Actor im Level finden? Wie liest man eine CSV-Datei in Unreal Engine C++ ein? Wie kann ich in Unreal Engine die Performance meiner Anwendung überprüfen?	ChatGPT wurde unterstützend bei der Implementierung verwendet. Fragen, die früher über Webseiten wie Stack Overflow oder Ähnliches nachgelesen wurden, wurden stattdessen über ChatGPT abgefragt. Die Texte in „Beschreibung der Eingabe (Prompt)“ sind ein paar Beispiele dafür.

Tabelle B.2 Dokumentation der KI-Nutzung (Teil 2).

KI-basiertes Hilfsmittel	**Einsatzform**	**Betroffene Teile der Arbeit**	**Beschreibung der Eingabe (Prompt)**	**Bemerkungen**
NotebookLM	Hilfe bei der Strukturierung und Kategorisierung der Literatur	Verwandte Arbeiten	Ich habe für meine Masterarbeit eine erweiterte Tilt Map implementiert. Mit dieser können multivariate, raum-zeitliche und hierarchische Geodaten untersucht werden. Dies ist eine immersive Visualisierung und fällt in das Forschungsgebiet Immersive Analytics. Ich habe alle Arbeiten hinzugefügt, die potenziell für meinen Teil zu verwandten Arbeiten infrage kommen. Kannst du mir Vorschläge geben, wie ich diese Arbeiten strukturieren und kategorisieren kann?	Ich habe zuvor eine Literaturrecherche für meine Arbeit durchgeführt. Um diese Arbeiten besser in einen Zusammenhang setzen zu können und eine Struktur für meine Arbeit zu entwickeln, wurde NotebookLM verwendet.
ChatGPT	Hilfe bei der Korrektur der Rechtschreibung und Grammatik	Gesamter schriftlicher Teil	Bitte markiere in meiner Masterarbeit Rechtschreibfehler und grammatikalische Fehler.	Dies hat mir dabei geholfen, noch unentdeckte Rechtschreib- und Grammatikfehler zu identifizieren. Dadurch konnte ich diese Fehler beheben.

Tabelle B.3 Dokumentation der KI-Nutzung (Teil 3).

KI-basiertes Hilfsmittel	**Einsatzform**	**Betroffene Teile der Arbeit**	**Beschreibung der Eingabe (Prompt)**	**Bemerkungen**
ChatGPT	Überprüfung, ob ein roter Faden in meiner Arbeit vorhanden ist	Gesamter schriftlicher Teil	Bitte überprüfe in meiner Masterarbeit, ob der rote Faden erkennbar und nachvollziehbar ist.	Das Feedback hat mir die Bestätigung gegeben, dass meine Arbeit einen roten Faden hat.
ChatGPT	Synonyme für Begriffe finden	Schriftlicher Teil	Gib mir Synonyme für das Wort untersuchen. Gib mir Synonyme für das Wort dadurch. Gib mir Synonyme für das Wort außerdem.	Die Texte in „Beschreibung der Eingabe (Prompt)“ sind nur ein paar Beispiele. Dies hat mir geholfen, Synonyme für Begriffe zu finden, die sich oft wiederholt haben. Dadurch konnte der Text weniger eintönig gestaltet werden.
ChatGPT	Übersetzung des NASA-TLX	NASA-TLX der Studie	Kannst du mir die Fragen des NASA-TLX ins Deutsche übersetzen (Bild von den englischen Fragen des NASA-TLX hinzugefügt)?	Dies hat mir dabei geholfen, passende Übersetzungen für die Fragen des NASA-TLX zu formulieren.

Tabelle B.4 Dokumentation der KI-Nutzung (Teil 4).

KI-basiertes Hilfsmittel	**Einsatzform**	**Betroffene Teile der Arbeit**	**Beschreibung der Eingabe (Prompt)**	**Bemerkungen**
ChatGPT	Hilfe bei der Erzeugung von Datensätzen für die Aufgaben in der Studie	Die verwendeten Datensätze für die Studie	Siehe Tabelle B.7 für die Datensätze von Aufgabe 1, Tabelle B.8 für die Datensätze von Aufgabe 2 und Tabelle B.9 für die Datensätze der Aufgaben 3–5.	ChatGPT hat mir Python-Skripte nach meinen Vorgaben zur Erzeugung der Datensätze geschrieben. Diese Skripte wurden überprüft und als Ausgangspunkt verwendet. Daraufhin wurden sie angepasst und weiterentwickelt, damit die Datensätze die gewünschte Qualität haben.

Tabelle B.5 Dokumentation der KI-Nutzung (Teil 5).

KI-basiertes Hilfsmittel	**Einsatzform**	**Betroffene Teile der Arbeit**	**Beschreibung der Eingabe (Prompt)**	**Bemerkungen**
ChatGPT	Unterstützung bei der Auwertung der Studie	Auswertung der Studie	Siehe Tabelle B.10	ChatGPT hat mir bestätigt, dass der zweiseitige Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test und der exakte McNemar-Test geeignete statistische Tests für meine Studie sind. Außerdem wurde mir vorgeschlagen, dass ich bei Bindungen den p-Wert mit einer vollständigen Permutation aller möglichen Vorzeichenbelegungen berechnen soll. Darüber hinaus bin ich durch die Antwort darauf gekommen, die rangbiseriale Korrelation als Effektstärke zu berechnen und neben dem p-Wert auch immer die Teststatistik W mit anzugeben. Auch habe ich den Vorschlag zur Berechnung der Holm-Korrektur umgesetzt.

Tabelle B.6 Dokumentation der KI-Nutzung (Teil 6).

KI-basiertes Hilfsmittel	**Einsatzform**	**Betroffene Teile der Arbeit**	**Beschreibung der Eingabe (Prompt)**	**Bemerkungen**
ChatGPT	Unterstützung bei der Auwertung der Studie	Auswertung der Studie	Wie berechnet man in Python den zweiseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test mit einer vollständigen Permutation aller möglichen Vorzeichenbelegungen, die Holm-Korrektur, den exakten McNemar-Test und die rangbiseriale Korrelation? Welche Bibliotheken eignen sich dafür am besten? Zeige mir jeweils ein Beispiel.	Die Antwort hat mir mit geeigneten Bibliotheken und Beispielen geholfen, meine Daten schneller in Python auszuwerten.
ChatGPT	Unterstützung bei der Erstellung der Abbildungen zur Auswertung der Studie	Abbildungen zur Auswertung der Studie	Wie erstelle ich in Python ein gestapeltes Balkendiagramm? Es soll mehrere horizontal verlaufende Balken haben. Kannst du mir ein Beispiel zeigen?	Dadurch konnte ich die Abbildungen mit den gestapelten Balkendiagrammen schneller erstellen.
ChatGPT	Unterstützung bei der Erstellung der Abbildungen zur Auswertung der Studie	Abbildungen zur Auswertung der Studie	Ich möchte in Python eine Abbildung mit zwei Boxplots und einem Paired Dot Plot erstellen. Es gibt genau zwei Bedingungen. Daher sollen jeweils zwei Datenpunkte durch eine Linie verbunden werden. Kannst du mir ein Beispiel zeigen?	Dadurch konnte ich die Abbildungen mit den Boxplots und den verbundenen Datenpunkten schneller erstellen.

Tabelle B.7 Ausführliche Eingaben (Prompts) zur KI-Nutzung (Teil 1).

Beschreibung der ausführlichen Eingabe (Prompt), ergänzend zur obigen Tabelle B.4
Ich führe eine Studie zu meiner Anwendung durch, für die ich quantitative Daten zu den Provinzen Thailands im CSV-Format benötige. Dabei gibt es zwei Variablen: Variable A und Variable B. Die Aufgabe besteht darin, jeweils die Provinz mit dem Maximalwert von Variable A und Variable B zu finden. Ich benötige zwei unterschiedliche Datensätze. Kannst du mir dafür ein Python-Skript erstellen, mit dem ich solche Datensätze erzeugen kann? Gestalte das Skript so, dass sich die Parameter leicht anpassen lassen und die Datensätze reproduzierbar sind. Beachte dabei Folgendes: Für jede Variable soll eine vorgegebene Provinz den höchsten Wert erhalten. Die anderen Provinzen sollen zufällige Werte aus unterschiedlichen Wertebereichen (einem niedrigen, einem mittleren und einem hohen Bereich) erhalten. Die Maximalwerte und die Wertebereiche sollen leicht angepasst werden können. Thailand hat folgende Provinzcodes: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96. Ich benötige die Daten in einer monatlichen Auflösung für den Januar 2025. Das bedeutet, dass für jede Provinz jeweils ein Wert für Variable A und ein Wert für Variable B erzeugt werden soll. Die zufällig erzeugten Werte sollen im Bereich von 20 bis 80 liegen und höchstens zwei Nachkommastellen haben. Die vorgegebenen Maximalwerte sollen eindeutig über diesem Wertebereich liegen. Damit die Skala in meiner Anwendung von 0 bis 100 reicht, sollen dennoch Werte für die restlichen Monate des Jahres hinzugefügt werden. Achte darauf, dass im zweiten Monat für jede Variable jeweils mindestens einmal der Wert 0 und mindestens einmal der Wert 100 vorkommt. Die Werte für die übrigen Monate können bei 0 bleiben, da für die Teilnehmenden ohnehin nur der erste Monat sichtbar sein wird. Die CSV-Datei soll folgende Struktur haben: Year,Month,ProvinceCode,VariableA,VariableB. Die Daten sollen so sortiert werden, dass zuerst alle Monatswerte einer Provinz und anschließend alle Monatswerte der nächsten Provinz aufgeführt werden.

Tabelle B.8 Ausführliche Eingaben (Prompts) zur KI-Nutzung (Teil 2).

Beschreibung der ausführlichen Eingabe (Prompt), ergänzend zur obigen Tabelle B.4
Ich führe eine Studie zu meiner Anwendung durch, für die ich quantitative Daten zu den Provinzen Thailands im CSV-Format benötige. Dabei gibt es zwei Variablen: Variable A und Variable B. Die Aufgabe besteht darin, für jede Variable das globale Maximum innerhalb eines bestimmten Zeitraums zu finden. Dazu sollen sowohl die Provinz als auch der Monat bestimmt werden, in dem der höchste Wert auftritt. Ich benötige zwei unterschiedliche Datensätze. Kannst du mir dafür ein Python-Skript erstellen, mit dem ich solche Datensätze erzeugen kann? Gestalte das Skript so, dass sich die Parameter leicht anpassen lassen und die Datensätze reproduzierbar sind. Beachte dabei Folgendes: Für jede Variable sollen eine bestimmte Provinz und ein bestimmter Monat festgelegt werden können. An dieser Kombination aus Provinz und Monat soll das eindeutige globale Maximum der jeweiligen Variable auftreten. Folgende Parameter sollen für beide Variablen unabhängig voneinander festgelegt werden können: Provinz des globalen Maximums, Monat des globalen Maximums, Wert des globalen Maximums, Obergrenze für alle übrigen Werte. Thailand hat folgende Provinzcodes: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96. Ich benötige die Daten in einer monatlichen Auflösung für den Zeitraum von Januar 2025 bis Dezember 2025. Die Werte sollen einen zeitlichen Verlauf besitzen und nicht vollständig unabhängig voneinander sein. Dazu soll jede Provinz einen zufällig erzeugten Basiswert erhalten. Zusätzlich soll für jede Variable ein monatlicher Effekt berechnet werden. Dieser Effekt soll im festgelegten Zielmonat am höchsten sein. In den benachbarten Monaten soll der Effekt ebenfalls erhöht sein und mit zunehmendem Abstand zum Zielmonat abnehmen. Außerdem soll ein geringes zufälliges Rauschen hinzugefügt werden, damit die Daten nicht zu künstlich wirken. Die regulären Werte sollen innerhalb eines festgelegten Wertebereichs begrenzt sein und höchstens zwei Nachkommastellen haben. Damit die Skala meiner Anwendung unabhängig von den sichtbaren Studiendaten von 0 bis 100 reicht, sollen zusätzlich die Daten für alle zwölf Monate des Jahres 2026 erzeugt werden. Diese Daten sind für die Teilnehmenden nicht sichtbar und dienen ausschließlich der Skalierung. Im Jahr 2026 soll für jede Variable mindestens einmal der Wert 0 und mindestens einmal der Wert 100 vorkommen. Die übrigen Werte können zufällig innerhalb des Wertebereichs liegen. Die CSV-Dateien sollen folgende Struktur haben: Year,Month,ProvinceCode,VariableA,VariableB Die Daten sollen so sortiert werden, dass zuerst alle Monatswerte einer Provinz und anschließend alle Monatswerte der nächsten Provinz aufgeführt werden.

Tabelle B.9 Ausführliche Eingaben (Prompts) zur KI-Nutzung (Teil 3).

Beschreibung der ausführlichen Eingabe (Prompt), ergänzend zur obigen Tabelle B.4
Ich führe eine Studie zu meiner Anwendung durch, für die ich quantitative Daten zu den Provinzen Thailands im CSV-Format benötige. Dabei gibt es zwei Variablen: Variable A und Variable B. Die Aufgabe besteht darin, Zusammenhänge zwischen Variable A und Variable B zu erkennen. Dafür brauche ich zwei Datensätze, bei denen es einen positiven Zusammenhang gibt, zwei Datensätze, bei denen es einen negativen Zusammenhang gibt und zwei Datensätze, bei denen es keinen Zusammenhang gibt. Positiv = Wenn Variable A steigt, steigt Variable B. Wenn Variable A sinkt, sinkt Variable B. Negativ = Wenn Variable A steigt, sinkt Variable B. Wenn Variable A sinkt, steigt Variable B. Kein klarer Zusammenhang = Variable A und B steigen und sinken unabhängig voneinander. Kannst du mir dafür ein Python-Skript erstellen, mit dem ich solche Datensätze erzeugen kann? Gestalte das Skript so, dass sich die Parameter leicht anpassen lassen und die Datensätze reproduzierbar sind. Beachte dabei Folgendes: Thailand hat folgende Provinzcodes: 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96. Ich benötige die Daten in einer monatlichen Auflösung für das Jahr 2025. Die Startwerte im ersten Monat sollen für Variable A und Variable B zufällig zwischen 25 und 75 sein. Alle Werte müssen im Bereich von 10 bis 90 bleiben und sollen höchstens zwei Nachkommastellen haben. Die monatliche Veränderung von Variable A soll in jedem Schritt zwischen 4 und 10 sein. Variable B soll bei einem positiven Zusammenhang in die gleiche Richtung gehen wie Variable A. Bei einem negativen Zusammenhang soll Variable B in die entgegengesetzte Richtung von Variable A gehen. Damit die Daten nicht zu künstlich wirken, soll Variable B nicht im exakt gleichen Ausmaß steigen und sinken wie Variable A. Es soll ein zufälliges Rauschen mit einem Unterschied von bis zu 5 geben. Variable B soll sich aber in jedem Schritt mindestens um 1,5 verändern. Damit die Daten nicht nach jedem Schritt steigen und direkt wieder fallen, soll der zufällige Richtungswechsel begrenzt werden können. Nach einem zufälligen Richtungswechsel soll der nächste zufällige Richtungswechsel frühestens nach 3 Schritten wieder passieren. Eine Ausnahme ist, wenn die Provinz in der Nähe eines Grenzbereichs ist und im nächsten Schritt höher als 90 bzw. kleiner als 10 sein würde. Dann darf auch unabhängig vom zufälligen Richtungswechsel ein Richtungswechsel stattfinden. Damit die Skala in meiner Anwendung von 0 bis 100 reicht, sollen die Daten für das Jahr 2026 angehängt werden. Diese werden in der Studie nicht sichtbar sein und sollen für Variable A und B mindestens einmal den Wert 0 und einmal den Wert 100 haben. Die restlichen Werte können zufällig im Wertebereich liegen. Die CSV-Dateien sollen folgende Struktur haben: Year,Month,ProvinceCode,VariableA,VariableB. Die Daten sollen so sortiert werden, dass zuerst alle Monatswerte einer Provinz und anschließend alle Monatswerte der nächsten Provinz aufgeführt werden. Gib zusätzlich eine Datei aus, mit der ich die Qualität der Daten überprüfen kann. Dafür brauche ich die globale Pearson-Korrelation, Pearson-Korrelation über die Zeit innerhalb jeder Provinz, ob die Richtungen der Variablen übereinstimmen und wie stark sich Variable A und B maximal in einem Schritt verändert haben.

Tabelle B.10 Ausführliche Eingaben (Prompts) zur KI-Nutzung (Teil 4).

Beschreibung der ausführlichen Eingabe (Prompt), ergänzend zur obigen Tabelle B.5
Ich habe eine Studie durchgeführt, in der ich zwei Visualisierungsvarianten miteinander vergleichen will. Es gibt die einzelne Tilt-Map und die Tilt-Map-Gruppe. Die Studie wurde im Within-Subject-Design durchgeführt und es nahmen 17 Personen teil. Es gab pro Variante 5 Aufgaben, welche die Teilnehmenden bearbeiten mussten. Dabei habe ich folgende Daten erhoben: participant, condition, task, dataset, completionTime, endView, timeInView0, timeInView1, timeInView2, timeInView3, timeInView4, countView0, countView1, countView2, countView3, countView4, totalViewSwitchCount, laserActiveTime, laserActivationCount, headTotalDistance, headTotalRotation, confidence, isAnswerCorrect, answer. Ich möchte die Studie auswerten. Ich hatte überlegt, den zweiseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test und den exakten McNemar-Test für die Auswertung zu verwenden. Hast du noch weitere Tests oder Vorschläge, die infrage kommen könnten und sinnvoll sind?