

Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme
Universität Stuttgart
Universitätsstraße 38
D-70569 Stuttgart

Diplomarbeit Nr. 3302

Eyetracking basiertes Analysekonzept zur Evaluation von Visualisierungen

Tanja Blascheck

Studiengang:	Softwaretechnik
Prüfer:	Prof. Dr. Thomas Ertl
Betreuer:	Dipl.-Phys. Michael Raschke
begonnen am:	20. Februar 2012
beendet am:	21. August 2012
CR-Klassifikation:	H.1.2, H.5.1, H.5.2, I.3.6

Abstract

Kurzfassung

Das Ziel einer Eyetracking-Benutzerstudie ist die Untersuchung und Auswertung einer Forschungsfragestellung anhand von aufgenommenen Eyetracking-Daten mit Hilfe von Metriken, statistischen Berechnungen und Visualisierungen. Meist müssen anschließend die Ergebnisse in einem Bericht festgehalten und veröffentlicht werden. Ein Großteil des Arbeitsaufwandes bei einer Auswertung wird in manuelle Aufgaben wie das Eingeben von Fragebögen und Antworten, das Sortieren der Daten, das Durchführen von statistischen Tests und die Erstellung von Visualisierungen aufgewendet. In dieser Diplomarbeit wird ein Konzept für ein Framework vorgestellt, welches auf dem Visual Information Seeking Mantra basiert. Das Framework soll den Benutzer bei der Erstellung, Durchführung und Auswertung einer Eyetracking-Benutzerstudie unterstützen. Dafür werden die Eyetracking- und Probandendaten in einer Datenbank gespeichert und es werden verschiedene Metriken, Statistiken und Visualisierungen zur Verfügung gestellt, die der Benutzer für die Auswertung verwenden kann. Die Ergebnisse aller Berechnungen werden in einer Datenbank gespeichert, so dass der Benutzer die Berechnungen zu späteren Zeitpunkten zur Verfügung hat. Das Framework kann außerdem den Fragebogen der Probanden auswerten und einen Bericht in LaTeX erstellen, welcher die Probandendaten, Boxplotdiagramme und Heatmaps enthält.

Abstract

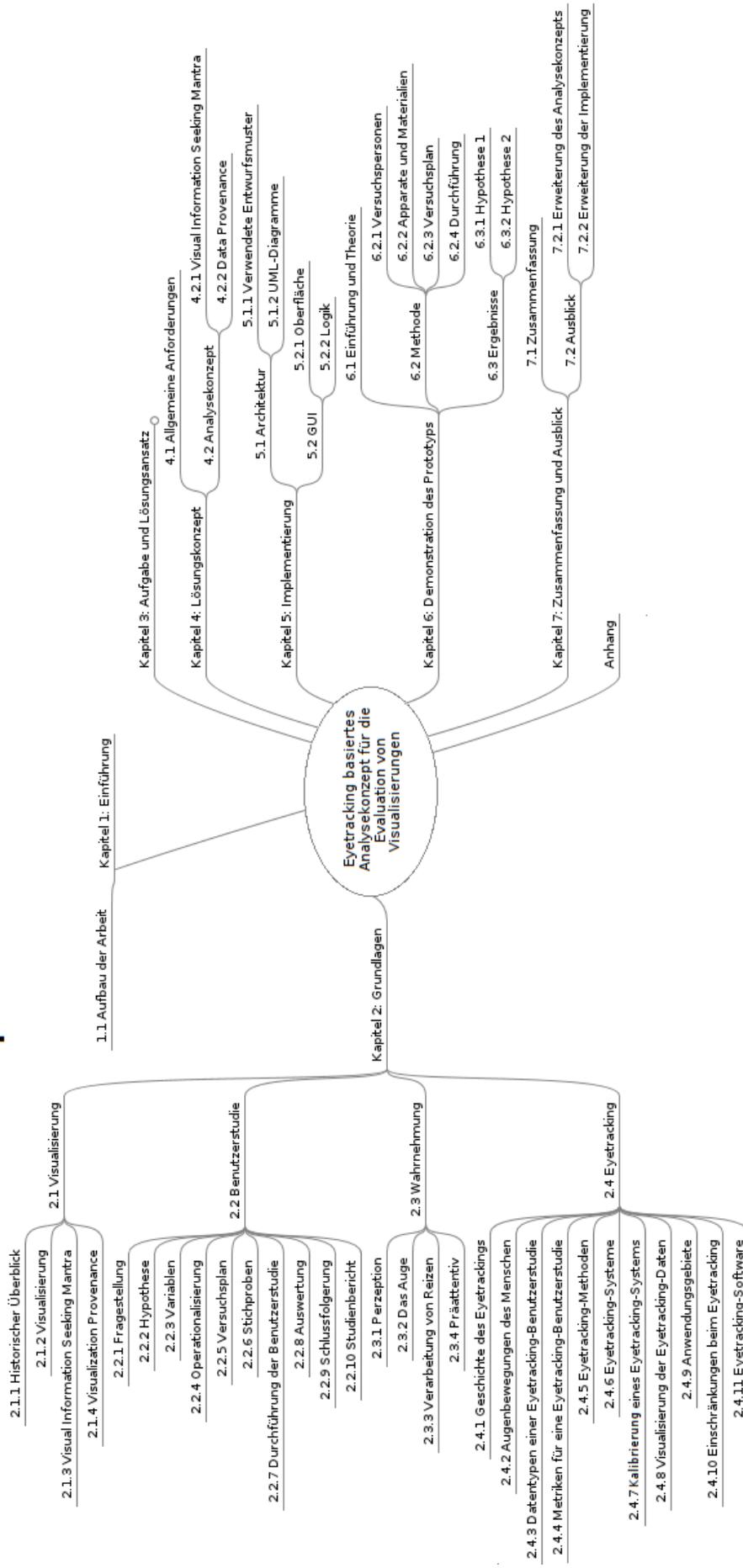
The purpose of an eye tracking user study is the analysis and evaluation of a research question based on recorded eye tracking data with the help of metrics, statistical calculations and visualizations. Often the results will be recorded and published in a report. A large amount of working time during the analysis is spent on manual work like entering the questionnaires and answers, sorting the data, conducting statistical tests and creating visualizations. In this diploma thesis we introduce a concept for a framework which is based on the visual information seeking mantra. The framework supports the user while creating, conducting and analyzing an eye tracking user study. Therefore, the eye tracking and participant data will be stored in a data base and different metrics, statistics and visualizations are available for the analysis by the user. The results of all calculations are stored in the data base and thus are available at all times. The framework also evaluates the questionnaire of the participant data. Furthermore, a report can be created in LaTeX with the participant data, box plots and heat maps.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Aufbau der Arbeit	9
2	Grundlagenkapitel	11
2.1	Visualisierung	11
2.1.1	Historischer Überblick	11
2.1.2	Visualisierung	13
2.1.3	Visual Information Seeking Mantra	14
2.1.4	Visualization Provenance	15
2.2	Benutzerstudie	15
2.2.1	Fragestellung	15
2.2.2	Hypothese	15
2.2.3	Variablen	18
2.2.4	Operationalisierung	19
2.2.5	Versuchsplan	21
2.2.6	Stichproben	23
2.2.7	Durchführung der Benutzerstudie	23
2.2.8	Auswertung	23
2.2.9	Schlussfolgerung	29
2.2.10	Studienbericht	29
2.3	Wahrnehmung	30
2.3.1	Perzeption	30
2.3.2	Das Auge	31
2.3.3	Verarbeitung von Reizen	33
2.3.4	Präattentiv	33
2.4	Eyetracking	35
2.4.1	Geschichte des Eyetrackings	35
2.4.2	Augenbewegungen des Menschen	37
2.4.3	Datentypen einer Eyetracking-Benutzerstudie	38
2.4.4	Metriken für eine Eyetracking-Benutzerstudie	39
2.4.5	Eyetracking-Methoden	43
2.4.6	Eyetracking-Systeme	47
2.4.7	Kalibrierung eines Eyetracking-Systems	50
2.4.8	Visualisierung der Eyetracking-Daten	50
2.4.9	Anwendungsgebiete	56
2.4.10	Einschränkungen beim Eyetracking	59
2.4.11	Eyetracking-Software	60

3	Aufgabe und Lösungsansatz	67
3.1	Hintergründe	67
3.2	Aufgabenstellung	67
3.3	Lösungsansatz	68
4	Lösungskonzept	71
4.1	Allgemeine Anforderungen	71
4.2	Analysekonzept	72
4.2.1	Visual Information Seeking Mantra	73
4.2.2	Data Provenance	78
5	Implementierung	81
5.1	Architektur	81
5.1.1	Verwendete Entwurfsmuster	81
5.1.2	UML-Diagramme	83
5.2	GUI	91
5.2.1	Oberfläche	92
5.2.2	Logik	103
6	Demonstration des Prototyps	109
6.1	Einleitung und Theorie	109
6.2	Methode	110
6.2.1	Versuchspersonen	110
6.2.2	Apparate und Materialien	110
6.2.3	Versuchsplan	110
6.2.4	Durchführung	112
6.3	Ergebnisse	116
6.3.1	Hypothese 1	116
6.3.2	Hypothese 2	119
6.4	Zusammenfassung	121
7	Zusammenfassung und Ausblick	123
7.1	Zusammenfassung	123
7.2	Ausblick	124
7.2.1	Erweiterung des Analysekonzepts	124
7.2.2	Erweiterung der Implementierung	124
	Anhang	127
	Literaturverzeichnis	133

Inhaltsverzeichnis als Mindmap



1 Einleitung

Seit über hundert Jahren sind Forscher daran interessiert, die Bewegung des menschlichen Auges beim Durchführen von Aufgaben wie Lesen oder Betrachten von Bildern zu erforschen. Die dadurch entwickelten Eyetracking-Systeme kommen immer häufiger zum Einsatz bei Benutzerstudien in den Bereichen Psychologie und Neurowissenschaften, aber auch in der Mensch-Computer-Interaktion. Herauszufinden wo Menschen wie lange hinschauen, kann Aufschlüsse darüber geben, wie die Wahrnehmung des Menschen abläuft. Da das Betrachten einer grafischen Benutzeroberfläche aus vielen Augenbewegungen besteht, entstehen bei Eyetracking-Benutzerstudien große Datenmengen, die von den Forschern ausgewertet werden müssen.

In der Mensch-Rechner-Interaktion werden Eyetracking-Benutzerstudien durchgeführt, um herauszufinden, wie Benutzer mit Untersuchungsobjekten, zum Beispiel Webseiten, Benutzeroberflächen, Visualisierungen oder Geräten, interagieren und wo sie während der Benutzerstudie wie lange hinschauen. Das gewonnene Wissen wird verwendet, um die Interaktion oder den Aufbau der Untersuchungsobjekte zu verbessern oder neu anzuordnen.

Eine Eyetracking-Benutzerstudie besteht in der Regel aus den drei Schritten Studienerstellung, -durchführung und -auswertung. Insbesondere während der Durchführungsphase wird eine Vielzahl von Datensätzen generiert, die in der Analysephase ausgewertet werden müssen. Ein Großteil des Arbeitsaufwandes bei der Erstellung und Auswertung einer Studie wird für manuelle Aufgaben, wie das Erstellen und Eingeben von Fragebögen, für die Aufnahme von Notizen während der Studiendurchführung, für das Sortieren der aufgenommenen Daten, dem Durchführen statistischer Tests anhand von Metriken und die Erstellung von Visualisierungen aufgewendet. Dies kostet viel Zeit und ist fehleranfällig. Deswegen soll in dieser Diplomarbeit ein Analysekonzept entwickelt werden, welches sich am Visual Information Seeking Mantra orientiert, um ein strukturiertes Vorgehen bei der Analyse zu gewährleisten. Hierfür werden die Kriterien einheitliches Datenformat und Verwenden einer Historie als wichtige Anforderungen an das Lösungskonzept umgesetzt. Außerdem stehen dem Benutzer verschiedene Metriken, Statistiken und Visualisierungen für die Auswertung, die automatische Auswertung des Fragebogens und die Erstellung eines Studienberichts zur Verfügung.

1.1 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Nach Einführung und Motivation für die Diplomarbeit wird in Kapitel 2 auf die Grundlagen der Diplomarbeit eingegangen. Die Grundlagen

sollen wichtige Begriffe, Konzepte und Themen erläutern, auf die in der restlichen Arbeit aufgebaut wird. Die Themen umfassen eine Einführungen in die Visualisierung und das Eyetracking, Erstellung, Durchführung und Analyse von Benutzerstudien, Wahrnehmung des Menschen sowie den Aufbau des Auges.

Kapitel 3 fasst die Aufgabenstellung und Vorgehensweise der Diplomarbeit zusammen. Es werden Hintergründe für die Arbeit dargelegt und das grobe Konzept der Diplomarbeit vorgestellt. Anschließend wird in Kapitel 4 das Lösungskonzept ausführlich erklärt. Das Lösungskonzept basiert auf dem Visual Information Seeking Mantra und definiert für die drei Schritte - Overview, Zoom and Filter, Details-on-demand - jeweils Metriken, Statistiken und Visualisierungen, die den Benutzer bei der Auswertung einer Eyetracking-Benutzerstudie unterstützen sollen.

In Kapitel 5 wird aufbauend auf Kapitel 3 und 4 der entwickelte Prototyp vorgestellt. In Abschnitt 5.1 des Kapitels wird auf die Architektur des Prototyps eingegangen. Es werden die verwendeten Entwurfsmuster, die Komponenten des Frameworks sowie die Klassen der Komponenten anhand von Klassendiagrammen erklärt. Die Abläufe des Frameworks werden anhand von Aktivitäts- und Aktionsdiagrammen dargelegt. Diese umfassen das allgemeine Vorgehen von der Studienerstellung, über die Durchführung der Studie unter Verwendung eines Eyetrackers und die anschließende Auswertung der Daten, sowie die einzelnen Schritte beim Erstellen, Durchführen und Auswerten einer Benutzerstudie.

In Abschnitt 5.2 wird die Oberfläche des Prototyps anhand von Screenshots vorgestellt. Die Oberflächenelemente werden detailliert beschrieben, so dass ein Benutzer sich anhand dieser Beschreibungen im Framework zurechtfinden kann. Außerdem wird auf die Implementierung der Logik des Frameworks eingegangen und das Plug-in-System für die Metrik-, Statistik- und Visualisierungs-Module vorgestellt.

Anschließend wird in Kapitel 6 das Lösungskonzept und der implementierte Prototyp anhand einer durchgeführten Benutzerstudie getestet. Die Benutzerstudie wird mit Hilfe des Frameworks durchgeführt und anschließend anhand von zwei Hypothesen ausgewertet. Die Evaluation soll zeigen, wie die Anforderungen an das Lösungskonzept im Framework umgesetzt wurden und die Vorteile des gewählten Lösungskonzepts zeigen.

Abschließend werden in Kapitel 7 die Konzepte und Ergebnisse der Diplomarbeit zusammengefasst. Außerdem wird ein Ausblick gegeben, wie das vorgestellte Konzept weiterentwickelt werden kann.

2 Grundlagenkapitel

Dieses Kapitel soll als Einführung in die Themen dieser Diplomarbeit dienen. Für jedes der Themengebiete werden Begriffe, Konzepte und Techniken vorgestellt, die wichtig für das Verständnis der restlichen Arbeit sind.

Der Titel dieser Diplomarbeit „Eyetracking basiertes Analysekonzept für die Evaluation von Visualisierungen“ besteht aus drei grundlegenden Bereichen: Visualisierung (Abschnitt 2.1), Durchführung von Benutzerstudien (Abschnitt 2.2) und Eyetracking (Abschnitt 2.4). Der Themenbereich Eyetracking erfordert zunächst eine Einführung in die Wahrnehmung des Menschen, den Aufbau des menschlichen Auges sowie die Verarbeitung der Reize (Abschnitt 2.3).

2.1 Visualisierung

Das folgende Unterkapitel beschreibt das Themengebiet Visualisierung und beginnt mit einem geschichtlichen Hintergrund. Anschließend wird der Begriff Visualisierung definiert. Das Vorgehen beim Erstellen einer Visualisierung aus Rohdaten wird anschließend erklärt. Da neben der Erstellung einer Visualisierung auch die Interaktion mit einer solchen von Bedeutung ist, wird das Visual Information Seeking Mantra eingeführt. Abschließend wird der Aspekt der Historie aus dem Visual Information Seeking Mantra durch den Begriff Visualization Provenance näher erläutert.

2.1.1 Historischer Überblick

Die ältesten Zeugnisse, für von Menschenhand angefertigte Visualisierungen, finden sich in der Höhlenmalerei und reichen bis zu 37.000 Jahre zurück [69]. Abbildung 2.1 zeigt eine Höhlenmalerei aus der Altamira-Höhle in Spanien, in der Pferde, Hirschkühe und Bisons dargestellt sind.

Im 18. Jahrhundert wurde versucht mit Hilfe von Visualisierungen eine zeitliche Abfolge von Ereignissen mit mehreren Dimensionen wiederzugeben. Dies wurde in der Zeichnung von Jacques Joseph Minard (siehe Abbildung 2.2) erfolgreich umgesetzt, welche den Feldzug von Napoleon nach Russland 1812 visualisierte und unter anderem die schrumpfende Größe von Napoleons Armee darstellte sowie die Route des Feldzugs [63].



Abbildung 2.1: Höhlenmalerei aus der Altamira-Höhle in Spanien (um 13.000 v. Chr.). Zu sehen sind Bisons, Pferde und Hirschkühe [44].

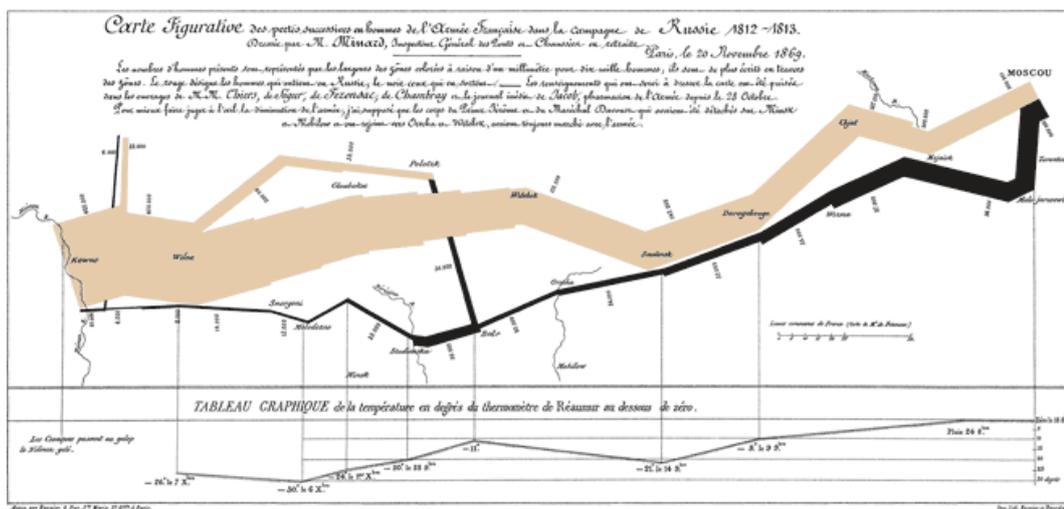


Abbildung 2.2: Die Darstellung zeigt die schrumpfende Größe von Napoleons Armee während des Russlandfeldzugs 1812 sowie die gelaufenen Routen [63].

Eine weitere Visualisierung ist der Liniennetzplan der U-Bahn Stationen in London (siehe Abbildung 2.3). Anstatt die Stationen und Strecken der U-Bahn topographisch genau abzubilden, versuchte Harry Beck 1933 erstmals eine kompakte und einfach zu lesende Karte zu erstellen, welche die Position der einzelnen Stationen schematisch wiedergab [25]. Diese Art der Darstellung von Streckenlinien wird heute überall verwendet.



Abbildung 2.3: Die U-Bahn Linien und Stationen in London wurden 1933 von Harry Beck erstmals schematisch statt topographisch angeordnet [25].

2.1.2 Visualisierung

Visualisieren bedeutet sich eine mentale Vision, ein Bild oder Abbild von einer Abstraktion zu formen. Wissenschaftliche Visualisierungen haben die Aufgabe „geeignete visuelle Repräsentation[en] einer gegebenen Datenmenge zu erzeugen, um damit eine effektive Auswertung zu ermöglichen“ [57]. Im Gegensatz zur wissenschaftlichen Visualisierung hat die Informationsvisualisierung abstrakte Daten zur Grundlage. Beide Arten der Visualisierung helfen

- neue Hypothesen über unerforschte Daten zu entwickeln (explorative Analyse),
- existierende Hypothesen anhand von bekannten Daten zu überprüfen und zu verifizieren (konfirmative Analyse) sowie
- Ergebnisse zu präsentieren und zu kommunizieren [57].

Das Ziel der Visualisierung ist es „geeignete visuelle Repräsentationen bereitzustellen, die einerseits dem Wissenschaftler ein geeignetes Hilfsmittel in die Hand geben, mit dem er innere, sonst verborgene Zusammenhänge aufdecken kann, und andererseits auch den Austausch von Arbeitsergebnissen (zu) unterstützen“ [57].

Die Visualisierungspipeline

Die heutige wissenschaftliche Visualisierung von Daten bezieht sich hauptsächlich auf große Datenmengen, wie sie in der Medizin zum Beispiel bei einer Magnetresonanztomographie

(MRT) entstehen. Die Erstellung einer Visualisierung auf Basis eines Datensatzes erfolgt anhand der Visualisierungspipeline, mit den Schritten *data acquisition*, *filtering*, *mapping* und *rendering* (siehe Abbildung 2.4) [18]. Am Beispiel der MRT wird die Visualisierungspipeline wie folgt durchlaufen: Nachdem die Daten mit dem MRT aufgenommen wurden (data acquisition), müssen zum Beispiel Pixel entfernt werden, die ein Rauschen in der grafischen Darstellung erzeugen würden (filtering). Anschließend werden die einzelnen Komponenten, wie beispielsweise Knochen und Weichgewebe, unterschiedlich eingefärbt (mapping). Die Komponenten werden nach dem Mapping auf einem Bildschirm ausgegeben (rendering).

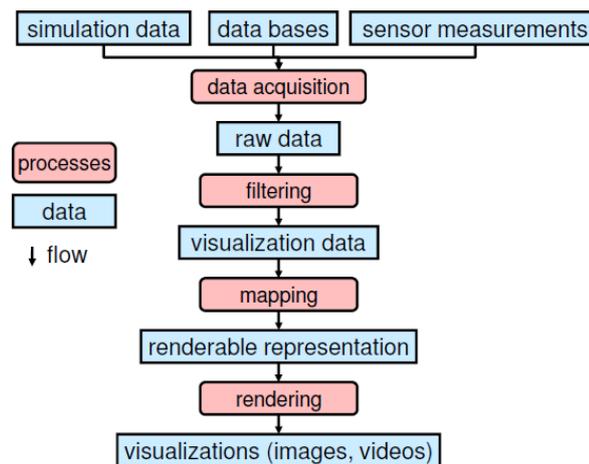


Abbildung 2.4: Die Visualisierungspipeline beschreibt die Schritte, welche beim Erstellen einer Visualisierung durchlaufen werden - *data acquisition*, *filtering*, *mapping* und *rendering* - und die Daten, die entstehen - Rohdaten, Visualisierungsdaten, berechenbare Repräsentationen und die fertige Visualisierung (z. B. Bilder oder Videos) [18].

2.1.3 Visual Information Seeking Mantra

Für die Erstellung einer Visualisierungssoftware hat Ben Shneiderman 1996 das Visual Information Seeking Mantra „Overview first, zoom and filter, then details-on-demand“ [58] aufgestellt (siehe Abbildung 2.5). Das Mantra soll den Benutzer in die Lage versetzen eine Visualisierung zu verstehen und mit ihr zu interagieren. Eine dem Mantra folgende Visualisierungssoftware soll Werkzeuge anbieten, um die folgenden Aufgaben zu unterstützen [58]:

Overview: Einen Überblick über die gesamte Datensammlung bekommen.

Zoom and filter: Heranzoomen von interessanten Einzelheiten und uninteressante Einzelheiten herausfiltern.

Details-on-demand: Eine Einzelheit oder Gruppe selektieren und Details erhalten.

History: Eine Historie der durchgeführten Aktionen anlegen, um Aktionen rückgängig zu machen oder wiederzugeben.

Relate: Verbindungen zwischen Einzelheiten erlangen.

Extract: Teilsammlungen der Anfrageparameter erhalten.



Abbildung 2.5: Das Visual Information Seeking Mantra von Ben Shneiderman dient als Richtlinie für die Entwicklung von Visualisierungssoftware [58].

2.1.4 Visualization Provenance

Visualization Provenance ist eine Unterform der Data Provenance (dt. Datenherkunft). Buneman et al. [8] definieren Data Provenance als „Herkunft von Daten und den Prozess den Daten durchlaufen, um in einer Datenbank gespeichert zu werden“. Aus diesem Begriff hat sich der Begriff Visualization Provenance abgeleitet, welcher beschreibt, wie eine Visualisierung entstanden ist. Hierfür gibt es verschiedene Systeme, welche unmittelbare Ergebnisse, den Herleitungsprozess und die dazugehörigen Meta-Informationen speichern [55].

2.2 Benutzerstudie

Abbildung 2.6 zeigt den generellen Ablauf einer Benutzerstudie. Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Abschnitte erläutert und beziehen sich auf die Bücher von O. Huber [28] und J. Bortz und N. Döring [64].

2.2.1 Fragestellung

Bei der Durchführung einer Benutzerstudie steht am Anfang eine Fragestellung, welche sich aus den aktuellen Forschungsthemen ableitet und die untersucht werden soll. Aus dieser Fragestellung wird eine konkret zu untersuchende Hypothese abgeleitet.

2.2.2 Hypothese

Eine Hypothese ist eine „vermutete Antwort auf eine Frage, d.h. eine beliebige Aussage, die man provisorisch für bestimmte Zwecke als wahr annimmt, auch wenn man nicht weiß, ob sie wirklich wahr ist oder nicht“ [28]. Die Entstehung einer Hypothese ist ein kreativer Prozess, der durch die aktuelle Forschungsarbeit beeinflusst wird. Hierbei kann es hilfreich sein, sich detaillierte Fallbeschreibungen zu überlegen oder Erkundungsuntersuchungen

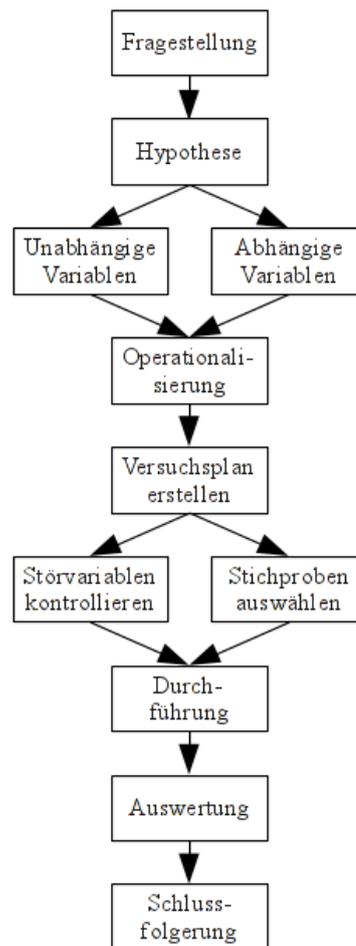


Abbildung 2.6: Ablauf einer Benutzerstudie von der Erstellung, über die Durchführung, bis zur Auswertung und dem Erstellen des Studienberichts [28].

durchzuführen, zum Beispiel passende Personen zu diesem Thema beobachten oder befragen. Aus diesen Fallbeschreibungen können Konditionalsätze abgeleitet werden, zum Beispiel: Wenn es regnet, dann ist die Straße nass. Aus einem solchen Konditionalsatz kann herausgelesen werden, was untersucht werden soll: der Zustand der Straße (abhängige Variable), wenn es regnet und wenn es nicht regnet (Merkmalsausprägung der unabhängigen Variable (siehe Abschnitt 2.2.3)).

Nach der Auswertung der Daten soll eine Hypothese entweder verifiziert oder falsifiziert werden. Bei der Verifizierung wird die Hypothese als wahr bewiesen, bei der Falsifizierung wird die Hypothese widerlegt. Um eine Hypothese verifizieren oder falsifizieren zu können, muss die Grundgesamtheit, d. h. „alle potentiellen Untersuchungsobjekte, über die etwas ausgesagt werden soll“ [64], untersucht werden. Da die Grundgesamtheit in den wenigsten Fällen untersucht werden kann, können Hypothesen häufig nur bestätigt werden. Ein Fehler, der bei der Untersuchung einer Hypothese deshalb nicht gemacht werden sollte, ist der Induktionsschluss. Beim Induktionsschluss wird „von einer begrenzten Anzahl spezieller

Ereignisse [...] unzulässiger Weise auf die Allgemeingültigkeit einer Theorie geschlossen“ [64].

Die Überprüfung einer Hypothese erfolgt dadurch, dass zuerst eine empirische Vorhersage getroffen wird. Eine empirische Vorhersage besagt, dass ein spezielles Ergebnis eintritt. Die empirische Vorhersage wird realisiert, indem überprüft wird, ob die in der Vorhersage formulierten Bedingungen erfüllt sind. Anschließend werden die Ergebnisse der Untersuchung mit der Vorhersage verglichen, um zu bestimmen, ob die Ergebnisse mit der Vorhersage übereinstimmen oder nicht. Zum Schluss wird das Ergebnis entweder akzeptiert oder abgelehnt (siehe Abbildung 2.7).

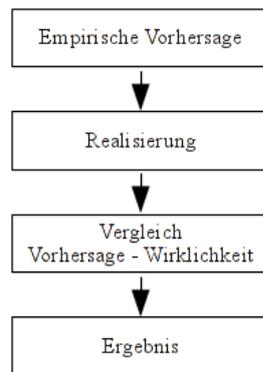


Abbildung 2.7: Überprüfung einer Hypothese. Zuerst wird eine empirische Vorhersage getroffen, diese wird realisiert, das Ergebnis wird anschließend mit der Vorhersage verglichen, um die Hypothese abzulehnen oder zu akzeptieren [28].

Kriterien und Bedingungen an eine Hypothese

Für die Untersuchung einer Hypothese müssen folgende Kriterien und Bedingungen der Hypothese gewährleistet sein:

Hoher empirischer Gehalt: Bei einer Hypothese mit hohem empirischen Gehalt gibt es viele Möglichkeiten, die Hypothese zu falsifizieren.

Strenge Prüfung: Wenn intensiv versucht wird die Hypothese zu falsifizieren, ist das Kriterium der strengen Prüfung erfüllt.

Widerspruchsfreiheit: Die Widerspruchsfreiheit ist gewährleistet, wenn für eine Hypothese nicht zugleich das eine und das logische Gegenteil davon gilt. Zum Beispiel wäre eine Hypothese mit Widerspruch, dass bei Einnahme einer Menge Alkohol die Reaktionszeit ansteigt und zugleich sinkt.

Kritisierbarkeit: Die Kritisierbarkeit ist gegeben, „wenn es mögliche Ergebnisse der Prüfung gibt, welche die Hypothese falsifizieren“ [28]. Dies wäre zum Beispiel der Fall, wenn die Hypothese aufgestellt werden würde, dass alle Menschen männlich sind.

Operationalisierbarkeit: Des Weiteren muss eine Hypothese operationalisierbar sein, d. h. „den Begriffen, die in der Hypothese vorkommen, müssen beobachtbare Daten zugeordnet werden können“ [28]. Für die Hypothese „es gibt mehr Katzen als Hunde auf der Welt“, könnte zum Beispiel eine Zählung aller Katzen und Hunde durchgeführt werden.

Arten von Hypothesen

In Hinblick auf die statistische Auswertung der gesammelten Daten für die Untersuchung einer Hypothese können zwei Arten von Hypothesen unterschieden werden:

Unterschiedshypothese: Die Unterschiedshypothese ist eine Hypothese, bei der sich zwei oder mehr Gruppen bezüglich eines Merkmals unterscheiden. Dies könnte beispielsweise sein, dass Studenten unterschiedlicher Fachrichtungen sich hinsichtlich ihrer durchschnittlichen Studiendauer unterscheiden. Die Gruppen wären dabei die unterschiedlichen Studenten der verschiedenen Fachrichtungen und das Merkmal wäre die Studiendauer.

Zusammenhangshypothese: Eine Zusammenhangshypothese ist eine Hypothese, bei der zwei oder mehr unterschiedliche Merkmale miteinander zusammenhängen. Ein Beispiel hierfür wäre, dass mit zunehmender Verkehrsdichte die Unfallhäufigkeit steigt. Merkmal eins wäre die Verkehrsdichte und Merkmal zwei die Unfallhäufigkeit.

2.2.3 Variablen

Nachdem eine Hypothese formuliert wurde, werden daraus die benötigten Variablen abgeleitet. Eine Variable ist „ein Symbol, das durch jedes Element einer spezifizierten Menge von Merkmalsausprägungen ersetzt werden kann“ [64]. Eine Merkmalsausprägung der Variable Geschlecht wäre zum Beispiel männlich und weiblich. Für die Untersuchung einer Hypothese werden dabei zwei Arten von Variablen unterschieden:

Unabhängige Variablen: Die unabhängigen Variablen, sind die Variablen, die während des Experiments geändert werden und somit zur Untersuchung der Hypothese gehören.

Abhängige Variablen: Die abhängigen Variablen sollten sich während einer Benutzerstudie nicht ändern. In ihr zeigen sich die Wirkungen der unabhängigen Variable.

Zum Beispiel wäre für die Hypothese „es gibt mehr Frauen als Männer in Deutschland,,,“ das Geschlecht eine unabhängige Variable und das Land eine abhängige Variable.

Störvariablen: Neben den abhängigen und unabhängigen Variablen gibt es noch die Störvariablen. Sie sind zwar auch eine Art abhängige Variable, aber während des Experiments wird versucht diese Variablen zu neutralisieren bzw. zu kontrollieren. Nicht zu kontrollierende Variablen heißen konfundierte Variablen.

Bei der Untersuchungssituation kann die Störvariable entweder durch Elimination, Konstanthaltung, Zufallsvariation oder Einführen einer Kontrollgruppe kontrolliert werden. Bei der Elimination wird die Störvariable komplett ausgeschaltet. Bei der Konstanthaltung wird versucht die Variable konstant zu halten. Bei der Zufallsvariation wird die Störvariable zufällig variiert. Die zufällige Variation sollte nicht parallel zur Variation der unabhängigen Variablen geschehen. Außerdem kann eine Kontrollgruppe eingeführt werden.

Auch bei den Stichproben können Störvariablen auftreten, zum Beispiel das Geschlecht beim Einteilen der Versuchspersonen auf Gruppen. Dies kann entweder durch Parallelisierung (matching) oder Randomisierung kontrolliert werden. Beim Parallelisieren wird die Störvariable bei allen Versuchspersonen gemessen und anhand dessen werden die Versuchspersonen gleichmäßig auf die Gruppen aufgeteilt. Bei der Randomisierung werden die Versuchspersonen bewusst zufällig auf die Gruppen aufgeteilt.

2.2.4 Operationalisierung

Die Operationalisierung der Hypothese erfolgt, indem den Begriffen der Hypothese messbare Werte zugeordnet werden, welche bei der Studie erhoben werden können. Die Erhebung der Daten kann über unterschiedliche Methoden geschehen:

- wissenschaftliche Beobachtung
- Verhaltensbeobachtung
- Befragung
- Test
- Analyse von Verhaltensspuren

Numerische Daten

Beim Messen numerischer Daten muss bekannt sein welchem Skalenniveau diese angehören. Dabei werden fünf Arten unterschieden:

Nominalskala: Daten der Nominalskala haben die Eigenschaften Reflexivität, Symmetrie und Transitivität. Die Daten können auf Gleichheit oder Verschiedenheit geprüft werden. Beispiele hierfür wären das Geschlecht oder die Blutgruppen. Diese Daten heißen auch qualitative Daten und können auf Normalverteilung geprüft werden (Begriffserklärung siehe Abschnitt 2.2.8).

Ordinalskala: Daten der Ordinalskala können neben den Eigenschaften, die für die Nominalskala gelten, auch mit größer und kleiner unterschieden werden und somit geordnet werden. Beispiel hierfür sind die Schulnoten. Statistische Verfahren hierfür sind unter anderem die Bestimmung des Median (Begriffserklärung siehe Abschnitt 2.2.8).

Intervallskala: Bei Daten der Intervallskala können Aussagen über den Abstand zweier Werte getroffen werden, es gibt keinen natürlichen Nullpunkt. Beispiel hierfür ist die Celsius-Temperaturskala. Als statistische Verfahren können alle eingesetzt werden, die auf dem arithmetischen Mittel beruhen, zum Beispiel der T-Test (Begriffserklärung siehe Abschnitt 2.2.8).

Rationalskala: Daten der Rationalskala haben einen natürlichen Nullpunkt und die Einheit ist willkürlich festgelegt, zum Beispiel die Kelvin-Temperaturskala. Es können alle statistischen Verfahren eingesetzt werden.

Absolutskala: Die Absolutskala hat neben einem natürlichen Nullpunkt auch eine vorgegebene natürliche Einheit. Der Skalenwert der Menge darf durch keine Transformation verändert werden. Beispiel hierfür ist die Anzahl der Elemente einer Menge. Hier können alle statistischen Verfahren eingesetzt werden.

Fragebögen

Neben dem Messen von numerischen Daten können Fragebögen für die Datenerhebung qualitativer Daten während der Benutzerstudie verwendet werden. Die am häufigsten eingesetzte Testskala ist die Likertskala. Hierfür werden Rating-Skalen zur Selbsteinschätzung verwendet, welche in fünf Rating-Skalen-Kategorien unterteilt werden. Ein Beispiel für eine fünf Rating-Skalen-Kategorie wäre:

- eindeutig zutreffend (1)
- zutreffend (2)
- weder zutreffend noch nicht zutreffend (3)
- nicht zutreffend (4)
- eindeutig nicht zutreffend (5)

Nasa TLX Fragebogen : Beispiel eines Fragebogens für die Empfindungen der Probanden während einer Aufgabe ist der von der Nasa entwickelte Nasa Task Load Index (TLX) [45]. Dieser soll das subjektive Empfinden von sechs Eigenschaften bei den Probanden erfassen:

- Geistige Anstrengung
- Körperliche Anstrengung
- Zeitliche Anstrengung
- Performanz
- Aufwand
- Frustration

Die Probanden können einen Wert zwischen 0 und 100 auswählen, wobei die Skala in Fünferschritten erfolgt (siehe Abbildung 2.8). Außerdem müssen die Probanden für alle Kombinationen zweier Eigenschaften entscheiden, welche davon wichtiger war. Auf diese Weise wird eine Gewichtung für die einzelnen Eigenschaften erlangt. Für die Auswertung wird der Durchschnitt der Eigenschaften jeweils gewichtet und aufsummiert. Daraus ergibt sich das gesamte Arbeitsaufkommen eines Probanden.

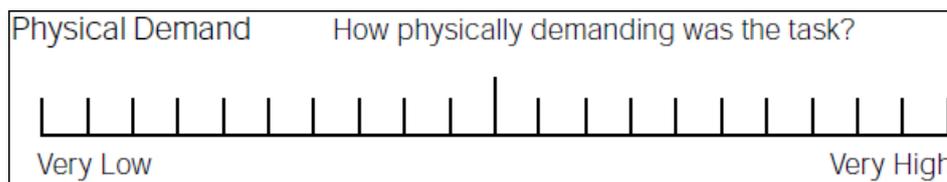


Abbildung 2.8: Die Eigenschaften müssen auf einer Skala zwischen 0 und 100 (Fünferschritte) bewertet werden [45].

2.2.5 Versuchsplan

Nachdem festgelegt wurde welche Daten während der Benutzerstudie gesammelt werden, wird der Versuchsplan aufgestellt. Hierfür muss entschieden werden, ob eine *between-subject* oder *within-subject* Benutzerstudie durchgeführt wird. Eine *between-subject* Benutzerstudie kann durchgeführt werden, wenn eine unabhängige Variable verschiedene Werte annehmen kann. Dabei werden die Versuchspersonen in Gruppen aufgeteilt und jede Gruppe führt die Benutzerstudie für einen der Werte der unabhängigen Variable durch. Bei *within-subject* Benutzerstudien führt jede Versuchsperson die gleiche Benutzerstudie mit den gleichen Werten durch [9]. Außerdem können verschiedene Arten von Experimenten unterscheiden werden:

Einteilung nach dem Ziel

Experimente bei denen das Ziel unterschieden wird, sind das Prüf-, das Vor- und das Erkundungsexperiment. Das Prüfexperiment untersucht eine oder mehrere Hypothesen. Beim Erkundungsexperiment werden Daten gesammelt, beispielsweise durch Beobachtung oder Befragung, um eine neue Hypothese zu entwickeln. Ein Vorexperiment wird zum Testen eines Experimentaufbaus verwendet. Es wird vor einem Experiment durchgeführt, um Fehler oder Probleme zu entdecken und zu beheben.

Einteilung nach dem Ort

Die Durchführung eines Experiments kann entweder in einem Labor oder in der natürlichen Umgebung der Versuchspersonen stattfinden. Laborexperimente haben den Vorteil, dass der Versuchsleiter die Störvariablen der Umgebung besser kontrollieren kann und die Operationalisierung der (un-)abhängigen Variablen besser durchgeführt werden kann. Ein Nachteil bei einem Experiment im Labor ist, dass die Generalisierung auf die natürliche Umgebung nicht stattgegeben ist. Dies ist beim Feldexperiment anders. Hier wird das Experiment in der natürlichen Umgebung der Versuchspersonen durchgeführt. Dabei ist die Kontrolle der Störvariablen schwieriger. Es sollte vorher geklärt werden, was das Ziel der Benutzerstudie ist und anhand dessen entschieden werden, ob ein Labor- oder Feldexperiment besser geeignet ist.

Einteilung nach der Anzahl der unabhängigen Variablen

Experimente mit einer einzelnen unabhängigen Variablen werden einfaktorielle Experimente genannt. Werden mehrere unabhängige Variablen untersucht, handelt es sich um ein mehrfaktorielles Experiment.

Einteilung nach der Anzahl der abhängigen Variablen

Wie bei den unabhängigen Variablen können auch bei den abhängigen Variablen zwischen einem Experiment mit einer abhängigen Variable (univariates Experiment) und mit mehreren abhängigen Variablen (multivariates Experiment) unterschieden werden.

Einteilung nach dem Versuchsplan

Können die Störvariable(n) kontrolliert werden, handelt es sich um ein echtes Experiment. Bei einem echten Experiment wird mindestens eine unabhängige Variable variiert. Können die Störvariable(n) nicht kontrolliert werden, handelt es sich um ein Quasi-Experiment.

2.2.6 Stichproben

Im nächsten Schritt müssen die Versuchspersonen (Stichproben) ausgewählt werden. Die Auswahl von Versuchspersonen kann entweder zufällig geschehen oder nicht. Spiegelt die Verteilung der Stichproben eine Variable wieder, ist die Stichprobe geschichtet. Tabelle 2.1 definiert die Bezeichnungen der Kombinationen bei der Stichprobenwahl.

	mit Zufallsauswahl	ohne Zufallsauswahl
mit Schichtung	Zufallsstichprobe mit Schichtung	Quotenstichprobe
ohne Schichtung	Zufallsstichprobe	anfallende Stichprobe

Tabelle 2.1: Bezeichnung der verschiedenen Stichprobenarten anhand der Kombination aus Stichproben mit und ohne Zufall und mit und ohne Schichtung [28].

2.2.7 Durchführung der Benutzerstudie

Die Durchführung wird in der Regel mit einer Begrüßung und Instruktion begonnen. Die Versuchspersonen müssen am Anfang der Benutzerstudie ihre Einwilligung zu den Bedingungen der Benutzerstudie geben. Beim Eyetracking ist es wichtig, dass die Versuchspersonen gute Sehfähigkeiten haben und nicht an Farbfehlsichtigkeiten leiden. Aufgrund dessen ist es sinnvoll einen Seh- und Farbtest durchzuführen. Wird bei der Auswertung dieser Tests festgestellt, dass die Versuchspersonen unter einer Sehschwäche oder Farbfehlsichtigkeit leiden, dürfen sie nicht in die Auswertung einbezogen werden. Müssen die Versuchspersonen bei der Benutzerstudie etwas anhören, sollte ein Hörtest zu Beginn durchgeführt werden. Anschließend werden die Störvariablen kontrolliert, indem die Eigenschaften der Versuchspersonen (Alter, Geschlecht, Nationalität, usw.) in einem Fragebogen erfasst werden. Die Benutzerstudie beginnt damit, dass die Versuchsperson eine Aufgabenbeschreibung erhält und durchliest. Nach einem Testdurchlauf führt die Versuchsperson die Aufgaben der Benutzerstudie durch. Eine subjektive Einschätzung der durchgeführten Aufgaben kann anschließend, zum Beispiel durch das Ausfüllen eines Nasa TLX Fragebogens (Abschnitt 2.2.4), vom Probanden erhalten werden. Zuletzt wird die Versuchsperson bezahlt und verabschiedet.

2.2.8 Auswertung

Nachdem ausreichend Versuchspersonen an der Benutzerstudie teilgenommen haben, beginnt die Auswertung der Daten. Hierfür müssen die Daten zuerst auf Fehler überprüft und anschließend codiert werden. Bei der Codierung müssen nicht-numerische Daten in ein numerisches Datum überführt werden, so dass diese mit den statistischen Auswertungsmethoden evaluiert werden können. Beispielsweise kann das männliche Geschlecht mit einer Null, das weibliche Geschlecht mit einer Eins codiert werden. Außerdem müssen die Daten organisiert werden, so dass die verschiedenen statistischen Auswertungsmethoden mit den

richtigen Daten ausgeführt werden. Für eine Eyetracking-Benutzerstudie werden neben den statistischen Auswertungen auch die Fixationen der Versuchspersonen untersucht. Hierfür können Areas of Interest definiert sowie Heatmaps, Scanpaths und andere Visualisierungen erstellt werden (siehe Abschnitt 2.4.8). Die statistischen Auswertungsmethoden werden in den folgenden Unterabschnitten erklärt. Zuerst werden Methoden der deskriptiven Statistik (Abschnitt 2.2.8) vorgestellt und anschließend die Methoden der Inferenzstatistik (Abschnitt 2.2.8). Für ausführliche Erklärungen und Formeln wird auf die Bücher von J. Bortz [5] und A. Quatember [52] verwiesen, auf denen dieser Abschnitt aufbaut.

Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik hilft anhand von Tabellen, Grafiken und Diagrammen Datensätze zu analysieren, um Häufigkeitsverteilungen, Fehler, Ausreißer, Tendenzen oder Korrelationen deutlich zu machen. Einige wichtige Diagrammartentypen werden im Folgenden vorgestellt.

Histogramm: Das Histogramm zeigt die Häufigkeitsverteilung der Daten an. Die X-Achse des Diagramms listet die einzelnen Kategorien auf, die Y-Achse zeigt die Häufigkeit der Messwerte innerhalb der Kategorie an. Abbildung 2.9 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Studiengänge bei einer durchgeführten Benutzerstudie. Anhand des Diagramms kann abgelesen werden, welche Studiengänge oft vertreten waren (Informatik und Softwaretechnik) und welche weniger oft (Linguistik, Technische Biologie, Physik und Ernährungstechnik).

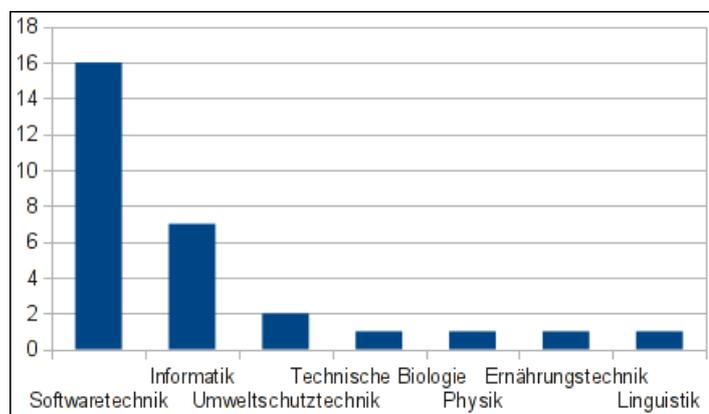


Abbildung 2.9: Histogramm über die Häufigkeitsverteilung der Studiengänge einer Benutzerstudie.

Stem-Leaf-Plot: Das Stem-Leaf-Plot (dt. Stamm-Blatt-Diagramm) zeigt, ähnlich wie das Histogramm, Häufigkeitsverteilungen von Daten an. Im Unterschied zum Histogramm enthält es die Daten als numerische Werte und stellt diese nicht grafisch dar. Der Stamm des Diagramms bilden die Merkmalskategorien, die Blätter enthalten die einzelnen Messwerte

innerhalb der Kategorien. Durch diese Darstellung werden Häufigkeiten besser als beim Histogramm ersichtlich (siehe Abbildung 2.10).

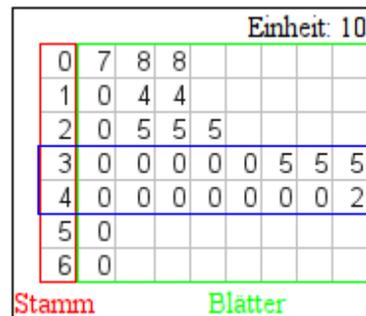


Abbildung 2.10: Stem-Leaf-Plot für die Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Computerarbeitszeit pro Woche von den Probanden einer Benutzerstudie. Den Stamm dieses Diagramms bilden die Kategorien für die Zehnerpotenzen (rot markiert), die Blätter sind die Einerpotenzen (grün markiert). Insgesamt gibt es 28 Blätter (28 Probanden). Davon haben 16 Probanden eine durchschnittliche Arbeitszeit von 30-40 Stunden (blau markiert).

Box-Plot: Box-Plot-Diagramme helfen bei der Auswertung der Daten, um zu ermitteln, ob Ausreißer möglicherweise Fehler sind. In einem Boxplot wird der Median der Daten sowie die mittleren 50% der Daten in einer Box dargestellt. Die Antennen (Whisker) bilden den 1,5-fachen Interquartilsabstand. Der Interquartilsabstand ist der Abstand zwischen dem Median und der unteren bzw. oberen Grenze der Box. Alle Daten, welche außerhalb der Whisker liegen, sind Ausreißer. Bei ihnen muss überprüft werden, ob es sich um einen Fehler handelt, zum Beispiel beim Abschreiben der Werte. Ist der Ausreißer kein Fehler, sollte dieser Proband bei der Auswertung ausgeschlossen werden, um zu vermeiden, dass die Daten nicht normalverteilt sind. Das Boxplot zeigt neben Ausreißern an, ob die Daten normalverteilt sind. Sind die Interquartilsabstände nicht gleich groß, kann darauf geschlossen werden, dass die zugrunde liegende Datenmenge nicht normalverteilt ist (siehe Abbildung 2.11).

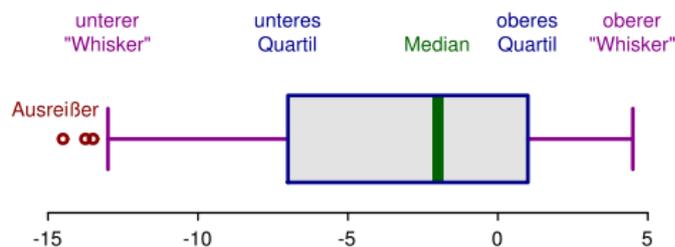


Abbildung 2.11: In einem Boxplot wird der Median, die Mittleren 50% der Daten (oberes und unteres Quartil) sowie der 1,5-fache Interquartilsabstand (oberer und unterer Whisker) angezeigt. Alle Daten, welche außerhalb des oberen oder unteren Whiskers liegen, sind Ausreißer [70].

Inferenzstatistiken

Im folgenden Abschnitt werden die Verfahren der Inferenzstatistik vorgestellt. Die Inferenzstatistik erlaubt es, dass aus den Daten einer Stichprobe auf die Grundgesamtheit geschlossen werden kann. Die Methoden der Inferenzstatistik kommen bei Unterschiedshypothese zum Einsatz.

Hypothesen in der Statistik: In der Statistik werden zwei Arten von Hypothesen unterschieden. Zum einen gibt es die Nullhypothese (H_0) und zum anderen die Alternativ- oder Einshypothese (H_1). Die Nullhypothese sagt aus, dass ein Zusammenhang nicht zutrifft. Die Nullhypothese ist so lange gültig bis es genügend Indizien dafür gibt, dass sie verworfen werden kann. Die zu prüfende Hypothese in einem statistischen Test wird als Einshypothese bezeichnet, da sie zeigt, dass ein Zusammenhang zutrifft. Die Hypothesen werden mit Hilfe von Stichproben und der im Folgenden vorgestellten Tests untersucht.

α -Fehler: Der α -Fehler wird begangen, wenn die Alternativhypothese akzeptiert wird, obwohl die Nullhypothese in der Population gilt. Der α -Fehler wird als Fehler 1. Art bezeichnet.

Signifikanzniveau α : Das Signifikanzniveau α legt die Obergrenze des α -Fehlers fest. In der Psychologie wird ein α -Wert kleiner 5% gewählt. Wird bei einem statistischen Test ein Ergebnis mit einer Wahrscheinlichkeit kleiner des Signifikanzniveaus berechnet, ist das Ergebnis signifikant und die Nullhypothese kann verworfen werden.

β -Fehler: Der β -Fehler ist die Wahrscheinlichkeit des Fehlers, wenn die Nullhypothese akzeptiert wird, obwohl die Alternativhypothese gilt. Er ist das Gegenstück zum α -Fehler und wird als Fehler 2. Art bezeichnet. Der β -Fehler wird in der Regel < 20% gewählt, je nach dem, wie gravierend ein Irrtum ist.

Mittelwert: Der Mittelwert einer Menge an Zahlen ist diejenige Zahl, die sich ergibt, wenn alle Zahlen der Menge aufsummiert werden und diese durch die Anzahl der Zahlen geteilt werden. Er drückt aus welchen Wert eine Zahlenmenge haben müsste, so dass alle Zahlen gleichmäßig aufgeteilt wären. Am bekanntesten ist der Mittelwert aus der Schule, wenn der Durchschnitt aller Noten einer Klausur berechnet wird. Der Sachverhalt wird klarer, wenn zum Beispiel der Mittelwert des Einkommens aller Menschen in Deutschland berechnet würde. Wäre das Einkommen auf alle Menschen gleich verteilt, d. h. jeder Mensch verdient gleich viel, wäre dies der Wert des Mittelwerts.

Median: Der Median ist der mittlere Wert einer geordneten Menge an Zahlen. Im Gegensatz zum Mittelwert haben Ausreißer auf den Median keinen Einfluss und er ist aussagekräftiger.

Standardabweichung s: Die Standardabweichung ist das Maß für die Streuung einer Menge an Zahlen. Sie berechnet sich als Wurzel über die Summe der quadrierten Abweichung der Zahlen einer Menge vom Mittelwert, dividiert durch die Anzahl der Menge an Zahlen. Sie drückt die Variabilität eines Datensatzes aus. Wären alle Werte gleich, wäre die Varianz und damit die Standardabweichung gleich Null.

Testen auf Normalverteilung: Eine Menge an Zahlen ist normalverteilt, wenn 68% (ca. $\frac{2}{3}$) der Zahlen zwischen dem Mittelwert und dem Mittelwert plus der Standardabweichung sowie minus der Standardabweichung liegen. Die Zahlen sind symmetrisch angeordnet und haben einen glockenförmigen Verlauf (siehe Abbildung 2.12). Um zu berechnen, ob eine Zufallsstichprobe normalverteilt ist, kann unter anderem der Chi-Quadrat-Test oder der Shapiro-Wilk-Test verwendet werden. Der Shapiro-Wilk-Test hat den Vorteil, dass er für Stichproben mit $N > 3$ verwendet werden kann. Er hat aber den Nachteil, dass er nur bis zu einer Stichprobengröße von $N < 5000$ angewendet werden kann.

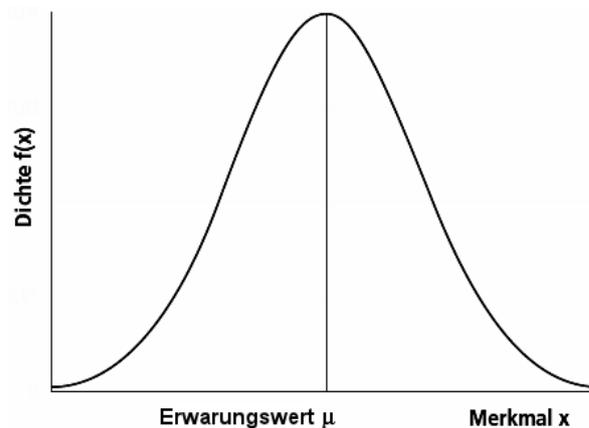


Abbildung 2.12: Normalverteilungskurve: sie ist symmetrisch und hat einen glockenförmigen Verlauf. 68% (ca. $\frac{2}{3}$) der Werte liegen dabei $-1s$ und $+1s$ vom Mittelwert entfernt [52].

T-Test

Soll eine Hypothese über den Mittelwert einer Stichprobe getestet werden und ist diese Stichprobe normalverteilt, ist die standardisierte Schätzfunktion des Stichproben-Mittelwerts nicht mehr normalverteilt, sondern t-verteilt. Hierfür muss ein T-Test durchgeführt werden. Dabei werden zwei Arten unterschieden, der Ein- und Zweistichproben T-Test. Der

Einstichproben T-Test ist für das Testen einer Hypothesen anhand einer Stichprobe, der Zweistichproben T-Test für zwei Stichproben. Werden beispielsweise zwei Methoden verglichen mit der Aussage Methode 1 ist besser als Methode 2, können die gemessenen Werte für jede Stichprobe über den Zweistichproben T-Test auf Ungleichheit getestet werden.

Einstichproben T-Test: Der Einstichproben T-Test prüft anhand des Mittelwerts einer Stichprobe die Hypothese, dass ein beliebiger Wert μ_0 ungleich dem Mittelwert μ der Grundgesamtheit ist. Dies kann entweder anhand eines zweiseitigen Tests mit $H_0 : \mu = \mu_0$ oder eines einseitigen Tests (rechtsseitig: $H_0 : \mu \leq \mu_0$ oder linksseitig: $H_0 : \mu \geq \mu_0$) getestet werden. Ist der berechnete Wert kleiner als das zuvor festgelegte Signifikanzniveau, kann die Nullhypothese verworfen werden.

Zweistichproben T-Test: Beim Zweistichproben T-Test wird geprüft, ob die Mittelwerte zweier Grundgesamtheiten verschieden sind. Dies wird, wie beim Einstichproben T-Test, anhand der Mittelwerte der beiden Stichproben überprüft. Abhängig davon, ob eine abhängige oder unabhängige Stichprobe vorliegt, müssen unterschiedliche Testverfahren angewendet werden.

Abhängige Stichproben: Abhängige Stichproben sind Stichproben für die gleichen Variablen, welche zu unterschiedlichen Zeiten gemessen wurden. Bei diesen gibt es, wie beim Einstichproben T-Test, die Möglichkeit einen einseitigen Test (rechtsseitig oder linksseitig) oder einen zweiseitigen Test durchzuführen. Das arithmetische Mittel ergibt sich hierbei durch die Differenz der Messwerte und es wird die Stichprobenstandardabweichung für die Berechnung verwendet.

Unabhängige Stichproben: Für unabhängige Stichproben, wird der Mittelwert zweier verschiedener Populationen verglichen. Die Standardabweichung ergibt sich dabei als gewichtetes Mittel beider Stichprobenvarianzen. Bei gleicher Standardabweichung gibt es, wie beim Einstichproben T-Test, die Möglichkeit einen einseitigen Test (rechtsseitig oder linksseitig) oder einen zweiseitigen Test durchzuführen. Bei unterschiedlicher Standardabweichungen wird der Welch-Test verwendet. Hier muss die t-Verteilung mit einer modifizierten Anzahl von Freiheitsgraden approximiert werden. Freiheitsgrade sind dabei unabhängig voneinander variierbar.

Varianzanalyse

Die Methoden der Varianzanalyse sind für Stichproben aus zwei oder mehr Gruppen mit mehreren Faktoren geeignet. Es werden ein- und mehrfaktorielle Varianzanalyse, uni- und multivariate Varianzanalyse sowie Varianzanalysen mit Messwiederholungen unterschieden.

Einfaktorielle und Mehrfaktorielle Varianzanalyse: Eine einfaktorielle Varianzanalyse testet den Einfluss einer unabhängigen Variable auf die abhängige(n) Variable(n). Die unabhängige Variable muss kategorial gestuft sein und jede Versuchsperson muss eindeutig einem Faktor zugeordnet werden können. Die Stufen der unabhängigen Variable werden mit p bezeichnet. Die Nullhypothese für eine einfaktorielle Varianzanalyse lautet $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_p$ die Alternativhypothese $H_1 : \mu_i \neq \mu_j$. Bei der mehrfaktoriellen Varianzanalyse wird der Einfluss mehrerer kategorialer unabhängiger Variablen auf die abhängigen Variablen untersucht.

Univariate und Multivariate Varianzanalyse: Bei der univariaten Varianzanalyse wird der Einfluss auf eine abhängige Variable untersucht, bei der multivariaten Varianzanalyse der Einfluss auf mehrere abhängige Variablen.

2.2.9 Schlussfolgerung

Anhand der statistischen Analyse muss entschieden werden, ob die empirische Vorhersage akzeptiert wird oder nicht. Wurde die Nullhypothese verworfen, kann die empirische Vorhersage akzeptiert werden und die Hypothese gilt als bestätigt. Wichtig bei der Schlussfolgerung ist, dass die Benutzerstudie replizierbar ist, d. h. dass unter gleichen Bedingungen das gleiche Ergebnis erreicht werden kann. Neben der Replizierbarkeit muss auch die Validität der Benutzerstudie überprüft werden. Es werden dabei die folgenden Arten unterschieden:

- **interne Validität:** Wie gut ist es gelungen die Störvariablen zu kontrollieren?
- **externe Validität:** Inwieweit kann das Ergebnis verallgemeinert werden?
- **Konstruktvalidität:** Welche Güte hat die Operationalisierung der unabhängigen und abhängigen Variablen?
- **Validität statistischer Schlussfolgerungen:** Ist die Anwendung des speziellen statistischen Verfahrens gerechtfertigt? [28]

2.2.10 Studienbericht

Am Ende jeder Benutzerstudie werden die Ergebnisse in einem Studienbericht festgehalten. O. Huber [28] gliedert den Studienbericht in die folgenden Kapitel:

- Einleitung und Theorie
- Methode
 - Versuchspersonen
 - Apparate und Materialien
 - Versuchsplan
 - Durchführung

- Ergebnisse
- Diskussion
- Literaturverzeichnis
- Zusammenfassung
- Literatur

2.3 Wahrnehmung

Um zu verstehen warum Eyetracking ein wichtiges Einsatzmittel bei der Untersuchung von Visualisierungen ist, wird in diesem Kapitel auf die Wahrnehmung des Menschen eingegangen. Hierfür wird zuerst erklärt was Wahrnehmung bedeutet, anschließend wird auf das menschliche Auge und die Verarbeitung von Reizen eingegangen. Zum Schluss wird das Konzept der präattentiven Wahrnehmung vorgestellt, das bei der Erstellung von Visualisierungen beachtet werden muss.

2.3.1 Perzeption

Wahrnehmung oder Perzeption kommt aus dem lateinischen (lat. perceptio [15]) und bedeutet erfassen [16]. Kognition (lat. cognitio) bedeutet im Gegensatz dazu Kennenlernen oder Erkennen [17]. Bei der Wahrnehmung handelt es sich um „den Prozess des Erfassens von Informationen“ [46]. Ware [68] beschreibt hierfür zwei Vorgehensstrategien: bottom-up und top-down.

Bottom-up

Bei der bottom-up Wahrnehmung wird visuelle Information aufgenommen, indem das Licht auf die Netzhaut des Auges fällt (der Aufbau des Auges wird in Abschnitt 2.3.2 beschrieben). Das einfallende Licht wird zuerst durch die Erkennung von Eigenschaften zu Mustern und anschließend zu Objekten umgewandelt.

Top-down

Beim top-down Ansatz wird die Wahrnehmung dadurch angetrieben, dass der Mensch ein Ziel erreichen will. Beim Betrachteten eines Objekts werden Muster zu Eigenschaften umgewandelt. Stimmen die Eigenschaften mit denen überein, die das gewünschte Ziel definieren, feuern entsprechende Neuronen.

2.3.2 Das Auge

Der Mensch nimmt etwa zehn Millionen bit/s über die Augen auf. Dies entspricht etwa 80% der von allen Sinnesorganen aufgenommenen Daten (siehe Tabelle 2.2) [74]. Aufgrund dessen ist es bei Benutzerstudien interessant die Augenbewegung zu untersuchen, um Informationen über das Verhalten eines Probanden zu erhalten.

Sinnesorgan	bit/s
Auge	10.000.000
Haut	200.000
Ohren	50.000
Geruch	100
Geschmack	10

Tabelle 2.2: Informationsaufnahme des menschlichen Gehirn in bit/s. Das Auge nimmt am meisten Informationen auf (ca. 80%) und ist deswegen für Untersuchungen der Wahrnehmung von Interesse [74].

Aufbau des Auges

Das kugelförmige Auge (siehe Abbildung 2.13) ist durch eine Lederhaut und im vorderen Teil durch die Hornhaut umschlossen und geschützt. Als zweite Schicht kommt nach der Lederhaut die Aderhaut, welche durch Blutgefäße das Auge versorgt. Die Aderhaut geht im vorderen Teil in die Iris (Regenbogenhaut) über, mit der Pupille in der Mitte.

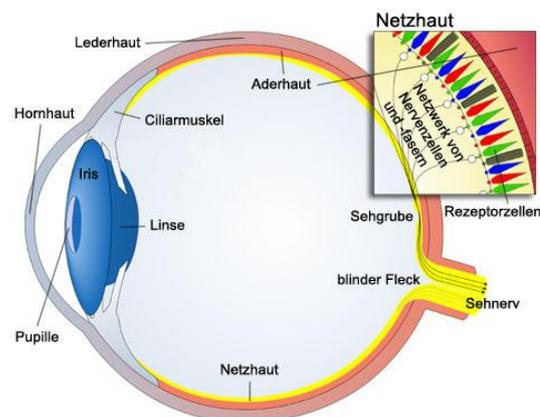


Abbildung 2.13: Aufbau des menschlichen Auges. Die Leder- und Hornhaut sind zum Schutz des Auges da. Über die Linse, Iris und den Ciliarmuskel wird das Licht gebündelt, so dass es durch die Pupille auf die Netzhaut trifft. Die Nervenfasern der Netzhaut mit den Stäbchen und Zapfen bündeln sich im blinden Fleck und führen über den Sehnerv in das Gehirn [21].

Der Hohlraum (Glaskörper) des Auges ist mit Kammerwasser gefüllt und sorgt für die Stabilität des Auges. Über den Ciliarmuskel kann die Linse hinter der Iris verändert werden. Dadurch wird das Licht gebündelt und trifft über die Pupille auf die Netzhaut (Retina) (siehe Abbildung 2.14). Gegenüber der Pupillenöffnung befindet sich die Sehgrube (Fovea), hier ist die lichtempfindlichste Stelle der Netzhaut. Die Netzhaut bedeckt die Innenwand des Auges und enthält die Zapfen und Stäbchen, wobei die Zapfen für das Farbsehen verantwortlich sind. Sie können in die drei Arten S- (blau), M- (grün) und L-Zapfen (rot) unterteilt werden. Die S-Zapfen nehmen die kurzen, die M-Zapfen die mittellangen und die L-Zapfen die langen Lichtwellen auf (siehe Abbildung 2.15). Die Stäbchen sind im Gegensatz zu den Zapfen für das Helligkeitsempfinden zuständig und deswegen für das Nacht- bzw. Dämmersehen verantwortlich. Die elektrischen Impulse, die von den Stäbchen und Zapfen generiert werden, werden über gebündelte Nervenfasern (Sehnerv) in das Gehirn übermittelt. Die Austrittsstelle des Sehnervs wird blinder Fleck genannt, da an dieser Stelle keine Rezeptorzellen vorkommen. Im Gehirn wird das Licht in ein Bild umgewandelt und weiter verarbeitet [22].

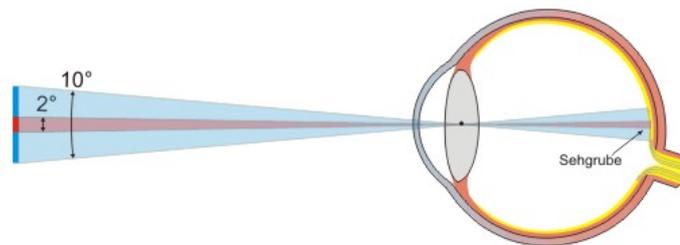


Abbildung 2.14: Die Lichtstrahlen werden über die Linse gebündelt und treffen je nach Größe auf unterschiedlich große Bereiche der Sehgrube des Auges [23].

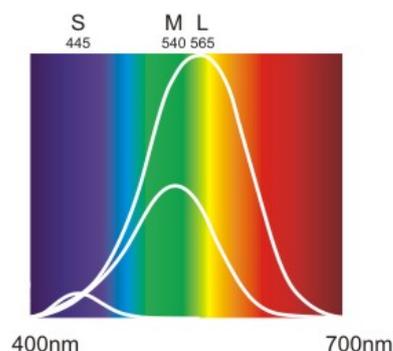


Abbildung 2.15: Farbspektrum der S-, M- und L-Zapfen. Die blauen S-Zapfen reagieren auf kurze (445 nm), die grünen M-Zapfen auf mittellange (540 nm) und die roten L-Zapfen auf lange (565 nm) Lichtwellen [24].

Farbfehlsichtigkeiten

Bei etwa 10% der männlichen Bevölkerung und 1% der weiblichen Bevölkerung kann es zu Farbfehlsichtigkeiten kommen [56]. Ihnen fehlen ein oder mehrere Zapfenarten oder sind in verminderter Anzahl vorhanden [27]. Fehlen die Zapfen der langen Wellenlängen handelt es sich um Protanopia, fehlen die Zapfen der mittellangen Wellenlängen handelt es sich um Deuteranopia [67]. In beiden Fällen kann nicht zwischen rot und grün unterschieden werden und man sieht ein unterschiedlich graues oder gelbes Bild [56]. Aufgrund des Vorkommens von Farbfehlsichtigkeit bei Menschen ist es wichtig vor einer Benutzerstudie Seh- und Farbttests durchzuführen, um zu gewährleisten, dass alle Probanden die Stimuli richtig erkennen können.

2.3.3 Verarbeitung von Reizen

Damit das Gehirn bei der Informationsaufnahme nicht überlastet wird, werden Informationen gefiltert und die wichtigsten Informationen über die Sinnesorgane aufgenommen. Die Informationen werden zuerst im Ultrakurzzeitgedächtnis (UZG) verarbeitet. Werden innerhalb von zehn Sekunden keine Verknüpfungen mit gespeicherten Informationen im Gehirn oder mit dem zu erreichenden Ziel erstellt, wird die Wahrnehmung ignoriert und verschwindet aus dem UZG. Wird eine Verknüpfung der Information mit dem Gehirn hergestellt, wandern sie in das Kurzzeitgedächtnis (KZG). Hier können Informationen mehrere Stunden gespeichert werden, es können gleichzeitig aber nur wenige Informationen aufgenommen werden. Verankert sich eine Information im Gehirn, landet sie im Langzeitgedächtnis (LZG). Informationen können nicht vergessen werden, wenn sie im LZG gespeichert wurden, es fehlen lediglich die Verbindungen [56]. Der Prozess vom Reiz bis zur Reaktion wird in Abbildung 2.17 schematisch beschrieben.

2.3.4 Präattentiv

Als präattentive Wahrnehmung wird das unterschwellige Wahrnehmen von Objekten bezeichnet. Objekte, welche innerhalb von 200-250 ms wahrgenommen werden, zählen zur präattentiven Wahrnehmung. Diese unterscheiden sich in Farbe, Form, Bewegung, Kontrast oder Größe von den anderen Objekten [68]. Abbildung 2.16 zeigt drei verschiedene Bilder, bei denen ohne große Mühe sofort die Objekte gesehen werden können, die nicht zu den anderen passen (gelber Kreis, horizontale Linie und blaues Dreieck).

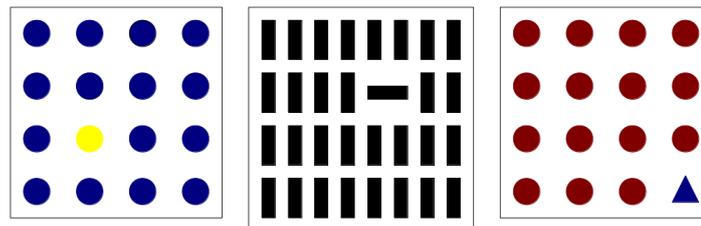


Abbildung 2.16: Der gelbe Kreis, die horizontale Linie und das blaue Dreieck „springen“ einem Betrachter sofort ins Auge, dies wird als präattentive Wahrnehmung bezeichnet.

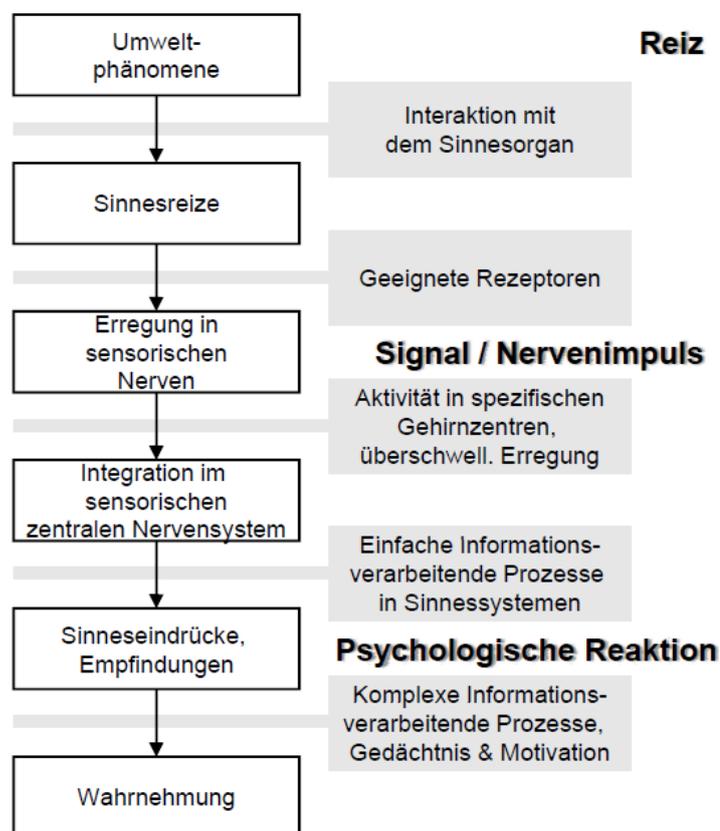


Abbildung 2.17: Die Verarbeitung der Sinnesreize. Die Sinnesreize werden durch Phänomene aus der Umwelt stimuliert. Anschließend werden die entsprechenden Rezeptoren erregt und ein Signal an die entsprechende Stelle im sensorischen Nervensystem geschickt. Dadurch werden Empfindungen und Sinneseindrücke geweckt, welche zu einer Wahrnehmung der Umweltphänomene führen [56].

2.4 Eyetracking

Damit der Mensch ein Objekt betrachten kann, muss er sein Auge durch Augenbewegungen ausrichten, so dass das Objekt direkt auf die Fovea trifft. Dies hat zur Folge, dass der Mensch seine visuelle Aufmerksamkeit auf das zu betrachtende Objekt richtet. Dieser Zusammenhang und die Technik, die hinter der Beobachtung der Augenbewegung steckt, wird im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

2.4.1 Geschichte des Eyetrackings

Der Zusammenhang zwischen der Augenbewegung und der visuellen Aufmerksamkeit des Menschen wird seit Jahrhunderten untersucht. Erste Untersuchungen dieses Phänomens wurden unter anderem 1878 von Emile Javal durchgeführt. Er beobachtete die Augenbewegung beim Lesen eines Textes und fand heraus, dass die Probanden beim Lesen einer Zeile nach zehn Zeichen eine Pause einlegten. Er vermutete, dass dies dem Informationsgehalt entspricht, den ein Mensch aufnehmen kann. 1930 untersuchten Miles Tinker und seine Kollegen das Leseverhalten, indem sie die Schriftart, Schriftgröße und das Seitenlayout des zu lesenden Textes veränderten [33]. Edmund Huey verfasste 1968 das Buch „The psychology of reading“ in welchem er das Leseverhalten von Menschen weiter untersuchte. Er fand heraus, dass ein Mensch jede Zeile eines Textes liest, indem er viele kurze Bewegungen von links nach rechts macht. Am Ende einer Zeile bewegt der Mensch seine Augen in einer einzigen Bewegung nach links an den Anfang der neuen Zeile [29].

Im Gegensatz zu Texten existierten keine klar definierten Strategien, wie Menschen ein Bild betrachten. Deshalb untersuchte Alfred L. Yarbus 1967 die Augenbewegungen bei Probanden, die das Bild „An unexpected return“ von Ilya Repin anschauen mussten. Die Probanden sollten dabei verschiedene Fragen beantworten bzw. Aufgaben durchführen [71]. Abbildung 2.18 zeigt die Augenbewegungen für die Aufgaben

1. freie Betrachtung,
2. beschreiben der Lebensverhältnisse der Familie und
3. herausfinden des Alters der Personen.

Er fand dabei heraus, dass es keine eindeutige Strategie gibt ein Bild zu betrachten, sondern die Strategie unter anderem davon abhängt, welche Aufgabe den Probanden gestellt wird.

In den 1970er Jahren wurde der Fokus der Eyetracking-Benutzerstudien noch mehr auf die Zusammenhänge zwischen den Augenbewegungen und der kognitiven Aktivität des Menschen gelegt. Psychologen wollten die Zusammenhänge zwischen der Augenbewegung und der Aufmerksamkeit des Menschen herausfinden. Als in den 80er Jahren der Computer in den Wohnungen der Menschen Einzug hielt, gab es erstmalig Eyetracking-Benutzerstudien, die sich mit der Mensch-Rechner-Interaktion beschäftigten. Dabei war vor allem von Interesse, wie Menschen bei der Suche in einem Computermenü vorgehen. Außerdem wurde

untersucht, wie Eyetracking als Eingabemedium für behinderte Menschen verwendet werden kann [33].

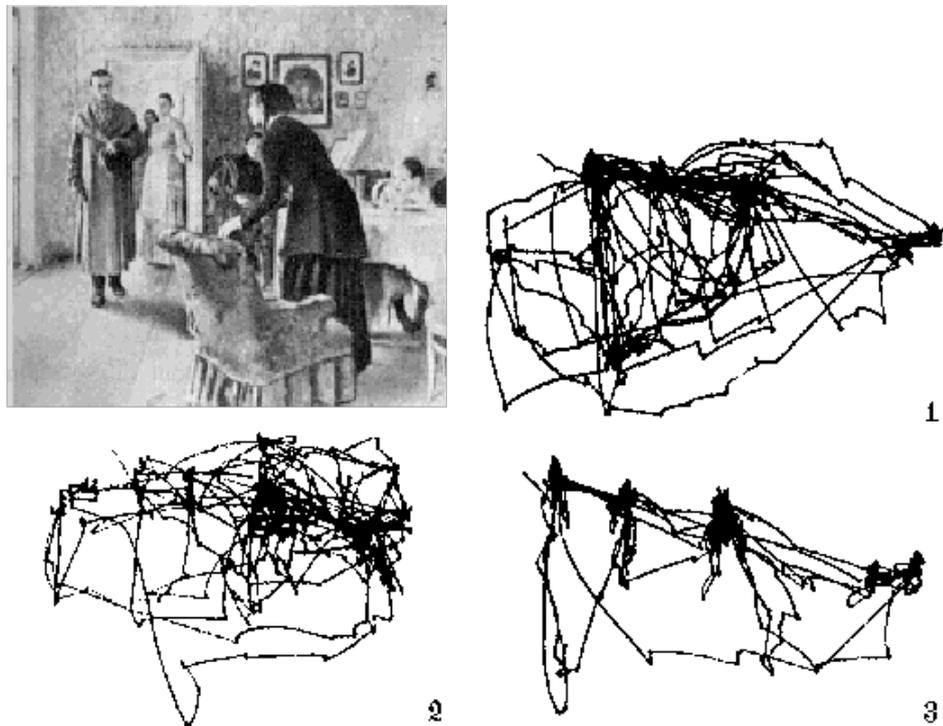


Abbildung 2.18: „An unexpected return“ von Ilya Repin, dazu die Augenbewegungen eines Probanden, welcher verschiedene Aufgaben durchführen musste. Zuerst durften der Proband das Bild frei betrachten. Anschließend sollte er die Lebensverhältnisse der Familie beschreiben und herausfinden welches Alter die Personen haben [71].

Die unterschiedlichen Aufgabentypen, welche im letzten Jahrhundert erforscht wurden, hatten dabei einen direkten Zusammenhang mit dem Stand der Technik der Eyetracking-Geräte. Die ersten Eyetracker hatten noch direkten mechanischen Kontakt mit der Hornhaut. 1901 wurde von Dodge und Cline ein Eyetracker entwickelt, welcher keinen direkten Kontakt mehr mit dem Auge hatte, sondern über die Reflexion des Lichts von der Hornhaut die Augenbewegung messen konnte (siehe Abschnitt 2.4.5). Dieser Eyetracker konnte die horizontale Position der Augen messen, indem das Licht auf eine Fotoplatte projiziert wurde. Dieser hatte außerdem zur Bedingung, dass der Proband seinen Kopf nicht bewegen durfte. 1905 entwickelten McAllister und Steel einen Eyetracker, welcher über Filmfotographie die Augenbewegung in horizontaler und vertikaler Richtung messen konnte. 1948 entwickelten Hartridge und Thompson den ersten Head-Mounted Eyetracker und die Probanden mussten ihren Kopf nicht mehr komplett still halten [33].

2.4.2 Augenbewegungen des Menschen

Die Augen werden durch die sechs am Augapfel befestigten Muskeln bewegt. Joos et al. [34] unterteilen die Augenbewegungen in drei Klassen:

- Bewegungen des Auges, die ein Verschieben der Information auf der Retina verhindern: Fixation
- Zielsuchende Bewegungen des Auges zur Ausrichtung der Fovea auf Sehobjekte: Sakkade
- Mikrobewegungen des Auges: Drift, Tremor, Mikrosakkade

Fixation

Fokussiert das Auge ein Objekt, bewegt es sich fast nicht mehr. Diese Augenbewegung wird als Fixation bezeichnet und dauert 250-300 ms. In dieser Zeit werden die Informationen von der Retina über die Fovea an das Gehirn geschickt. Abbildung 2.19 beschreibt einen Ablauf einer Fixation. Dabei werden drei Prozesse durchlaufen: Verschlüsselung der visuellen Information, Betrachtung des peripheren Sichtfelds und Planung der nächsten Sakkade [26].

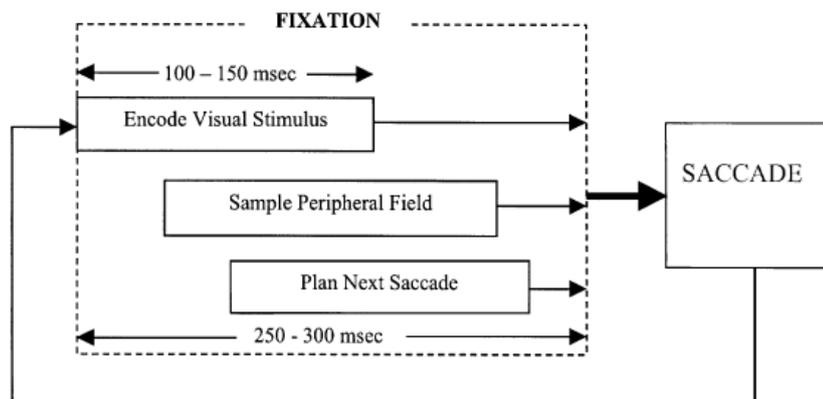


Abbildung 2.19: Prozesse, welche während einer Fixation durchlaufen werden: Zuerst wird die visuelle Information verschlüsselt, dann wird das periphere Umfeld betrachtet und zuletzt wird die nächste Sakkade geplant [26].

Sakkade

Schnelle Augenbewegungen werden als Sakkaden bezeichnet. Sakkaden dauern 150-250 ms und werden ausgeführt, wenn der Mensch versucht ein Objekt in das Sichtfeld zu bekommen bzw. wenn der Fokus auf ein neues Objekt gerichtet wird. Während eine Sakkade ausgeführt wird, werden keine Informationen an das Gehirn weitergeleitet, d. h. das visuelle Wahrnehmungsvermögen ist eingeschränkt (sakkadische Suppression) [34].

Mikrobewegungen des Auges

Um ein fokussiertes Objekt betrachten zu können, muss das Auge Mikrobewegungen durchführen. Dies liegt daran, dass die Nervenzellen des Auges primär auf Veränderungen reagieren. Würde sich das Auge nicht bewegen, würde ein fixiertes Objekt vor den Augen „verschwinden“. Damit dies nicht passiert, gibt es drei Arten, um das Objekt im Fokus zu behalten: Drift, Tremor und Mikrosakkaden. Der Drift ist eine Bewegung des Auges weg vom Fixationsort. Mikrosakkaden werden durchgeführt, damit das Objekt während dem Drift nicht aus dem Sichtfeld verschwindet. Der Tremor ist eine Zitterbewegung, die ähnlich, wie der Drift, dafür sorgt, dass beim Fokussieren eines Objekts unterschiedliche Sehzellen aktiviert werden. Diese Mikrobewegungen werden beim Eyetracking zu einem Gazepoint zusammengefasst [34].

2.4.3 Datentypen einer Eyetracking-Benutzerstudie

Aus den in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen Augenbewegungen lassen sich verschiedene Datentypen ableiten, welche für eine Eyetracking-Benutzerstudie interessant sein können. Die wichtigsten Datentypen sind Gazes, Scanpath, Areas of Interest sowie die Pupillengröße und die Blinzelrate.

Stimulus

Der Stimulus bei einer Eyetracking-Studie ist das Objekt, welches der Benutzer betrachtet. Er kann ein Bild, ein Video, eine Webseite oder eine Benutzeroberfläche sein.

Area of Interest

Eine Area of Interest (AOI) ist ein Bereich in einem Stimulus. Dieser Bereich kann von besonderem Interesse für die Benutzerstudie sein und im Voraus definiert werden oder im Nachhinein, anhand der Daten aus der Benutzerstudie. Die AOI wird für die Auswertung der Benutzerstudie mit einem Namen versehen.

Gaze

Mehrere zeitlich nacheinander durchgeführte Fixationen können zu einer Gaze zusammengefasst werden. Eine Gaze bezieht sich auf Fixationen, welche innerhalb einer AOI liegen.

Scanpath

Die Sequenz von Fixationen und Sakkaden für einen Stimulus werden als Scanpath bezeichnet [48]. Der Scanpath kann nach Abschluss der Eyetracking-Aufnahme visualisiert werden, um die gesamte Sequenz der Augenbewegungen eines Probanden zu betrachten. Hierbei kann unter anderem die Dauer einer Fixation visualisiert werden, indem Fixationen als Kreis dargestellt werden. Große Kreise sind Fixationen mit einer längeren Dauer als kleine Kreise. Der Scanpath eines Probanden gibt Aufschluss über die Reihenfolge sowie die Strategie eines Probanden und kann mit Scanpaths anderer Probanden verglichen werden (siehe Abbildung 2.20).

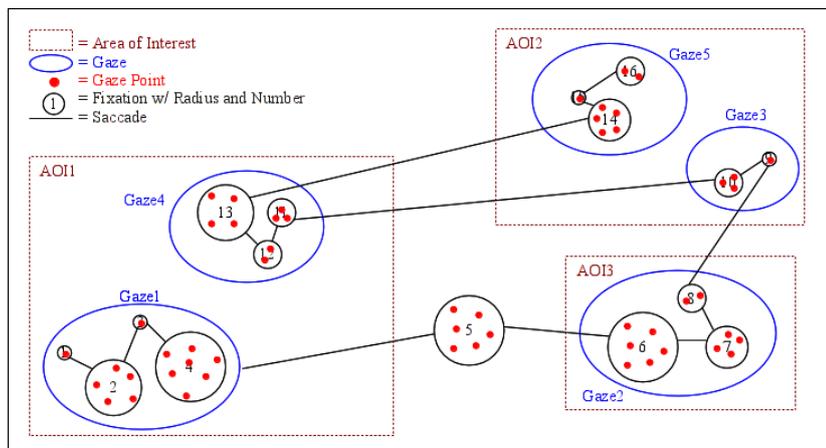


Abbildung 2.20: Beispiel eines Scanpaths mit AOIs, Gazes, Fixationen und Sakkaden.

Pupillengröße und Blinzelrate

Für die Auswertung einer Benutzerstudie kann die Pupillengröße und die Blinzelrate Auskunft über die kognitive Auslastung eines Probanden geben. Ein Proband, der viel blinzelt, kann zum Beispiel Ermüdungserscheinungen aufweisen und somit weniger konzentriert eine Aufgabe ausführen [7]. Da die Blinzelrate und Pupillengröße durch andere Faktoren beeinflusst wird, kann die Interpretation dieser Daten schwierig sein [48].

2.4.4 Metriken für eine Eyetracking-Benutzerstudie

Die bei einer Eyetracking-Benutzerstudie aufgenommenen und in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen Daten können während der Analysephase der Benutzerstudie anhand unterschiedlicher Metriken ausgewertet werden. Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über verschiedene Metriken. Die Metriken können in verschiedene Klassen eingeteilt werden: Fixationen (Tabelle 2.3), Sakkaden (Tabelle 2.4), Scanpaths (Tabelle 2.5), Gazes (Tabelle 2.6), AOIs (Tabelle 2.7) und sonstige Merkmale (Tabelle 2.8).

Diese Metriken beziehen sich auf die Arbeiten von Jacob [33] und Poole [48].

Metrik	Beschreibung	Einheit
Fixationsdauer	Längste Fixationsdauer eines Probanden, in Millisekunden gemessen.	ms
Fixationsdauer in jeder AOI	Summe der Zeiten aller Fixationen innerhalb einer AOI, in Millisekunden gemessen.	ms
Fixationsrate	Anzahl Fixationen pro Sekunde.	#/s
Fixationsrate in jeder AOI	Anzahl der Fixationen pro Sekunde in einer AOI.	#/s
Fixationsanzahl	Anzahl aller Fixationen für einen Stimulus.	#
Fixationsanzahl in jeder AOI	Anzahl aller Fixationen in einer AOI.	#
Räumliche Verteilung von Fixationen	Fläche, welche die Positionen der Fixationen einnehmen.	Pixel ²
Fixationswiederholungen (Post-target Fixation)	Anzahl der Fixationen, die durchgeführt werden, nachdem das Zielobjekt fixiert wurde.	#
Fixationsprozentsatz in jeder AOI	Prozentualer Anteil der Fixationen in jeder AOI gemessen anhand aller Fixationen.	%
Anzahl ungewollter Fixationen	Anzahl Fixationen welche kürzer als 240 ms sind.	#
Anzahl gewollter Fixationen	Anzahl Fixationen welche länger als 320 ms dauern.	#
Verhältnis Fixationen zu Sakkaden	Das Verhältnis der Fixationen zu den Sakkaden, kann in Millisekunden gemessen werden oder durch die Anzahl angegeben werden.	ms oder #
Fixationen vor jeder AOI	Anzahl der Fixationen, bevor eine AOI fixiert wird.	#
Erste Fixation	Dauer bis zur ersten Fixation, in Millisekunden gemessen.	ms
Erste Fixationsdauer	Dauer der ersten Fixation, in Millisekunden gemessen.	ms
Zeit bis zur ersten Fixation jeder AOI	Zeit bis eine AOI zum ersten Mal fixiert wird, in Millisekunden gemessen.	ms
Zeit bis zur ersten Fixation der Ziel-AOI	Zeit bis der Proband die gewünschte Ziel-AOI fixiert, in Millisekunden gemessen.	ms

Tabelle 2.3: Metriken für Fixationen (vgl. [33] und [48]). Legende: ms = Millisekunden, # = Anzahl, % = Prozent

Metrik	Beschreibung	Einheit
Sakkadenanzahl	Die Anzahl der Sakkaden pro Millisekunde werden gezählt.	ms
Sakkadengeschwindigkeit	Die durchschnittliche Geschwindigkeit der Sakkaden, in Winkelgrad pro Millisekunde gemessen.	° / ms
Sakkadendauer	Die durchschnittliche Dauer einer Sakkade, in Millisekunden gemessen.	ms
Sakkadenrichtung	Die Richtung der Sakkade in Grad gemessen. 0° ist dabei die horizontale Achse.	°
Sakkadenamplitude	Die Größe der Sakkade in Winkelgrad gemessen.	°
Sakkadenumfang	Der Umfang einer Sakkade, in Pixel gemessen. Der Umfang wird dabei als Kreis um die Sakkade gemessen.	Pixel
Anzahl der rückläufigen Sakkaden	Wenn sich eine Sakkade um mehr als 90° zu der vorherigen Sakkade ändert, wird die Sakkade als rückläufige Sakkade bezeichnet.	#

Tabelle 2.4: Metriken für Sakkaden (vgl. [33] und [48]). Legende: ms = Millisekunden, # = Anzahl, ° = Grad, mm = Millimeter

Metrik	Beschreibung	Einheit
Scanpathdauer	Die gesamte Dauer der Fixationen und Sakkaden für eine Aufgabe, in Millisekunden gemessen.	ms
Scanpathlänge	Die Länge aller Sakkaden, in Pixel gemessen, werden aufsummiert.	Pixel
Scanpathfläche	Die konvexe Hülle die der Scanpath aufspannt, in Pixel gemessen.	Pixel
Räumliche Dichte	Über den Scanpath wird ein Pixelgitter gelegt. Die räumlich Größe lässt sich aus der Anzahl der Fixationen des Scanpaths geteilt durch die Fläche des Pixelgitters berechnen.	Fixationen/ Pixel

Tabelle 2.5: Metriken für den Scanpath (vgl. [33] und [48]). Legende: ms = Millisekunden

Metrik	Beschreibung	Einheit
Gazedauer für jede AOI	Dauer der Gazes in einer AOI, in Millisekunden gemessen.	ms
Gazeanzahl für jede AOI	Gesamte Anzahl der Gazes für jede AOI.	#
Gazerate für jede AOI	Anzahl der Gazes pro Sekunde für jede AOI.	#/s
Prozentualer Anteil Gazes für jede AOI	Prozentualer Anteil der Gaze jeder AOI gemessen an der Gesamtzeit.	%
Gazewahrscheinlichkeit für jede AOI	Wahrscheinlichkeit, ob ein Gaze in einer AOI stattfindet.	-

Tabelle 2.6: Metriken für den Gaze (vgl. [33] und [48]). Legende: ms = Millisekunden, # = Anzahl, s = Sekunden, % = Prozent, - = keine Einheit vorhanden

Metrik	Beschreibung	Einheit
Betrachtungsdauer	Gesamtzeit aller Fixationen innerhalb einer AOI, in Millisekunden gemessen.	ms
Betrachtungsanzahl	Anzahl, wie oft ein Proband eine AOI fixiert hat.	#
Prozentualer Anteil der Zeit in jeder AOI	Prozentualer Anteil der Gesamtzeit, welche in der AOI verbracht wird.	%
Pupillengröße in jeder AOI	Größe der Pupille in der AOI, in Millimeter gemessen.	mm
Übergangswahrscheinlichkeit zwischen AOIs	Wahrscheinlichkeit für den Übergang zwischen den einzelnen AOIs.	-
Übergangsdichte	Anzahl der Übergänge zwischen den einzelnen AOIs.	ρ
Prozentsatz für erste AOI	Wahrscheinlichkeit, dass eine AOI als erstes betrachtet wird.	-
Anzahl an AOIs, die fixiert wurden	Anzahl der AOIs, die insgesamt betrachtet wurden.	#
AOI Anzahl	Anzahl der Besuche einer AOI.	#
1./2./3. AOI	Anzahl, wie oft jede AOI als erstes/zweites/drittes fokussiert wurde.	#
Anzahl AOIs vor AOI	Anzahl betrachteter AOIs vor einer bestimmten AOI.	#
Probandenanzahl für jede AOI	Anzahl Probanden, die eine AOI angeschaut haben.	#

Tabelle 2.7: Metriken für AOIs (vgl. [33] und [48]). Legende: % = Prozent, mm = Millimeter, # = Anzahl, - = keine Einheit vorhanden

Metrik	Beschreibung	Einheit
Pupillendurchmesser	Pupillendurchmesser für einen Stimulus, in Millimeter gemessen.	mm
Anzahl Pupillenbewegungen	Anzahl aller Pupillenbewegungen für einen Stimulus.	#
Blinzelrate	Anzahl der Lidschläge pro Minute.	#/min
Fertigstellungszeit	Die Zeit, die ein Proband braucht, um eine Aufgabe zu erfüllen, in Millisekunden gemessen.	ms
Fertigstellungsprozensatz	Prozentualer Anteil an Probanden, die eine Aufgabe erfolgreich durchführen.	%
Anzahl Fehler	Durchschnittliche Anzahl der Fehler, die bei einer Aufgabe gemacht wurden.	#
Fehlertypen	Arten der Fehler, die bei einer Aufgabe gemacht wurden.	-
Probandenprozensatz	Prozensatz der Probanden die mindestens einmal eine bestimmte AOI fixiert haben.	%

Tabelle 2.8: Metriken für sonstige Eyetracking-Daten (vgl. [33] und [48]). Legende: mm = Millimeter, # = Anzahl, min = Minuten, ms = Millisekunden, % = Prozent, - = keine Einheit vorhanden

2.4.5 Eyetracking-Methoden

Beim Eyetracking gibt es mehrere Arten, die Augenbewegung zu erfassen. Es kann entweder die Augenposition im Raum gemessen werden (point-of-regard) oder es wird die Augenbewegung relativ zum Kopf gemessen. Bei der ersten Methode gibt es nur die Videookulographie [13]. Die drei wichtigsten Arten der zweiten Methode sind:

- Elektrookulographie (EOG)
- Sclera Kontaktlinse
- Videookulographie (VOG)

Elektrookulographie

Da das Auge einen elektrischen Dipol bildet, kann durch Anbringung von jeweils vier Elektroden um das Auge die Augenbewegung gemessen werden (siehe Abbildung 2.21). Die Hornhaut ist dabei der positive Pol und die Netzhaut der negative Pol. Wenn das Auge sich bewegt, kommt die Vorderseite des Auges dem einen elektrischen Pol, die Hinterseite des Auges dem anderen elektrischen Pol entgegen. Dadurch entsteht eine Spannungsdifferenz, die an den Augenmuskeln gemessen werden kann. Das gemessene Potential kann zwischen 15 und 200 μV liegen. Die horizontale Augenbewegung wird über die Elektroden links

und rechts am Auge gemessen, die Elektroden über- und unterhalb des Auges messen die vertikale Bewegung. Die Elektrookulographie hat eine Genauigkeit von $\pm 1,5 - 2^\circ$. Das Problem dieser Methode ist, dass es zu Muskelartefakten, Augenlidbeeinflussung, Nichtlinearität der Methode und Unterschiede im Potential auf Grund von Lichtadaption oder ähnlichem kommen kann [73].

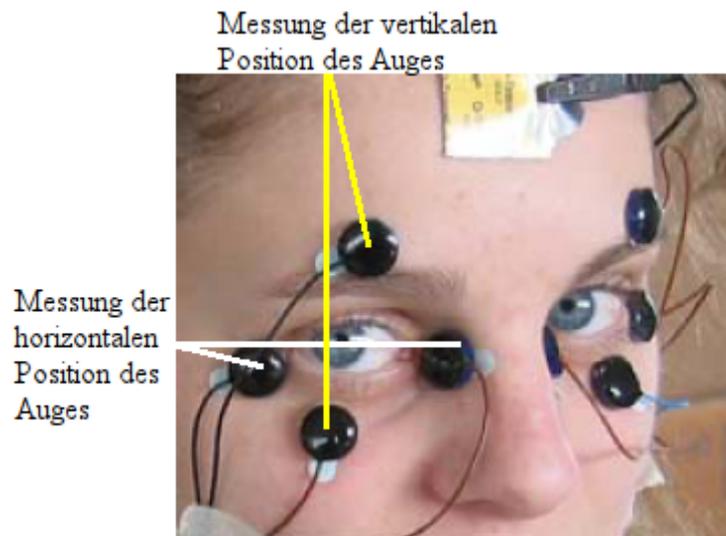


Abbildung 2.21: Bei der Elektrookulographie werden jeweils links, rechts, über- und unterhalb jedes Auges eine Elektrode angebracht, um die Differenz des elektrischen Potentials auf der Haut zu messen [42].

Sclera-Kontaktlinsen-Methode

Die Sclera-Kontaktlinsen-Methode verwendet eine Kontaktlinse, welche der Proband während der Benutzerstudie trägt. An der Kontaktlinse wird ein mechanisches Objekt (z. B. ein Spiegel) oder eine Spule befestigt. Im zweiten Fall wird die Testperson in ein magnetisches Feld positioniert, welches eine Spannung je nach Winkel der Spule induziert (siehe Abbildung 2.22) [65]. Heutzutage werden Kontaktlinsen verwendet, welche die Cornea und Sclera komplett abdecken. Auch wenn die Methode präzise Ergebnisse liefert, ist sie nicht für alle Probanden geeignet, da das Anbringen der Kontaktlinse viel Übung benötigt und das Tragen unangenehm sein kann [13].

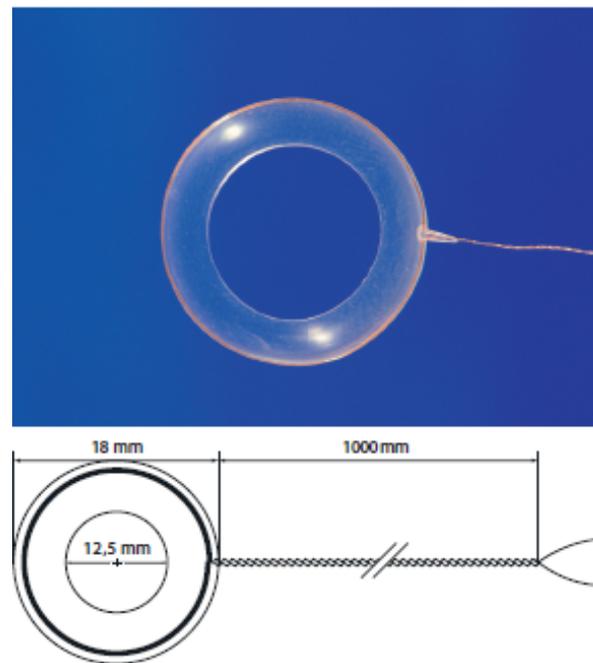


Abbildung 2.22: Eine Kontaktlinse, mit angebrachtem Draht (search coil), welche eine Spannung induziert, wenn die Testperson in ein magnetisches Feld positioniert wird [66].

Videookulographie

Die Videookulographie bestimmt die Augenbewegung über eine Videoaufnahme, indem Merkmale des Auges gemessen werden. Einige Beispiele hierfür sind das Messen der Form der Pupille, das Messen der Position des Limbus (Übergang zwischen Horn- und Lederhaut) oder das Messen der Hornhautreflexion. Da keine dieser Methoden alleine den Point-of-Regard wiedergibt, müssen zwei Augenmerkmale gemessen werden.

Bei der Retinareflexion wird Infrarotlicht in das Auge gestrahlt. Ist die Lichtquelle zur optischen Achse ausgerichtet, erscheint die Pupille als ein heller Kreis (Bright-Pupil-Method). Wird die Lichtquelle in einem Winkel zur optischen Achse in das Auge gestrahlt, wird das Licht von der Kamera weg reflektiert und die Pupille wirkt dunkel (Dark-Pupil-Method) [10]. Zusätzlich zur Netzhautreflexion wird die Hornhautreflexion gemessen (erste Purkinje Reflexion, siehe Abbildung 2.23). Die Reflexion des Infrarotlichts auf der Pupille kann relativ zum Pupillenzentrum gemessen werden und anhand diesen Messungen kann eine Augenbewegung von einer Kopfbewegung unterschieden werden [35] (Point-of-Regard, siehe Abbildungen 2.24 und 2.25).

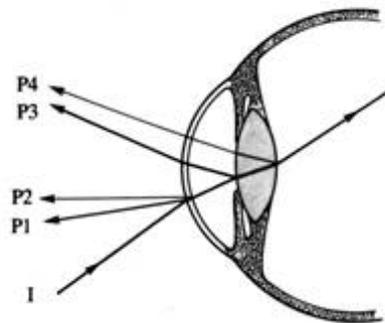


Abbildung 2.23: Purkinje Reflexionen: I ist das eingestrahelte Licht, P₁ ist die Reflexion des Lichts von der Vorderseite der Hornhaut, P₂ ist die Reflexion des Lichts von der Hinterseite der Hornhaut, P₃ ist die Reflexion von der Vorderseite der Linse und P₄ ist die Reflexion von der Rückseite der Linse [35].

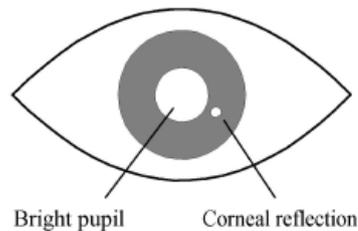


Abbildung 2.24: Eingestrahktes Licht lässt durch die Netzhautreflexion die Pupille hell oder dunkel erleuchten. Das von der Hornhaut reflektiert Licht erscheint als heller Punkt neben der Pupille. Die Differenz zwischen dem Reflexionspunkt und der Pupille kann berechnet werden, um zu messen wo der Proband hingeschaut hat [48].

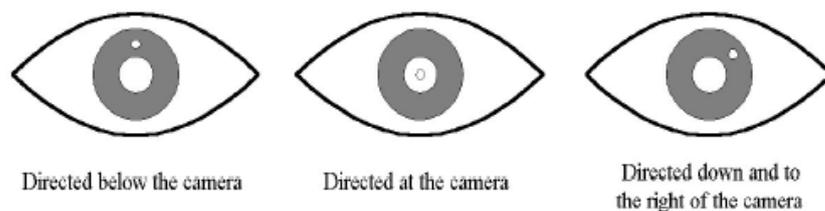


Abbildung 2.25: Die Position der Hornhautreflexion ändert sich entsprechend der Position des Auges des Probanden. Schaut er nach unten ist die Reflexion über der Pupille, schaut er direkt in die Kamera ist die Reflexion im Pupillenzentrum und schaut er nach rechts unten ist die Reflexion rechts oben [48].

2.4.6 Eyetracking-Systeme

Je nachdem welche Aufgabe bei einer Eyetracking-Benutzerstudie untersucht wird, gibt es verschiedene Systeme, die eingesetzt werden können. Es können die folgenden Systeme unterschieden werden: stationäre Systeme, kopfgetragene Systeme, Systeme mit Kopfbefestigung und Systeme, bei denen die Gehirnströme überwacht werden können.

Stationäre Systeme

Für Benutzerstudien, bei denen der Benutzer sich an einem Ort befindet, zum Beispiel bei der Betrachtung von Webseiten oder Benutzeroberflächen, können stationäre Systeme (auch als remote Eyetracking bezeichnet) eingesetzt werden. Stationäre Systeme bestehen in der Regel aus zwei Infrarotlichtquellen, einer hochauflösenden Kamera im infraroten Bereich und einem Bildschirm. Die Infrarotlichtquellen werden eingesetzt, um eine Reflexion an der Cornea zu erzeugen, welche von der Kamera aufgenommen wird. Anschließend wird anhand von Bilderkennungsverfahren die Augenbewegung ermittelt [4]. Der Bildschirm wird dafür verwendet, um dem Probanden die Stimuli zu zeigen und es kann die Auswertung der Daten vorgenommen werden. Diese Kombination aus Infrarotlichtquelle, Kamera und Bildschirm wird auch Fixed-Camera-System genannt und ist der heute übliche Standard (siehe Abbildung 2.26).

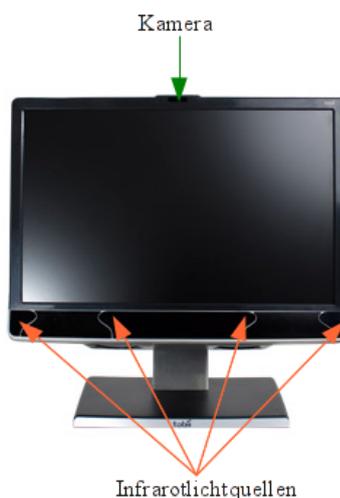


Abbildung 2.26: Ein Fixed-Camera-System der Firma tobii. Die Infrarotlichtquellen sind unterhalb des Displays angebracht, die Kamera darüber [60].

Kopfgetragene Systeme

Ist es wichtig, dass der Proband in seiner „echten“ Umgebung beobachtet wird oder muss der Proband sich frei bewegen können, wird ein kopfgetragenes (head-mounted) Systeme

verwendet. Wird zum Beispiel das Kaufverhalten von Kunden in einem Supermarkt untersucht, kann es von Vorteil sein, wenn der Proband ein kopfgetragenes System während des Einkaufens trägt.

Bei kopfgetragenen Systemen werden die monokularen und die binokularen Systeme unterschieden. Bei den monokularen Systemen (links in Abbildung 2.27) wird eine Kamera und ein Spiegel an ein Kopfband befestigt, welche die Augenbewegung erfasst. Bei den binokularen Systemen (rechts in Abbildung 2.27) werden für jedes Auge eine eigene Kamera und ein eigener Spiegel verwendet [36].



Abbildung 2.27: Ein binokulares (links) [39] und monokulares (rechts) [38], kopfgetragenes Eyetracking-System. Bei monokularen Systemen wird eine Kamera und ein Spiegel für beide Augen, bei binokular wird für jedes Auge eine eigene Kamera und ein eigener Spiegel verwendet. Die Firma ASL bietet außerdem die Möglichkeit, die Eyetracking-Daten direkt auf einem Kontrollcomputer (getrennt) anzeigen zu lassen.

Eyetracking-Systeme mit Kopfbefestigung

Für Benutzerstudien bei denen eine hohe Genauigkeit der zu erfassenden Daten wichtig ist, können Eyetracking-Systeme mit Kopfstütze, Kinnstütze oder eine Beisschiene verwendet werden (siehe Abbildung 2.28). Die Stütze soll verhindern, dass der Proband seinen Kopf nach der Kalibrierung bewegt und die Genauigkeit der zu erfassenden Daten verschlechtert wird [31]. Dies ist zum Beispiel bei Lesestudien wichtig, da beim Lesen kleine Bewegungen gemacht werden und es wichtig ist, diese exakt aufzunehmen.



Abbildung 2.28: Ein Eyetracker mit Kinnstütze welche verhindert, dass sich der Kopf des Probanden bewegt. Dies ist vor allem notwendig, wenn eine hohe Genauigkeit der Daten, wie beispielsweise bei Lesestudien, erforderlich ist [31].

Eyetracking-Systeme mit Überwachung der Gehirnströme

Wird nicht nur die Augenbewegung, sondern gleichzeitig auch die Gehirnaktivität eines Probanden untersucht, gibt es Eyetracking-Systeme, die mit funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) verbunden werden können. Das Eyetracking-System wird dabei einige Meter entfernt von der fMRT aufgestellt. Ein in die fMRT integrierter Spiegel sorgt für die Übertragung der Augenbewegungen des Probanden an den Eyetracker (siehe Abbildung 2.29) [37].

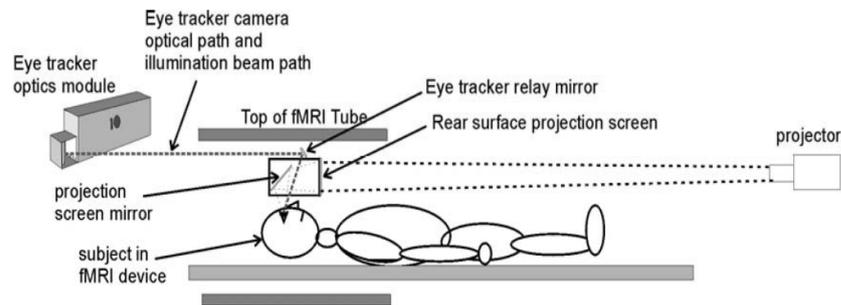


Abbildung 2.29: Ein Eyetracking-System für die Verwendung mit einem fMRT. Der Proband liegt dabei in einem MRT-Gerät, welches einen integrierten Spiegel hat. Der Spiegel projiziert die Augenbewegungen des Probanden, welche von einer Kamera aufgenommen werden. Die Stimuli werden über einen Projektor auf eine Fläche im MRT projiziert [37].

2.4.7 Kalibrierung eines Eyetracking-Systems

Um eine gute Aufnahme der Augenbewegungen zu bekommen, muss zu Beginn eines Testdurchlaufs für einen Probanden eine Kalibrierung durchgeführt werden. Die Kalibrierung ist deswegen notwendig, weil die optische Achse und die Sehachse nicht gleich sind (siehe Abbildung 2.30). Die Sehachse hat eine Abweichung von $4 - 8^\circ$ [11]. Da bei jedem Menschen der Ort der Fovea unterschiedlich ist, muss der Eyetracker für jeden Probanden neu kalibriert werden. Eine Möglichkeit der Kalibrierung ist dem Probanden mehrere Punkte (zwischen zwei und neun) auf dem Bildschirm anzuzeigen. Die Punkte bewegen sich auf dem Bildschirm und der Proband muss die Punkte mit dem Auge verfolgen [62].

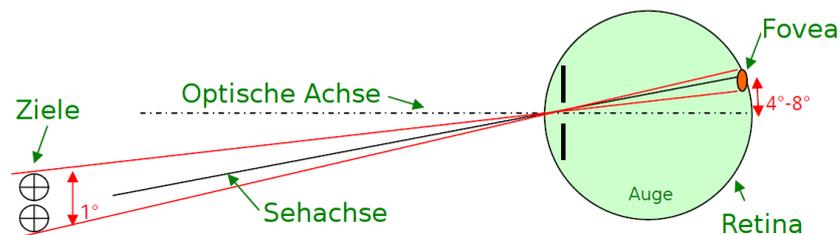


Abbildung 2.30: Größe und Position der Fovea [11].

2.4.8 Visualisierung der Eyetracking-Daten

Um die erfassten Eyetracking-Daten zu visualisieren, stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. In den folgenden Abschnitten wird unter anderem die Heatmap, der Scanpath, die Übergangsmatrix, die parallelen Scanpaths, der Bee Swarm, die Clustervisualisierung, und verschiedene Zeitvisualisierungen (Pupillendiagramm und AOI-Diagramm) erklärt.

Heatmap

Bei einer Heatmap werden für einen Stimulus die Fixationen aller Probanden aufsummiert und anhand einer Farbskala visualisiert. In Abbildung 2.31 ist die Farbskala rot-grün gewählt. Schaut ein Proband einen Punkt kurz an, wird der Bereich grün eingefärbt, fixiert der Proband eine Stelle mittellang, wird sie gelb eingefärbt und bei langen Fixationen rot. Die Heatmap kann genutzt werden AOIs für einen Stimulus im Nachhinein zu definieren.

Scanpath

Wie in Abschnitt 2.4.3 beschrieben, ist ein Scanpath die Abfolge von Fixationen und Sakkaden. Werden im Scanpath die Abfolge der Fixationen und Sakkaden visualisiert, handelt es sich um einen vereinfachten Scanpath, mit diesem kann ein erster Überblick über die Abfolge der Augenbewegungen gewonnen werden [59]. Soll die Fixationsdauer im Scanpath visualisiert werden, wird sie anhand des Radius eines Kreises für jede Fixation dargestellt. Außerdem kann einen Scanpath auch anhand der betrachteten AOIs erstellen werden. Bei einem AOI-Scanpath werden die Übergänge zwischen den einzelnen AOIs angezeigt.

Abbildung 2.31 zeigt einen Nachteil der Scanpath-Visualisierung. Bei vielen Fixationen und Sakkaden kann der Überblick verloren gehen. Wird der Scanpath animiert dargestellt, können die einzelnen Schritte der Augenbewegung des Probanden in zeitlicher Reihenfolge verfolgt und analysiert werden. Dies hat den Nachteil, dass keine Aussage über das Verhalten des Probanden über den kompletten Scanpath gemacht werden kann. Der AOI-Scanpath kann durch die vereinfachte Darstellung eine bessere Übersicht über den Verlauf der Augenbewegung zeigen, da hierbei die Übergänge zwischen AOIs angezeigt werden können und nicht der komplette Scanpath [59].

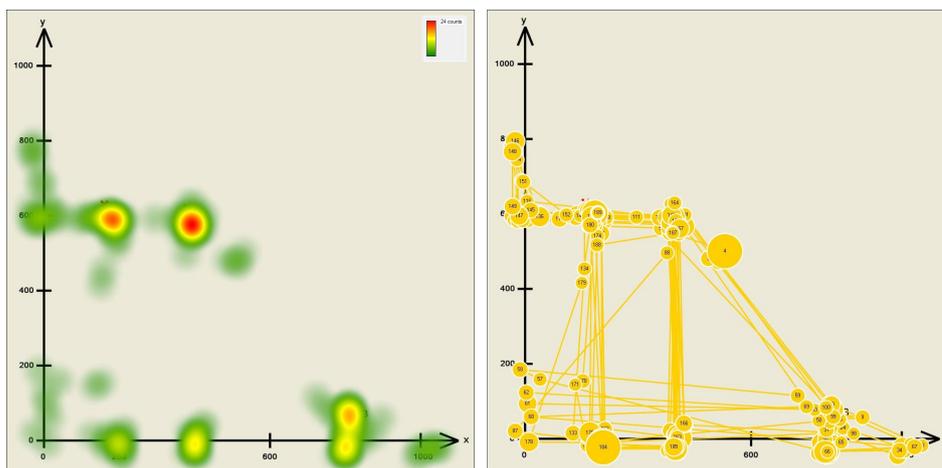


Abbildung 2.31: Die linke Abbildung zeigt eine Heatmap für einen Stimulus, bei dem die Probanden die Koordinaten von Punkten in einem zweidimensionalen Koordinatensystem ablesen mussten. Rechts davon ist der dazugehörige Scanpath eines Probanden abgebildet.

Übergangsmatrix

Eine Übergangsmatrix, wie in Abbildung 2.32 zu sehen ist, bildet die Übergänge zwischen Areas of Interest ab. Dafür müssen für den Stimulus AOIs definiert werden. Anschließend werden die AOIs als Zeilen und als Spalten in eine Matrix eingetragen. Für jeden Übergang zwischen zwei AOIs wird ein Zähler in der entsprechenden Zelle hochgezählt. Anschließend lässt sich aus der Übergangsmatrix die Übergangsdichte ablesen. Hierfür muss die Anzahl der Übergänge durch alle Übergänge geteilt werden (im Beispiel wären das $9/64 = 0.14$).

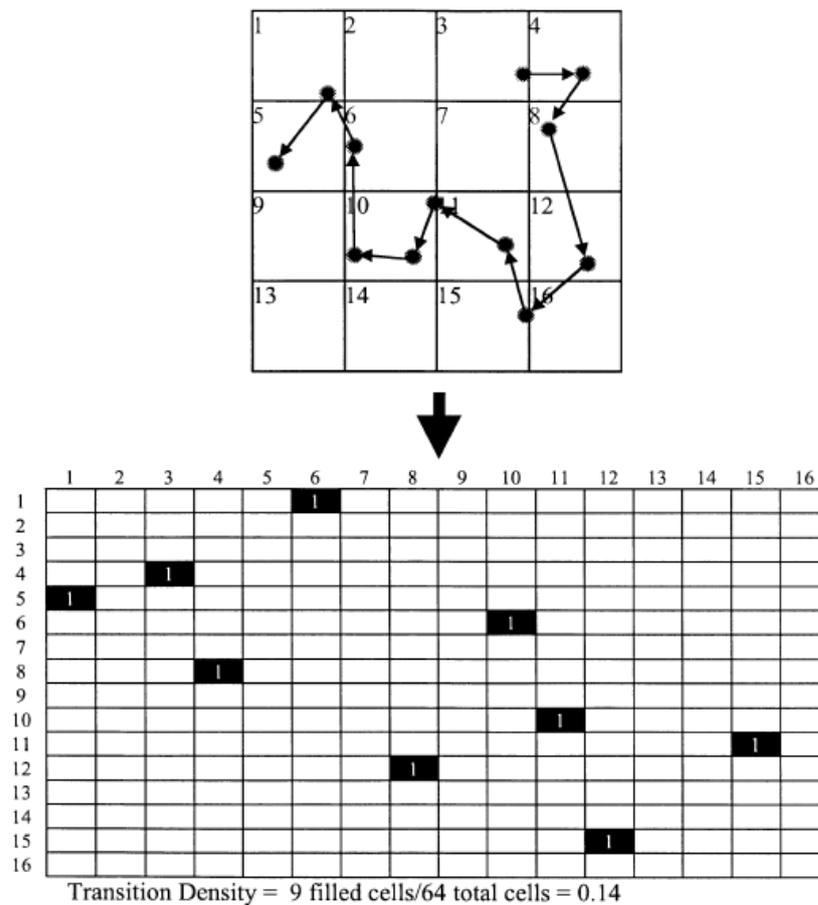


Abbildung 2.32: Der abgebildete Scanpath ist über ein Gitter in Bereiche eingeteilt. Die Anzahl der Bereiche gibt die Anzahl der Spalten und Zeilen der Matrix vor. In der Matrix wird in einer Zelle ein Zähler erhöht, wenn es im Scanpath eine Transition vom Bereich der Spalte in einen Bereich der Zeile gab. Die Transition von Bereich drei in Bereich vier am Anfang des Scanpath ist wiederzufinden in der Zelle mit Spalte drei und Zeile 4. Die Transitionsdichte lässt sich berechnen, indem die Anzahl der Werte in allen Zellen aufsummiert wird und durch die Gesamtzahl der Zellen geteilt wird [26].

Parallele Scanpath-Visualisierung

Die parallele Scanpath-Visualisierung bildet definierte AOIs und die Zeit auf ein zweidimensionales Koordinatensystem ab. Die AOIs werden dabei auf die x-Achse, die Zeit auf der y-Achse aufgetragen. Für jeden Probanden wird visualisiert, wie lange er eine AOI fixiert hat, die Übergänge zwischen den AOIs und der Zeitpunkt, wann der Proband eine AOI fixiert hat. Abbildung 2.33 zeigt eine parallele Scanpath-Visualisierung für fünf AOIs und sechs Probanden. Diese Visualisierung ermöglicht es herauszufinden, welcher Proband der schnellste (P04) und welcher der langsamste (P26) war. Außerdem ist es möglich zu sehen, dass manche Probanden die AOIs eins, vier und fünf nicht fixiert haben. Alle Probanden haben die AOIs zwei und drei fixiert. Die parallele Scanpath-Visualisierung bietet eine gute Möglichkeit verschiedene Probanden miteinander zu vergleichen und Aussagen über das Verhalten der Probanden zu treffen [53].

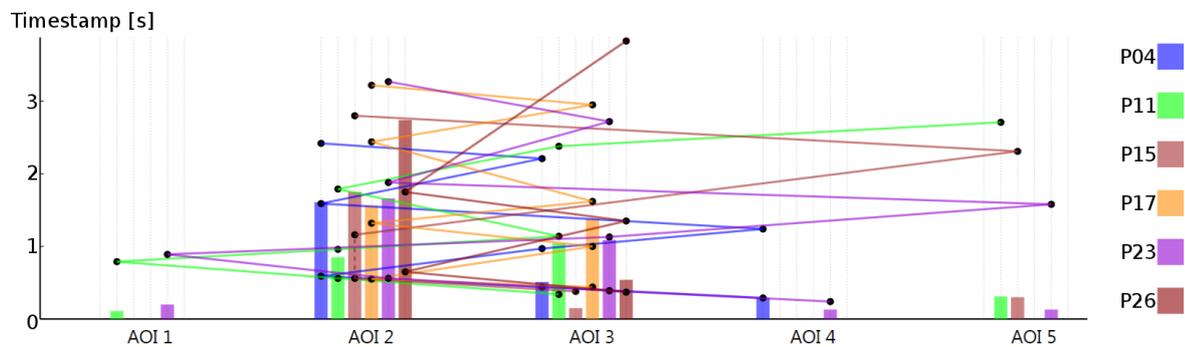


Abbildung 2.33: Bei einer parallelen Scanpath-Visualisierung werden die AOIs auf der x-Achse und die Zeit auf der y-Achse aufgetragen. Für jeden Probanden werden die Übergänge zwischen den AOIs visualisiert, die gesamte Dauer innerhalb einer AOI wird visualisiert und der Zeitpunkt, wann der Proband eine AOI fixiert hat [53].

Bee Swarm Visualisierung

Bei der Bee Swarm Visualisierung wird die aufgenommene Augenbewegung mehrerer Probanden gleichzeitig angezeigt. Die Fixationen werden als kleine unterschiedlich farbige Kreise repräsentiert und es kann verglichen werden, wann Probanden zur gleichen Zeit, wohin geschaut haben [59]. In Abbildung 2.34 haben die meisten Probanden zum gewählten Zeitpunkt das Gesicht der Frau betrachtet.



Abbildung 2.34: Die Bee Swarm Visualisierung zeigt, dass zu einem beliebig gewählten Zeitpunkt, viele Probanden das Gesicht der Frau betrachtet haben, einige die Frau mit Tasche, einer das Logo rechts oben, einer die Marktfrau im Hintergrund und einer die Markise des Marktstandes [59].

Cluster-Visualisierung

Bei der Cluster-Visualisierung werden Anhäufungen von Fixationspunkten zu Clustern zusammengefasst. Die Cluster-Visualisierung hat zwar eine Ähnlichkeit mit den Heatmaps, aber bei der Cluster-Visualisierung wird die Dauer einer Fixation nicht beachtet. Die Cluster-Visualisierung kann genutzt werden, im Nachhinein AOIs für einen Stimulus zu erstellen (siehe Abbildung 2.35) [62].



Abbildung 2.35: Die Probanden haben in dieser Abbildung unter anderem den Text fixiert, die Weltkugel sowie Bereiche des Himmels. Diese Bereiche wurden anhand der zugrunde liegenden Fixationsdaten zu Clustern zusammengefasst [62].

Zeit-Visualisierungen

Eine Möglichkeit die gesammelten Eyetracking-Daten zu visualisieren, ist die Visualisierung von zeitabhängigen Metriken. Unter anderem können x- und y- Koordinaten, die Pupillengröße (siehe Abbildung 2.36), die Geschwindigkeit, die Beschleunigung oder Kopf- und Mausbewegungen über die Zeit geplottet werden. Diese Darstellungen haben den Vorteil, dass ein erster Eindruck über die Größen gewonnen werden kann, wie sie sich über die Zeit verändert haben. Es kann unter anderem einen Eindruck über die kognitive Auslastung gewonnen werden. Eine Rangebar kann verwendet werden, wenn Zeitintervalle betrachtet werden. Wie beim horizontalen Scrollen, kann mit einer Rangebar durch die Zeit navigiert werden. Neben den genannten Metriken, können auch AOIs anhand der Zeit geplottet werden. Dabei werden die AOIs auf der vertikalen und die Zeit auf der horizontalen Achse abgebildet. Die Zeitbereiche, in denen die AOI fixiert wurden, werden zum Beispiel eingefärbt oder markiert. Der Betrachter kann über eine Rangebar einen Zeitpunkt auswählen und feststellen, welche AOIs wann und wie lange betrachtet wurden sowie welche AOIs parallel betrachtet wurden. Eine weitere Option kann die Anzeige der Prozentsätze der AOIs sein. Dafür wird für jede AOI berechnet, welchen Prozentsatz diese an Fixationszeit von der Gesamtzeit einnimmt und welcher Prozentsatz davon gerade in den gewählten Zeitpunkt fällt (siehe Abbildung 2.37) [59].

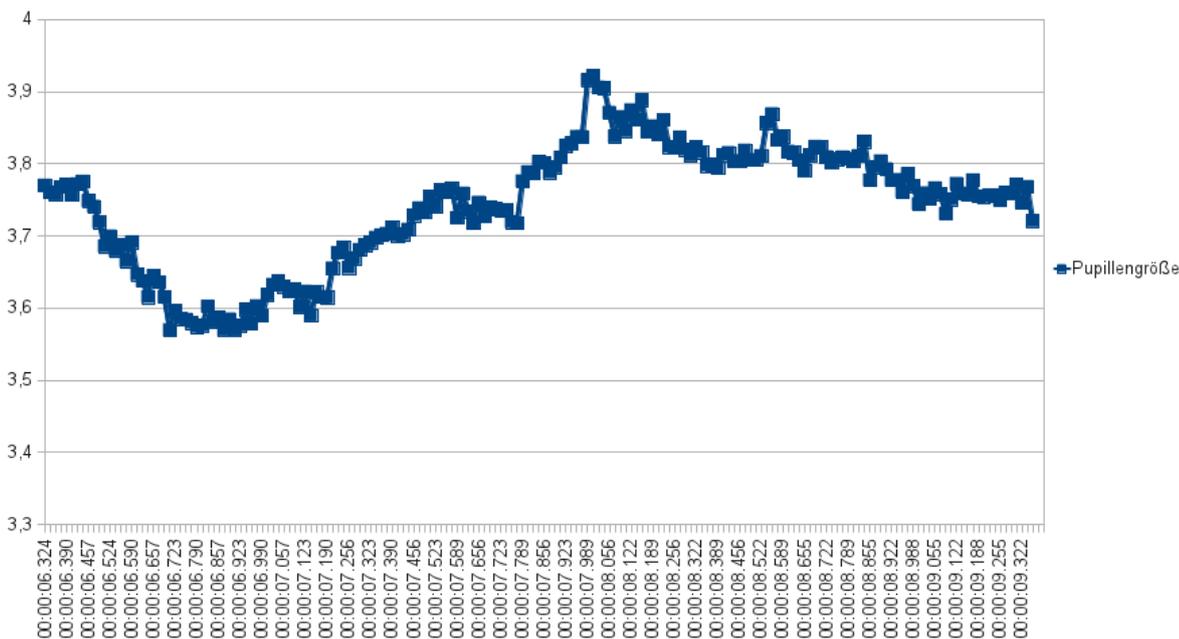


Abbildung 2.36: Die Pupillengröße eines Probanden wird über der Zeit geplottet, in der ein Stimulus betrachtet wird.

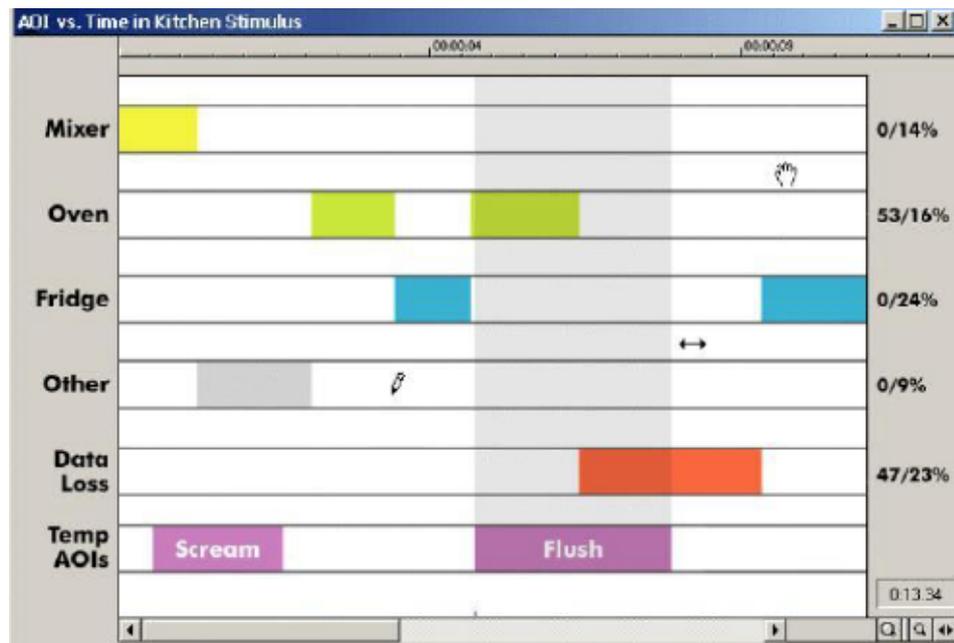


Abbildung 2.37: Eine Visualisierung für AOIs in Verbindung mit der Zeit kann Auskunft geben wie oft, in welcher Reihenfolge und wie lange AOIs betrachtet wurden [59].

2.4.9 Anwendungsgebiete

Neben dem Einsatz von Eyetracking in der Mensch-Computer-Interaktion gibt es viele andere Anwendungsgebiete. Mediziner, Psychologen, Wirtschaftsingenieure und Marketing-spezialisten nutzen die Möglichkeit anhand von Eyetracking-Daten Informationen über das Verhalten ihrer Probanden zu erlangen. Diese verschiedenen Gebiete werden im Folgenden beschrieben und beziehen sich auf die ausführliche Arbeit von A. Duchowski [12].

Medizin und Neurowissenschaften

In der Medizin und den Neurowissenschaften wollen die Wissenschaftler herausfinden, in wie fern die Augenbewegung des Menschen mit dem Verstehen und Wahrnehmen seiner Umwelt zusammenhängt. Die Wissenschaftler haben herausgefunden, dass es viele neuronale Verbindungen zwischen der Retina und dem visuellen Cortex (Sehrinde) gibt. Um die menschliche Wahrnehmung komplett zu verstehen, müssen die Sehbahnen und ihr physischer Aufbau weiter untersucht und erforscht werden. Dafür müsste neben der Augenbewegung auch die Gehirnaktivität aufgenommen werden. Dies kann durch die Kombination aus einem Eyetracker und einem funktionellen Magnetresonanztomographen (fMRT) geschehen (siehe Abschnitt 2.4.6).

Psychologie

In der Psychologie wird die Verbindung zwischen der Augenbewegung und der Wahrnehmung bei verschiedenen Aufgaben untersucht. Einige beliebte Aufgaben sind hierbei das Lesen eines Textes, das Betrachten von Szenen, das Betrachten von Kunst und Anwendungen aus dem Alltagsleben. Die ersten Untersuchungen beim Lesen wurden 1878 von Emile Javal durchgeführt (siehe Abschnitt 2.4.1). Neben der Untersuchung der Augenbewegung beim Lesen, gibt es auch Benutzerstudien, die untersuchen, wie sich das Leseverhalten verändert, wenn der Stimulus beim Lesen angepasst wird, zum Beispiel durch ein sich bewegendes Fenster, eine Grenze oder eine Fovea-Maske.

Bei der Betrachtung einer Szene gibt es kein klares Vorgehen wie beim Lesen. Wird ein Kunstobjekt betrachtet, konnten die Forscher ein eindeutiges Vorgehen erkennen, welches durch die Information im Bild beeinflusst wird.

Einige neuere Benutzerstudien haben sich damit befasst, in wie weit die Augenbewegung sich mit der Ausführung einer Aufgabe des täglichen Lebens deckt. Am Beispiel des Teekochens haben Forscher herausgefunden, dass die Aufmerksamkeit der Augen auf das Objekt gerichtet ist und es wenige Augenbewegungen gibt, die nichts mit der eigentlichen Aufgabe zu tun haben. Das Auge bewegt sich weiter, wenn ein Aufgabenteil fast abgeschlossen ist, um sich auf den nächsten Schritt zu konzentrieren (siehe Abbildung 2.38).

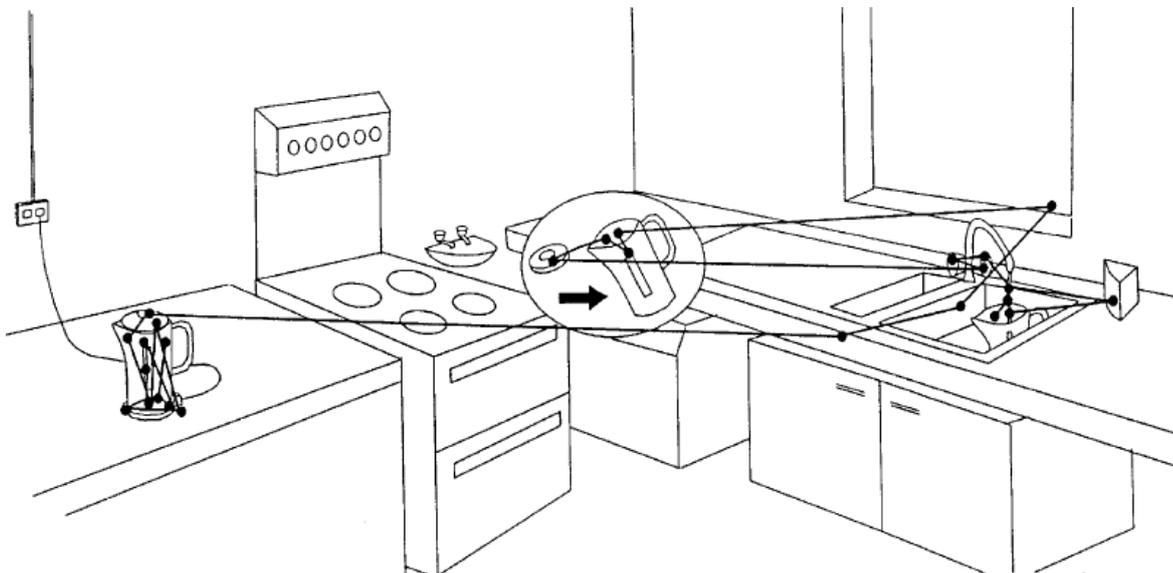


Abbildung 2.38: Augenbewegungen beim Kochen von Tee, nachdem der Wasserkocher in die Spüle gestellt wird [40].

Wirtschaftsingenieurwesen und Arbeitswissenschaften

Für Anwendungen, die später von Menschen zum Arbeiten benutzt werden sollen, ist es wichtig, wie die verwendeten Instrumente, zum Beispiel bei der Luftfahrt oder in der Autoindustrie, angeordnet sind. Bei der Luftfahrt wurden Untersuchungen durchgeführt, die Piloten bei der Simulation eines Flugs beobachten, wie sie Informationen auswählen und Managementtätigkeiten in einem Glascockpit durchführen. Für die Entwicklung von Fahrtraining-Anwendungen oder für die Unfallvermeidung kann die Augenbewegung der Menschen beim Fahren aufgenommen werden, um das Fahrverhalten zu untersuchen.

Marketing/Werbung

Auch in der Werbung und im Marketing findet Eyetracking Anwendung, indem untersucht wird, ob Anzeigen effektiv sind und wie sie auf Menschen wirken. Es kann zum Beispiel untersucht werden, welche Anzeigen einem Probanden auffallen, ob Probanden mehrere Anzeigen in einer speziellen Reihenfolge betrachten und wie lange Probanden unterschiedliche Eigenschaften einer Anzeige betrachten. Bei diesen Untersuchungen stellten Forscher fest, dass Probanden sich den Text einer Anzeige genauer anschauen (mehr Fixationen) als ein Bild. Bei Werbetexten wird verstärkt auf die Überschriften und groß geschriebene Teile geachtet, weniger auf Kleingedrucktes. Bilder werden zwar länger betrachtet, aber es werden wenige Fixationen durchgeführt (siehe Abbildung 2.39).



Abbildung 2.39: Scanpaths mehrere Probanden (blau, türkis und rosa eingefärbt), beim Vergleich zweier Spülmittelflaschen. Dabei fällt auf, dass die Probanden unter anderem die Deckel der Spülmittelflaschen und die Etiketten verglichen [20].

Mensch-Rechner-Interaktion

In der Mensch-Rechner-Interaktion werden Eyetracking-Benutzerstudien hauptsächlich für Usability-Benutzerstudien eingesetzt. Eyetracking kann auch als Eingabemedium dienen, um Objekte auszuwählen oder um mit den Augen zu tippen. Um mit den Augen ein Objekt auszuwählen, wird die Fixationsdauer als Bestätigung verwendet. Diese Art der Eingabe hat den Vorteil, dass sie schneller als die Selektion mit der Maus ist. Das Problem dabei ist, dass die Eingabe nicht präzise ist, da die Genauigkeit durch die Fovea beschränkt ist.

2.4.10 Einschränkungen beim Eyetracking

Aufgrund des Aufbaus des Auges ist eine Kalibrierung der Probanden notwendig und die Eyetracking-Aufnahme kann nur eine Genauigkeit von $\pm 0,5^\circ$ erlangen. Dies liegt daran, dass Objekte, die kleiner als 1° sind, nicht genau in der Mitte der Fovea positioniert werden, sondern irgendwo in der Fovea [11]. Da es Eyetracker seit ca. einem Jahrhundert gibt (siehe Abschnitt 2.4.1), wurden viele der Probleme durch Weiterentwicklung der Eyetracking-Systeme gelöst. Bei den ersten Eyetracking-Systemen durften die Probanden beispielsweise ihren Kopf nicht bewegen. Dies konnte verbessert werden, indem bessere Kamerasysteme entwickelt wurden. Aufgrund der Physiologie des Auges gibt es Einschränkungen, die nicht durch bessere Eyetracking-Systeme behoben werden können. Außerdem kann ein Mensch seine Wahrnehmung auf ein Objekt richten, welches sich bis zu 1° vom gemessenen Point-of-Regard befindet. Dadurch kann es bei der Analyse der Eyetracking-Daten zu Fehlinterpretationen kommen, weil der Proband eine andere Stelle fokussiert als die, auf die er seine Wahrnehmung richtet. Wichtig ist, dass vor dem Verwenden eines Eyetrackers der Schwellwert, um Fixationen als solche zu entdecken, eingestellt werden muss. Je nachdem, wie dieser Schwellwert gewählt wird, können unterschiedliche Analyseergebnisse erreicht werden.

Des Weiteren muss je nach Aufgabe die Abtastfrequenz des Eyetrackers eingestellt werden. Für eine Usability-Benutzerstudie ist beispielsweise eine Abtastfrequenz von 60 hz ausreichend. Für eine Lesestudie ist eine Abtastfrequenz von 500 hz und mehr notwendig. Dies sollte vor der eigentlichen Benutzerstudie am Eyetracker eingestellt werden. Außerdem muss ein Schwellwert eingestellt werden, damit die Fixationen als solche von einem Eyetracker erkannt werden [9].

Neben diesen technischen Einschränkungen gibt es auch Einschränkungen bedingt durch die Probanden. Bei einer Eyetracking-Benutzerstudie kann zwischen einem stationären Systemen und einem kopfgetragenen System unterschieden werden. Der remote Eyetracker hat den Nachteil, dass der Proband seinen Kopf frei bewegen kann und der Eyetracker die Augen des Probanden verliert, da der Proband seinen Kopf bewegt hat. Ein kopfgetragenes System hat den Nachteil, dass es für den Probanden unangenehm sein kann, solch ein Gerät zu tragen, dafür ist die Bewegungsfreiheit des Probanden gewährleistet. Trägt ein Proband eine nicht entspiegelte Brille kann es vorkommen, dass durch die Reflexion der Brille das Eyetracking-System die Augen des Probanden nicht messen kann. Auch andere Beeinflussungen der

Augen, wie große Pupillen oder ein hängendes Augenlid können dazu führen, dass der Proband nicht getracket werden kann.

Je nachdem wo eine Eyetracking-Benutzerstudie durchgeführt wird, kann es zu weiteren Einschränkungen kommen. Wird die Benutzerstudie in einem Raum durchgeführt, können die Umgebungsbedingungen unter Kontrolle gehalten werden. Wird eine Benutzerstudie im Freien durchgeführt, kann starke Sonnenstrahlung den Eyetracker beeinträchtigen und die Augenbewegungen werden nicht richtig erkannt. Ein weiteres Problem im Freien ist die Benutzerstudie bei Nacht durchzuführen. Hier können Lichteinflüsse durch die Umgebung den Probanden ablenken oder zu Verfälschungen führen. Am Tag kann es bei Benutzerstudien, die in einem sich bewegenden Objekt stattfinden, zu Schatten und wechselnden Lichtverhältnissen kommen. Dies kann dazu führen, dass die Augen nicht korrekt aufgenommen werden.

2.4.11 Eyetracking-Software

Im nachfolgenden Abschnitt wird die Software der Firma Tobii und der Firma Eyeworks für die Erstellung und Analyse von Eyetracking-Benutzerstudien vorgestellt. Hierbei wird auf die Funktionalität der Software eingegangen. Außerdem wird am Schluss ein Vergleich von sieben Softwaresystemen durchgeführt, um die Stärken und Schwächen zu zeigen und Mängel aufzudecken.

Tobii

Tobii Studio ist die Software zum Eyetracking-System der Firma Tobii. Die Software integriert dabei die Kombination aus Studiererstellung, -durchführung und -auswertung. Beim Erstellen eines neuen Projekts werden zuerst Aufgaben definiert, welche jeweils eine Timeline enthält. In der Timeline wird definiert welche verschiedenen Unteraufgaben zur Aufgabe gehören. Die Unteraufgaben können dabei vom Typ Anleitung, Bild, Video (AVI), Webseite, Bildschirmaufnahme, externe Videoaufnahme oder Szenenkamera sein. Die Unteraufgaben können bei Bedarf für jeden Probanden anders geordnet sein (randomize order). Bei der Erstellung der Probanden können neben dem Namen verschiedene unabhängige Variablen, wie das Alter oder das Geschlecht definiert werden. Diese können über Drop-Down-Boxes ausgewählt werden (siehe Abbildung 2.40).

Für die Auswertung stehen im Tobii Studio verschiedene Visualisierungen und die Möglichkeit, das aufgenommene Video anzusehen, zur Verfügung. Bei den Visualisierung kann zwischen Heatmaps, Gazeplots (Scanpath), Clusteranalyse und Bee Swarm Videos gewählt werden. Außerdem können Areas of Interest definiert werden, welche bei der Statistikauswertung eingesetzt werden. Statistiken können als Diagramme oder Tabellen angezeigt und die folgenden Metriken darstellen:

- Zeit bis zur ersten Fixation
- Fixationsdauer

- Fixationsanzahl
- Betrachtungsdauer
- Betrachtungsanzahl
- Fixationen vor einer bestimmten AOI
- Probandenprozentsatz

Als statistische Auswertungsfunktionen wird das Minimum, Maximum, der Median, Durchschnitt und die Standardabweichung angeboten. Die Daten können während der Auswertung in verschiedene Formate exportiert werden. Videos können als AVI-Datei und numerische Daten als TSV-Datei für SPSS, Matlab oder Excel exportiert werden [62].

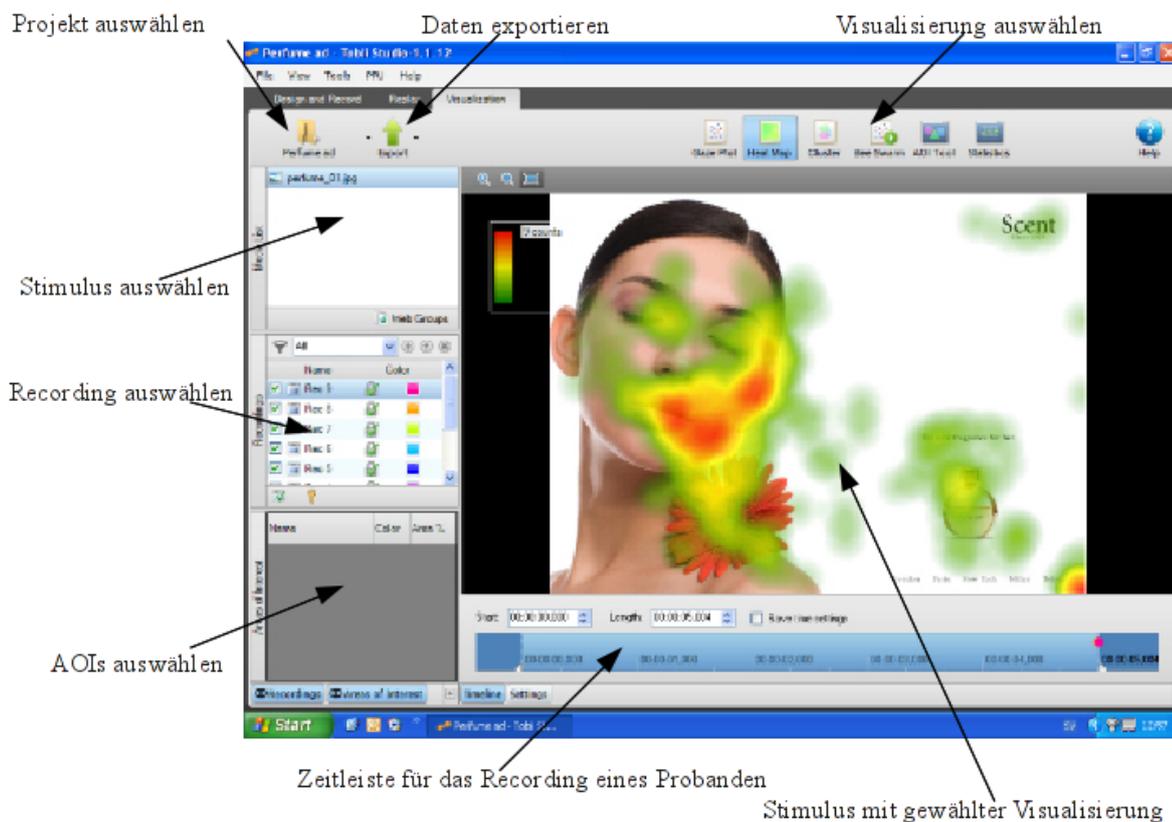


Abbildung 2.40: Das Tobii Studio bietet neben der Erstellung und Durchführung von Eyetracking-Benutzerstudien auch die Möglichkeit an, die Daten auszuwerten und mit verschiedenen Visualisierungen darzustellen. In der Visualisierungsansicht kann der Stimulus ausgewählt werden, die Recordings und verschiedene Visualisierungen. Außerdem können die Daten exportiert werden [61].

Eye Works

Die Firma Eyetracking Inc. entwickelte die Software Eyeworks, die in drei einzelne Anwendungen unterteilt ist: Design, Record und Analyze. Die Anwendungen Design und Analyze werden im Folgenden vorgestellt. Die Anwendung Record dient zur Aufnahme der Eyetracking-Daten und wird nicht weiter erläutert, anzumerken ist, dass die Benutzerstudie an zwei getrennten Bildschirmen durchgeführt werden kann (siehe Abbildung 2.41).

Design: Beim Erstellen einer Benutzerstudie wird eine Skriptdatei erstellt, die den Ablauf der Benutzerstudie enthält. Hierfür können verschiedene Aufgabentypen ausgewählt werden. Eine Aufgabe kann vom Typ Anleitung, Frage, Bild, Video, Arbeitsplatz oder Internet Explorer sein. Anleitungen sind Texte, die erklären was in der Testaufgabe zu tun ist. Eine Frage kann als Multiple-Choice, Check-Box oder als Text erstellt werden. Bilder und Videos werden als Stimulus für die Testaufgaben gewählt. Außerdem gibt es die Möglichkeit während der Benutzerstudie eine Webseite (Internet Explorer) oder eigene Programme auf dem Computer (Arbeitsplatz) anzusehen [19].

Analyze: Für die Analyse stehen in der Toolbar der Anwendung verschiedene Werkzeuge zur Verfügung, unter anderem Hintergrundbilder (Stimulus), Regionen (AOIs), eine Playback-Möglichkeit, Gaze Trace (Scanpath), Gaze Spot (Heatmap), Gaze Cluster, Gaze Stat, Bee Swarm, Video Gaze Spot und Reports. Wurden AOIs definiert, können mit den Gaze Spot und Report Buttons statistische Ergebnisse generiert werden. Mit Gaze Spot wird für jede AOI angezeigt, welcher Prozentsatz der Fixationen sich in dieser AOI befinden. Mit Report kann ein Studienbericht erstellt werden, welcher Diagramme und Tabellen enthält. Als Metriken enthält die Anwendung

- Fehlende Daten
- Aufgabendauer
- Blicküberwachung, Mausklicks, Fixationen in jeder Region
- Anzahl Probanden welche eine Region angeschaut / angeklickt / fixiert haben
- Anzahl Blicke in jeder Region
- Zeit bis zum ersten Blick, Mausklicks, Fixation in jeder Region
- Anzahl, wie oft eine Region als erstes, zweites, drittes angeschaut wurde
- Anzahl, wie oft die Region in den Top drei betrachteten liegt
- Anzahl an Regionen die angeschaut, angeklickt wurden, bevor eine Region selektiert wird
- Anzahl Fixationen, Mausklicks in einer Aufgabe
- Pupillengröße bei der Aufgabe, Region

Als statistische Tests für die Metriken kann der Median, die Standardabweichung, der Prozentsatz und die Summe berechnet werden [30].

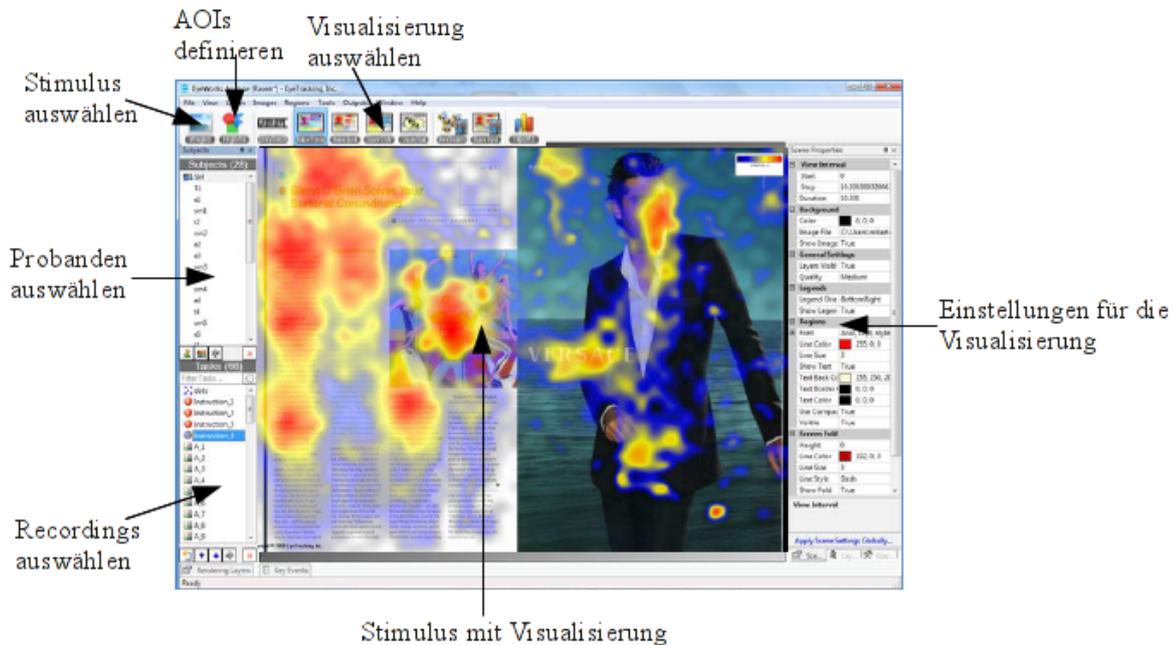


Abbildung 2.41: Oberfläche der Analyse-Umgebung von Eye Works. Es kann ein Stimulus, eine Visualisierung und Recordings ausgewählt werden sowie Einstellungen für die Visualisierungen vorgenommen werden. In der Mitte wird der ausgewählte Stimulus und die ausgewählte Visualisierung angezeigt [30].

Vergleich verschiedener Anwendungen

In Tabelle 2.9 werden verschiedene Eyetracking-Softwaresysteme auf verschiedene Eigenschaften geprüft und miteinander verglichen. Die Eigenschaften können den Wert „vorhanden“ (✓), „nicht vorhanden“ (x) oder „keine Informationen“ (?) haben.

Anforderungen	Tobii Studio	Eyeworks	SMI - BeGaze	ASL	Eyetelect	Ergoneers D-Lab	Interactive Minds
Einverständniserklärung	x	x	x	x	x	x	x
Sehtest	x	x	x	x	x	x	x
Fragen	✓	✓	✓	x	?	x	x
Aufgabenerstellung	✓	✓	✓	x	?	✓	x
verschiedene Stimuliarten (Bild, Video, Webseite)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Verwendung mehrerer Computer	✓	✓	✓	?	x	✓	✓
Wiedergabe	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
AOIs definieren	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Standard Visualisierungen (Heatmap, Scanpath)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
sonst. Visualisierungen (Cluster, Bee Swarm)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
eigene Visualisierungen	x	x	✓	x	✓	✓	✓
Filter	✓	?	?	?	?	?	?
autom. Scanpathvergleich	x	x	x	x	x	x	x
Balkendiagramme	✓	✓	?	✓	✓	✓	✓
Boxplots	x	x	x	x	x	x	x
Standard Statistiken	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓
Fortgeschrittene Statistiken (Anova, T-Test)	x	x	x	x	x	x	x
Datenbank für Datenhaltung	x	(✓)	x	x	x	x	x
Data Provenance	x	x	x	x	x	x	x
Fragebogenauswertung	x	x	x	x	x	x	x
Studienbericht	x	(✓)	x	x	x	x	x

Tabelle 2.9: Vergleich verschiedener Eyetracking-Softwares anhand wichtiger Eigenschaften, die eine Eyetracking-Software haben sollte. Legende: ✓ = vorhanden, x = nicht vorhanden, ? = keine Informationen

Weitere Forschungsprototypen und Konzepte

Weitere aktuelle Entwicklungen für Techniken und Konzepte für die Analyse von Eyetracking-Mustern, sind z. B. eSeeTrack [72] und die Arbeit von Aula et al. [3]. eSeeTrack kombiniert eine Zeitleiste und eine baumförmige Repräsentation, um die aktuellen Eyetracking-Visualisierungen durch die Extraktion von Mustern der sequentiellen Blickordnung zu erweitern, so dass diese nicht von der Anzahl der Fixationen in einer Szene abhängen (siehe Abbildung 2.42). Aula et al. [3] präsentiert eine nichtüberlappende Visualisierungstechnik für Scanpaths. Ein Framework für den Vergleich von Scanpaths basierend auf dem Prinzip

des Zeichenkettenvergleichs wurde von Privitera et al. [49] erstellt und von Duchowski et al. [14] optimiert.



Abbildung 2.42: Oberfläche von eSeeTrack, welches eine Zeitleiste (a), eine Zeitleiste mit Bildern (b), eine Baumstruktur (c) und eine Kontrolleinheit (d) enthält [72].

3 Aufgabe und Lösungsansatz

Das folgende Kapitel enthält Hintergründe, die Aufgabenstellung und den Lösungsansatz dieser Diplomarbeit. Entwickelt wird ein Analysekonzept für die Evaluation von Visualisierungen basierend auf Eyetracking-Daten.

3.1 Hintergründe

Im Zentrum aktueller Forschungsfragen auf dem Gebiet der Visualisierung stehen mit zunehmendem Maße Benutzerstudien und Vergleichsstudien, die verschiedene Visualisierungstechniken auf ihre Benutzerfreundlichkeit und Aufgabenangemessenheit untersuchen oder miteinander vergleichen. Hierfür können Eyetracking-Techniken eingesetzt werden, welche die Augenbewegung der Probanden aufnehmen, um diese später bei der Auswertung der Benutzerstudie mit einbeziehen zu können. Dadurch können weitere Metriken, neben den klassischen Benchmarks, wie der Durchführungszeit und Genauigkeit, verwendet werden. Bei der Verknüpfung von klassischen Evaluationstechniken mit Eyetracking-Analysen entstehen neue Forschungsfragen hinsichtlich des Studiendesigns und der Studiauswertung.

Ein großes Problem, welches bei einer Eyetracking-Benutzerstudie gegenüber einer herkömmlichen Benutzerstudie auftritt, ist die Menge an Daten, die entsteht. Dies hat zur Folge, dass viele Daten ausgewertet werden müssen, oftmals mit vielen verschiedenen Programmen, welche die Daten jeweils in einem anderen Datenformat brauchen. Dieses Problem soll in dieser Diplomarbeit gelöst werden, indem die Auswertung der Daten in einem Framework durchgeführt wird und die Daten nicht konvertiert werden müssen.

3.2 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Entwicklung eines Konzepts für die Auswertung von Visualisierungsevaluationen. Zunächst soll eine Recherche zu existierenden Konzepten für Visualisierungsevaluationen durchgeführt werden. Auf Grundlage der Recherche soll anschließend ein Konzept für die Auswertung einer Visualisierungsevaluation erstellt und die damit verbundenen Bedingungen formuliert werden. Als Richtlinie für das Analysekonzept soll das Visual Information Seeking Mantra dienen. Diesem folgend soll das Analysekonzept den Benutzer schrittweise bei der Auswertung unterstützen, mit Hilfe von verschiedenen Metriken, Statistiken und Visualisierungen.

Die Diplomarbeit umfasst folgende Aufgaben:

- Erarbeitung eines Konzepts für die Durchführung und Auswertung einer Visualisierungsevaluation (Kapitel 2)
- Anforderungsanalyse für die Umsetzung des Konzepts (Kapitel 4)
- Implementierung eines Prototyps (Kapitel 5)
- Demonstration des Prototyps (Kapitel 6)

3.3 Lösungsansatz

Der Kern der Arbeit bildet die Entwicklung eines Analyseframeworks, welches sich dadurch auszeichnet, dass der Benutzer alle Arbeiten innerhalb einer Benutzeroberfläche durchführen kann. Um zu gewährleisten, dass alle Daten zu jedem Zeitpunkt zur Verfügung stehen, muss das Analyseframework ein einheitliches Datenformat verwenden. Dies hat zur Folge, dass das Analyseframework die Erstellung und Durchführung von Eyetracking-Studien unterstützen muss. Das Ziel des Analysekonzepts ist es, zu jedem Zeitpunkt der Analyse oder während der Durchführung der Benutzerstudie einen schnellen Überblick über die aufgenommenen Daten zu erhalten, um die Benutzerstudie anpassen zu können. Um dies zu gewährleisten muss das Analysekonzept

- schnell,
- einfach und
- teilautomatisiert

funktionieren. Dafür orientiert sich die Struktur des Analysekonzept am Visual Information Seeking Mantra. Im ersten Schritt (Overview) soll es dem Benutzer durch spezielle Metriken, Statistiken und Visualisierungen ermöglicht werden, einen Überblick über die Daten zu erhalten. Anschließend gibt es die Möglichkeit verschiedene Benutzergruppen anhand verschiedener Kriterien zu definieren. Die Kriterien können sich aus den Metriken, Statistiken und Visualisierungen ableiten sowie aus den Daten der Fragebögen, welche die Probanden für die Benutzerstudie ausfüllen (Zoom and Filter). Im letzten Schritt werden die Details der Benutzerstudie anhand der gewählten Benutzergruppen ausgearbeitet (Details-on-demand). Die Ergebnisse können anschließend in einem Studienbericht zusammengefasst werden. In Abbildung 3.1 werden die verschiedenen Metriken, Statistiken und Visualisierungen den drei Schritten des Visual Information Seeking Mantras zugeordnet. Durch Verwendung des Konzepts der Data Provenance soll der Benutzer zusätzlich jederzeit den Überblick über abgeleitete Daten behalten und auf alte Berechnungen zurückgreifen können.

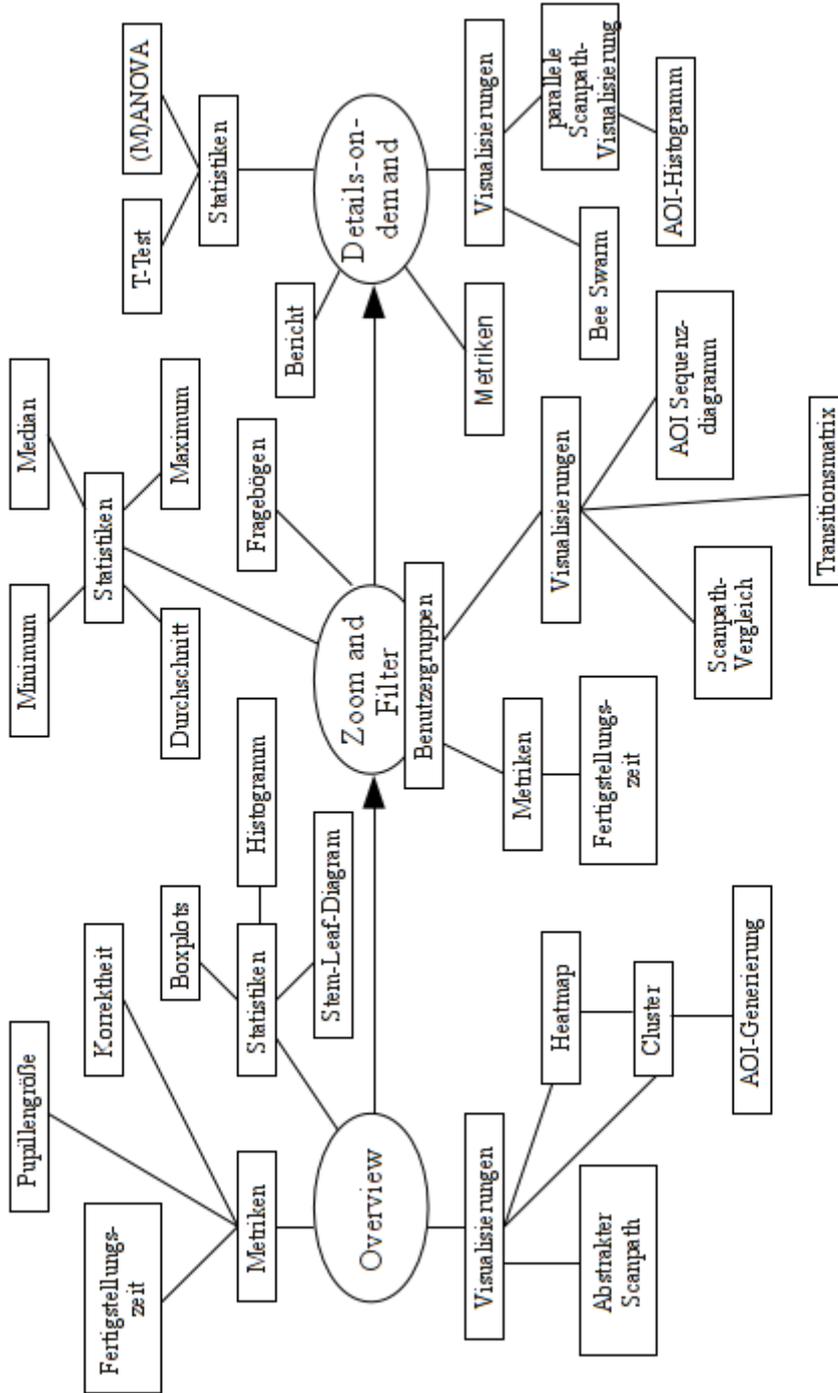


Abbildung 3.1: Das Analysekonzept basiert auf dem Visual Information Seeking Mantra. Zuerst soll ein Überblick über die Daten geschaffen werden (Overview), anschließend können Benutzergruppen erstellt werden (Zoom and Filter), welche anschließend im Detail untersucht werden können (Details-on-demand).

4 Lösungskonzept

In diesem Kapitel wird das Analysekonzept vorgestellt. Das Analysekonzept ist der zentrale Aspekt dieser Arbeit, welcher in Kapitel 5 prototypisch umgesetzt wird. Das Kapitel gliedert sich in einen Abschnitt zu den allgemeinen Anforderungen an das Konzept sowie einen Abschnitt mit der Beschreibung des Analysekonzepts.

4.1 Allgemeine Anforderungen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Anforderungen an das Analysekonzept definiert. Die Anforderungen umfassen ein einheitliches Datenformat, Integration von Metriken, Statistiken und Visualisierungen, Verwendung von Data Provenance Techniken, die teilautomatisierte Erstellung des Studienberichts sowie die Umsetzung des Visual Information Seeking Mantras.

Einheitliches Datenformat

Die wichtigste Anforderung an das Lösungskonzept ist die Verwendung eines einheitlichen Datenformats. Es soll einen zentralen Speicherort geben, in den die vom Eyetracker aufgenommenen Augenbewegungen, die Probandeneigenschaften, das subjektive Empfinden der Probanden bei den Aufgaben, die Ergebnisse der durchgeführten Seh-, Farb- oder Hörtests sowie die Antworten der Probanden zu den einzelnen Aufgaben gespeichert werden können. Es sollen alle während der Benutzerstudie gesammelten Daten an einem zentralen Ort gespeichert werden und jederzeit eingesehen werden können.

Auswahl von Metriken

Neben den gesammelten Daten des Eyetrackers – Fixationen, Sakkaden, Scanpaths oder Gaze Points – soll es die Möglichkeit geben, verschiedene Metriken bezüglich dieser Daten für die spätere Auswertung auswählen und definieren zu können.

Integration von statistischen Analyseverfahren

Ein wichtiger Bestandteil bei der Auswertung einer Benutzerstudie ist die Auswertung der Eyetracking-Daten mit statistischen Analyseverfahren. Deshalb soll es möglich sein verschiedene statistische Berechnungen durchführen zu können (bspw. Median, Durchschnitt, T-Test).

Erstellung von Visualisierungen

Die Auswertung einer Eyetracking-Benutzerstudie kann durch den Einsatz von Visualisierungen vereinfacht werden. Neben Standarddarstellungen, wie Heatmaps, Scanpaths und Transitionsmatrizen, sollen weitere Visualisierungstechniken verwendet werden können. Darüber hinaus soll die Definition von Areas of Interest unterstützt werden. Außerdem sollen Scanpaths mit Algorithmen zum Mustervergleich untersucht werden können.

Historie über durchgeführte Berechnungen

Um dem Benutzer die Möglichkeit zu bieten einen Überblick über durchgeführte Berechnungen zu bekommen, soll das Prinzip der Data Provenance umgesetzt werden.

Teilautomatisierte Erstellung des Studienberichts

Der Studienbericht, welcher die wichtigsten Ergebnisse einer Benutzerstudie widerspiegelt, ist ein fundamentaler Bestandteil der Benutzerstudie. Die Erstellung eines Studienberichts muss einfach möglich sein oder zum Teil automatisiert geschehen.

Umsetzung des Visual Information Seeking Mantras

Für die Analyse der Daten soll es möglich sein, sich am Visual Information Seeking Mantra zu orientieren, d. h. der Benutzer soll zuerst einen Überblick über alle Daten erhalten, über Filter sollen Gruppen gebildet werden können und über die Gruppen sollen einzelne Details ausgewertet werden können.

4.2 Analysekonzept

Die Auswertung der Eyetracking-Daten einer Benutzerstudie ist ein aufwändiger Prozess. Deswegen wird in diesem Abschnitt ein Konzept vorgestellt, welches helfen soll Ergebnisse mit wenig Aufwand zu erzielen. Das Analysekonzept basiert auf dem Visual Information Seeking Mantra und auf den Anforderungen aus Abschnitt 4.1. Außerdem wird für das Analysekonzept das Prinzip der Data Provenance verwendet, damit zu jedem Zeitpunkt der

Analyse die Herkunft der Daten und der Prozess, den diese durchlaufen haben, bekannt ist.

4.2.1 Visual Information Seeking Mantra

Das Visual Information Seeking Mantra definiert die drei Schritte Overview, Zoom and Filter und Details-on-demand. Jede gute Benutzeroberfläche sollte dieses Prinzip umsetzen, damit der Benutzer sich schnell in einem Programm zurechtfindet [58]. Das Mantra wird im Analysekonzept dieser Arbeit umgesetzt, so dass der Benutzer bei der Auswertung zuerst einen Überblick über die Daten erhält, anschließend über Filter Benutzergruppen erstellen kann, um diese im Detail untersuchen zu können. Abbildung 3.1 zeigt, welche Metriken, Statistiken und Visualisierungen für Eyetracking-Daten diesen drei Schritten zugeordnet werden. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden erläutert.

Schritt 1: Overview

Damit der Benutzer einen Überblick über die Daten der Benutzerstudie erhält, bieten sich verschiedene Metriken, Statistiken und Visualisierungen an. Anhand dieser soll der Benutzer am Anfang der Benutzerstudie (nach ca. 5-10 Probanden) entscheiden können, ob die Benutzerstudie fortgesetzt wird. Außerdem soll er einen ersten Überblick über die gesamten Studiendaten erhalten.

Metriken: Es bieten sich verschiedene Metriken an, um zu entscheiden, ob die Benutzerstudie erfolgsversprechend ist oder nicht. Die Antwortgenauigkeit der Probanden ist eine Möglichkeit dies zu entscheiden. Haben viele Probanden falsche Antworten gegeben, ist die Benutzerstudie möglicherweise falsch konzipiert worden oder es gibt Fehler in der Aufgabenstellung. Die Fertigstellungsdauer gibt Aufschluss darüber wie lange Probanden gebraucht haben die Aufgaben zu lösen. Sind diese Zeiten lange, kann dies bedeuten, dass die Aufgaben zu komplex oder kompliziert sind.

Statistik: Die in Abschnitt 2.2.8 vorgestellten Methoden der deskriptiven Statistik können verwendet werden, einen ersten Überblick über die Daten zu erhalten. Die Tabellen, Diagramme und Grafiken helfen Häufigkeitsverteilungen, Fehler und Ausreißer in den Daten sichtbar zu machen. Außerdem kann aus einigen Diagrammen, z. B. Boxplots, auf die Normalverteilung der Daten geschlossen werden. Wird nach einer Untersuchung der Daten anhand dieser Methoden klar, dass die Daten für eine weitere Auswertung nicht geeignet sind, kann die Analyse abgebrochen werden.

Visualisierungen: Die folgenden Visualisierungen geben einen guten ersten Eindruck über die Eyetracking-Daten. Anhand dieser Visualisierungen soll entschieden werden können, wie bei der Analyse weiter verfahren wird. Es soll unter anderem ein Eindruck gewonnen werden können, welche Probanden z. B. eine Benutzergruppe bilden und welche Areas of Interest sich anbieten, sollten diese nicht am Anfang festgelegt worden sein. Hierfür kann die Heatmap- und Clustervisualisierung eingesetzt werden. Bei diesen beiden Visualisierungen lässt sich ablesen, welche Bereiche intensiv von den Probanden angeschaut wurden. Diese Bereiche werden anschließend als AOIs definiert. Optimal wäre es, wenn die Bereiche automatisch generiert würden und vom Benutzer bestätigt werden müssten oder ggf. angepasst werden könnten (siehe Abbildung 4.1).

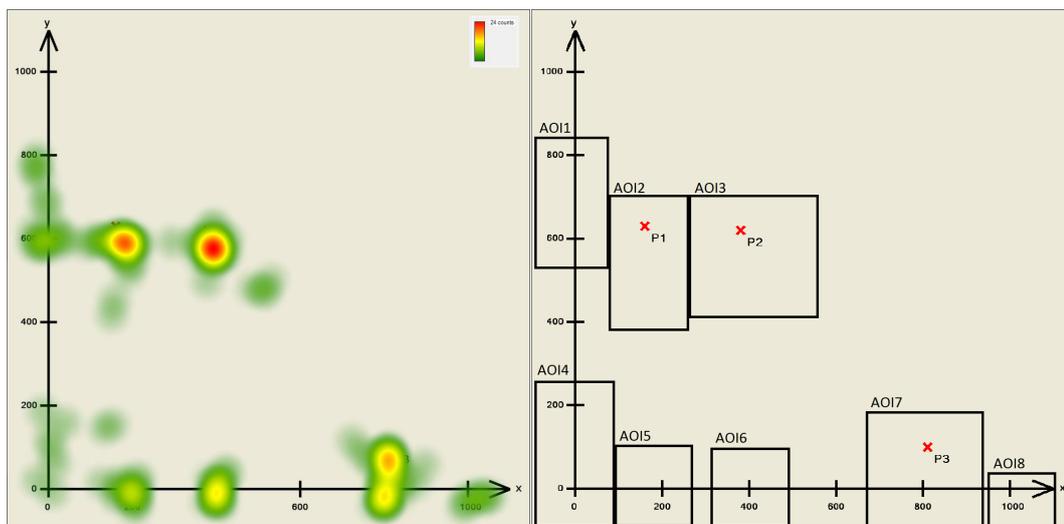


Abbildung 4.1: Erstellung von AOIs (rechts) anhand einer Heatmap (links) über alle Probanden für einen Stimulus.

Eine weitere Möglichkeit einen Eindruck über die Eyetracking-Daten zu erhalten ist ein abstrakter Scanpath (siehe Abbildung 4.2). Dieser enthält nicht alle Fixationen und Sakkaden, sondern zeigt schematisch die Übergänge zwischen Fixationsclustern. Dieser Scanpath kann für alle Probanden erstellt werden. Anschließend können die Scanpaths der einzelnen Probanden miteinander verglichen werden, um darüber verschiedene Benutzergruppen zu definieren.

Um die kognitive Auslastung der Probanden während der Benutzerstudie zu prüfen, kann ein Pupillendiagramm erstellt werden (siehe Abbildung 2.36). Dies ist eine weitere Möglichkeit herauszufinden, ob die Benutzerstudie zu komplex oder kompliziert ist.

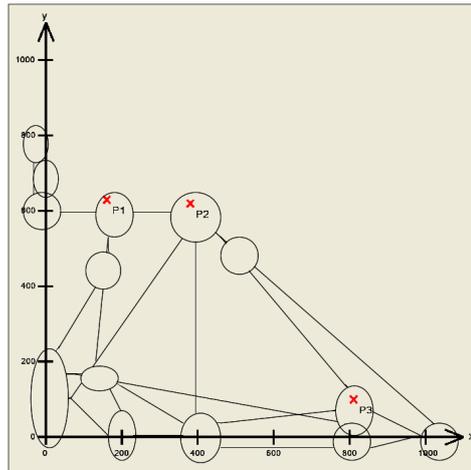


Abbildung 4.2: Abstrakter Scanpath, abgeleitet aus den AOIs. Er zeigt nicht einzelne Fixationen und Sakkaden an, sondern den groben Überblick über diese.

Schritt 2: Zoom and Filter

Der nächste Schritt, nach dem Verschaffen eines Überblicks, ist die Filterung. Bei Eyetracking-Benutzerstudien können Benutzergruppen für die Analyse definiert werden. Hierbei können unter anderem die Informationen aus den Fragebögen verwendet werden, aber auch die Auswertung von Metriken oder Statistiken. Außerdem gibt es verschiedene Visualisierungen, um zu erkennen, ob sich Probanden ähnlich verhalten.

Fragebögen: Die Informationen aus dem Fragebogen sind eine Möglichkeit Benutzergruppen zu definieren. Die Probanden können z. B. nach Alter, Geschlecht, Vorwissen, etc. eingeteilt werden. Diese Einteilung ist nicht sinnvoll, da diese Informationen unabhängig von der Aufgabe sein können. Deswegen bietet es sich bei einer Eyetracking-Benutzerstudie an die Eyetracking-Daten zu verwenden, um Benutzergruppen zu definieren.

Metriken: Je nachdem welche Metriken für die Benutzerstudie relevant sind, können diese dazu dienen die Benutzergruppen zu definieren. Eine Möglichkeit ist die Einteilung der Probanden anhand der Fertigstellungsdauer. Hierbei kann zwischen langsamen, mittleren und schnellen Benutzern unterschieden werden. Es kann jede beliebige andere Metrik verwendet werden, wie z. B. die Fixationsanzahl (viel, mittel, wenig). Die Probanden können auch mit Hilfe des Medians oder Durchschnitts einer Metrik in zwei Benutzergruppen eingeteilt werden.

Visualisierungen: Die Ähnlichkeit der Scanpaths kann helfen Probanden mit einem ähnlichen Wert in eine Gruppe zusammenzufassen. Über einen Mustervergleich (vgl. [2] und [6]) AOI Sequenzdiagramme oder Transitionsmatrizen können Scanpaths verglichen werden.

Schritt 3: Details-on-demand

Für die detaillierte Auswertung der Benutzerstudie können die zuvor definierten Benutzergruppen verwendet werden.

Metriken: In Abschnitt 2.4.4 werden eine Reihe von Metriken aufgelistet, welche für die Analyse verwendet werden können. Je nach Studienaufgabe können unterschiedliche Metriken von Interesse sein. Die geeigneten Metriken müssen für jede Analyse identifiziert und berechnet werden.

Statistiken: Für die statistische Auswertung einer Eyetracking-Benutzerstudie stehen verschiedene Berechnungen zur Verfügung. Als Grundlage für die Berechnung einer Statistik dienen die berechneten Metriken. Die einfachsten Berechnungen sind der Durchschnitt, Median, das Minimum und Maximum einer Datenmenge. Werden Stichproben verglichen, bieten sich der Einstichproben T-Test, der Zweistichproben T-Test, die ANOVA oder MANOVA an. Diese geben Auskunft über die Signifikanz der Hypothesenergebnisse. Sind die Ergebnisse nicht signifikant oder wird die Nullhypothese bestätigt, kann die Benutzerstudie überarbeitet werden oder es kann anhand der gewonnenen Erfahrungen eine neue Hypothese gebildet werden.

Einen Überblick, welche Metriken mit welchen Statistiken verwendet werden können und wie vielen Probanden benötigt werden, gibt Tabelle 4.1. Es wird zwischen einem einzelnen Probanden und einer beliebigen Anzahl (mehreren) Probanden unterschieden.

Visualisierungen: Für die Untersuchung der Daten von den definierten Benutzergruppen stehen verschiedene Visualisierungen zur Verfügung. Die Bee Swarm Analyse kann z. B. verwendet werden die Eyetracking-Videos mehrere Probanden sekundengenau zu untersuchen und zu vergleichen. Die parallel Scanpath-Visualisierung erlaubt es definierte AOIs und Benutzergruppen über der Zeit zu betrachten. Sie gibt Auskunft über die Gazedauer der Probanden in den AOIs, die Verteilung der Gesamtdauer auf die AOIs sowie die Fixationsdauer in den AOIs. Eine weitere Möglichkeit Informationen über die AOIs zu erhalten, ist die Verwendung eines AOI Histogramms. Beim AOI Histogramm wird für jede AOI die Häufigkeitsverteilung verschiedener Metriken über der Zeit aufgetragen. Dadurch wird Auskunft darüber gegeben zu welchen Zeitpunkten ein hoher oder niedriger Wert einer Metrik vorlag.

Studienbericht: Die Analyseergebnisse werden am Ende einer Benutzerstudie in einem Studienbericht zusammengefasst. Hierfür muss während der Auswertung festgehalten werden, welche Ergebnisse relevant für den Studienbericht sind. Um den Aufwand der Erstellung des Studienberichts gering zu halten, bietet es sich an, dass der Benutzer die Ergebnisse für den Studienbericht speichern kann. Da der Aufbau eines Studienberichts einem bestimmten Schema folgt, ist es kein Problem Teile des Studienberichts automatisch

zu erstellen, so dass der Benutzer nur die individuellen Ergebnisse der Benutzerstudie beschreiben muss.

Metriken	Median	Durchschnitt	Maximum	Minimum	Einstichproben T-Test	Zweistichproben T-Test	ANOVA	MANOVA
Fertigstellungsdauer	M	M	M	M	M	-	M	-
Fixationsanzahl	M	M	M	M	M	-	M	-
Fixationsdauer	E	E	E	E	M	M	M	M
Fixationsrate	E	E	E	E	E	M	M	M
Räumliche Verteilung von Fixationen	M	M	M	M	M	-	M	-
Fixationswiederholungen	M	M	M	M	M	-	M	-
Sakkadenanzahl	M	M	M	M	M	-	M	-
Sakkadendauer	E	E	E	E	E	M	M	M
Sakkadengeschwindigkeit	M	M	M	M	M	-	M	-
Sakkadenrichtung	E	E	E	E	E	M	M	M
Sakkadenamplitude	E	E	E	E	E	M	M	M
Sakkadenumfang	E	E	E	E	E	M	M	M
Gazedauer	E	E	E	E	E	M	M	M
Gazeanzahl	M	M	M	M	M	-	M	-
Gazerate	M	M	M	M	M	-	M	-
Gazes pro AOI	E	E	E	E	E	M	M	M
Gazewahrscheinlichkeit	E	E	E	E	E	M	M	M
Scanpathdauer	M	M	M	M	M	-	M	-
Scanpathlänge	M	M	M	M	M	-	M	-
Scanpathfläche	M	M	M	M	M	-	M	-
Scanpathdichte	M	M	M	M	M	-	M	-
Pupillengröße	E	E	E	E	E	M	M	M
Anzahl Pupillenbewegungen	M	M	M	M	M	-	M	-
Blinzelrate	M	M	M	M	M	-	M	-

Tabelle 4.1: Matrix der Metriken und Statistiken. Welche Statistik kann für welche Metrik berechnet werden und wie viele Probanden müssen für die Berechnung verwendet werden? E = ein Proband, M = mehrere Probanden, - = Berechnung nicht möglich.

4.2.2 Data Provenance

Data Provenance beschreibt die Herkunft von Daten sowie den Prozess den diese durchlaufen haben (siehe Abschnitt 2.1.4). Dieses Prinzip kann für die Analyse einer Eyetracking-Benutzerstudie verwendet werden, so dass bekannt ist, woher die Daten kommen und welchen Prozess die Daten durchlaufen haben, wenn sie z. B. in einem Diagramm visualisiert werden.

Datenherkunft

Bei einer Eyetracking-Benutzerstudie kann die Datenherkunft zwei Ursprünge haben. Zum einen stammen die Daten aus der Eyetracking-Aufnahme und zum anderen gibt es Daten, die der Proband angibt.

Eyetracking-Daten: Je nachdem welches Eyetracking-Modell für eine Eyetracking-Benutzerstudie verwendet wird, können die gesammelten Daten unterschiedliche Namen haben, aber im Allgemeinen stehen die folgenden Daten für die Analyse zur Verfügung:

- Gazeposition (X/Y, links/recht)
- Augenposition (X/Y, links/recht)
- Pupillengröße (X/Y, links/recht)
- Sakkaden (X/Y, links/recht)
- Fixationen (X/Y, links/recht)
- Kopfposition
- Stimulusname
- Eventdaten
- Augenschläge
- Reaktionszeit
- Mausclicks
- Tasteneingaben
- Zeitstempel
- Kameraposition
- Distanz (Kamera - Auge)
- Fixationsindex
- Stimulusgröße
- Stimulusposition
- Fixationsdauer

Probandendaten: Neben den Daten vom Eyetracker werden Daten über den Probanden gesammelt. Diese stammen unter anderem aus den Fragebögen, die der Proband ausgefüllt hat, sowie aus den Antworten, welche der Proband zu den gestellten Aufgaben gegeben hat. Die Probandendaten werden erhoben, um mögliche Störvariablen auszuschalten (vgl. Abschnitt 2.2.3). Je nach Aufgabenstellung und Art der Probanden könnten die gesammelten Daten abweichen. Mögliche Daten, die für eine Eyetracking-Benutzerstudie im Bereich Visualisierung von Interesse sein könnten, sind:

- Alter
- Geschlecht
- Muttersprache
- Sehhilfe
- Abschluss
- Studienfach
- Mathematiknote/-kenntnisse
- Vorkenntnisse im Bereich Visualisierung
- Nasa TLX Werte
- System Usability Scores

Außerdem sollten vor der Benutzerstudie verschiedene Tests durchgeführt werden, um die Sehkraft zu testen, Farbfeldsichtigkeiten auszuschließen oder das Hörvermögen zu testen. Diese Daten können darüber entscheiden, ob ein Proband in die Analyse einbezogen wird oder nicht.

Datenprozess

Die gesammelten Daten der Benutzerstudie werden im Analyseprozess visualisiert oder verwendet, um Berechnungen durchzuführen. Es entstehen neue Daten, für die festgehalten werden soll, wie die Daten entstanden. In dieser Arbeit werden die Daten einer von drei Kategorien zugeordnet. Die Daten gehörten entweder der Kategorie Metrik, Statistik oder Visualisierung an. Die Daten durchlaufen, je nach Kategorie, unterschiedliche Prozesse (siehe Abbildung 4.3).

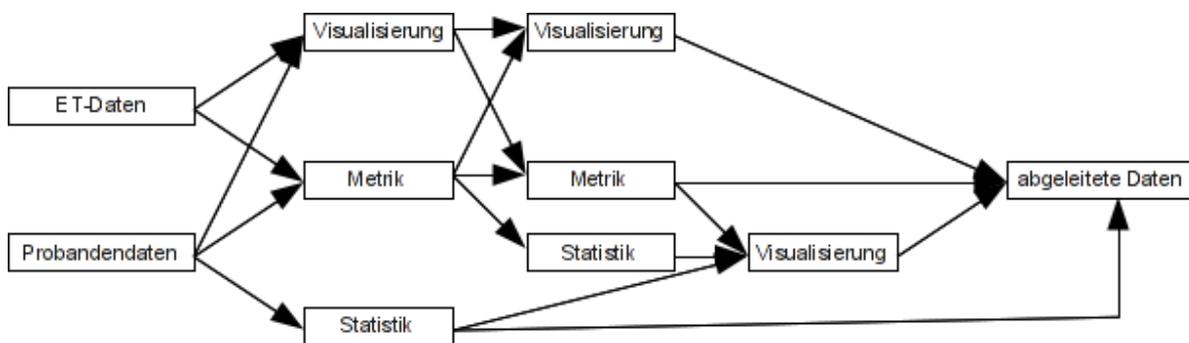


Abbildung 4.3: Data Provenance der Daten einer Eyetracking-Benutzerstudie. Die Daten stammen entweder vom Eyetracker oder sind Informationen über den Probanden. Die Daten können den drei Kategorien Metrik, Statistik und Visualisierung zugeordnet werden, nachdem verschiedene Transformationen durchgeführt wurden.

Kategorie Metrik: Daten der Kategorie Metrik können direkt aus den Rohdaten berechnet werden (z. B. Fixationsanzahl). Außerdem können sie abhängig von einer Visualisierung

(z. B. Fixationen pro AOI) oder einer anderen Metrik sein (z. B. Verhältnis Fixationen zu Sakkaden).

Kategorie Statistik: Statistische Berechnungen können für die Eyetracking-Daten auf Basis von Metrikdaten durchgeführt werden. Daten der Kategorie Statistik durchlaufen zwei Transformationen, zuerst wird die Metrik berechnet und anschließend die Statistik (z. B. minimale Fixationsanzahl). Bei den Probandendaten können Statistiken direkt berechnet werden (z. B. durchschnittliches Alter).

Kategorie Visualisierung: Daten der Kategorie Visualisierung können entweder direkt aus den Rohdaten (z. B. Heatmap) entstehen oder leiten sich aus Daten der Kategorie Metrik (z. B. Pupillengrößendiagramm), Statistik (z. B. Boxplots) oder aus anderen Visualisierungen (z. B. parallel Scanpath-Visualisierung) ab. Es werden eine, zwei oder drei Transformationen durchgeführt.

Darstellung des Datenprozesses

Die Darstellung des Datenprozess wird an die Timeline von Facebook angelehnt (siehe Abbildung 4.4). Die Daten sind zeitlich absteigend sortiert. Jeder Knoten enthält die wichtigsten Informationen, z. B. Szenarioname, Stimulusname, berechnete Metrik, berechnete Statistik, Probanden, Datum, Uhrzeit, Ergebnis der Berechnung (siehe Abbildung 5.20). Es kann festgestellt werden, welche Daten für eine Berechnung verwendet wurden und welche Berechnungen während der Analyse durchgeführt wurden.

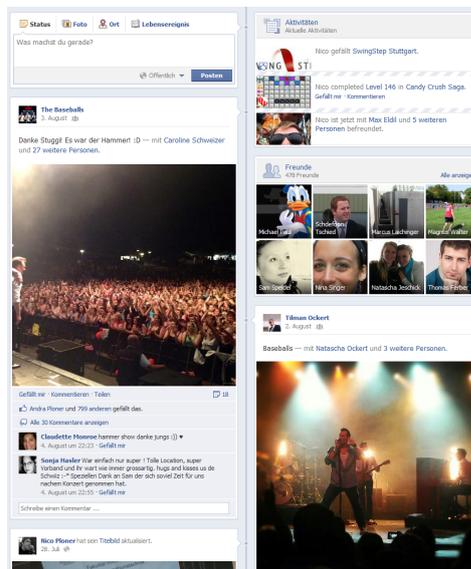


Abbildung 4.4: Timeline aus Facebook, welche im Framework als Vorbild für die Historie verwendet wird.

5 Implementierung

In diesem Kapitel wird das prototypisch umgesetzte Lösungskonzept vorgestellt. Hierfür wird im ersten Teil die Architektur des Frameworks eTaddy (eyeTracking Analysis, conDuction, and Designtool for userstudYs) beschrieben. Im zweiten Teil wird die prototypische Umsetzung der Oberfläche und die Logik der Plug-ins erklärt. Die Anforderungen an die Architektur wurden in Abschnitt 4.1 definiert und wurden in der Architektur umgesetzt.

5.1 Architektur

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Architektur des Frameworks sowie den Entwurf der Komponenten und Klassen. Hierfür werden die verwendeten Entwurfsmuster, die Komponenten des Frameworks sowie die Klassen beschrieben. Zum Schluss werden Abläufe bei der Benutzung des Frameworks beschrieben.

5.1.1 Verwendete Entwurfsmuster

Für die allgemeine Architektur des Frameworks wird die Drei-Schichten-Architektur verwendet. Für die Oberfläche wird das von Microsoft vorgeschlagene Model View Viewmodel Muster verwendet. Außerdem soll der Benutzer über ein Plug-in-System neue Metriken, Statistiken und Visualisierungen zum Framework hinzufügen können.

Drei-Schichten-Architektur

Die Architektur des Frameworks basiert auf dem Drei-Schichten-Modell (siehe Abbildung 5.1). Die drei Schichten der Architektur sind die Präsentationsschicht (Benutzeroberfläche), die Anwendungsschicht (Logik-Komponente) sowie die Datenhaltungsschicht (Datenbank). Diese Architekturform erlaubt es, dass das Framework modular erweiterbar sowie änderbar ist. Es kann zum Beispiel die Oberfläche ausgetauscht werden, ohne Änderungen an der Anwendungs- und Datenhaltungsschicht vornehmen zu müssen.

Model View Viewmodel (MVVM)

Für die Benutzeroberfläche wird das Model View Viewmodel (MVVM) Muster verwendet (siehe Abbildung 5.1) [41]. Das MVVM basiert auf dem bekannteren Model-View-Controller-Muster (MVC) [43] und enthält ein Model und eine View. Anstatt dem Controller gibt es im MVVM das Viewmodel. Die Trennung zwischen der View, dem Viewmodel und dem Model wurde entwickelt, so dass die View von einem professionellen Designer in einer deklarativen Sprache, wie XAML oder HTML, erstellt werden kann. Das Viewmodel und Model wiederum sollen von einem Programmierer in einer objektorientierten Programmiersprache erstellt werden.

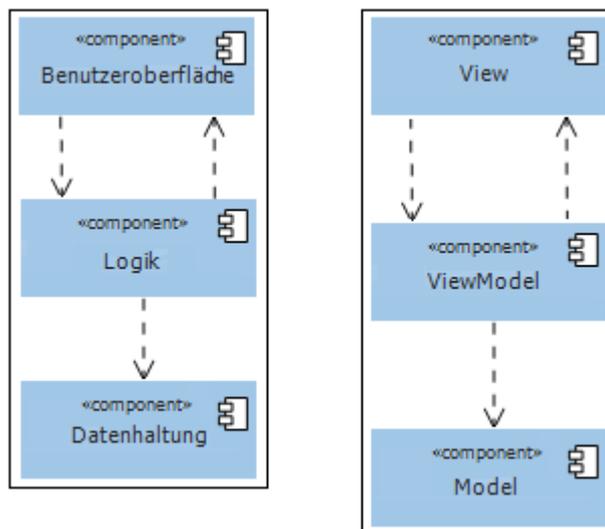


Abbildung 5.1: Die beiden verwendeten Entwurfsmuster der Architektur. Links: Drei-Schichten-Architektur, welche aus den Schichten Benutzeroberfläche, Logik und Datenhaltung besteht. Rechts: das Model View Viewmodel (MVVM) Muster, welches aus den drei Schichten View (Oberfläche), ViewModel (Oberflächenmodell) und Model (Datenmodell) besteht.

View: Die View enthält alle grafischen und visuellen Elemente, wie Schaltflächen, Textfelder, Fenster oder sonstige Widgets.

Viewmodel: Über Datenbindung (Databinding) wird eine Verbindung zwischen der View und dem Model hergestellt. Das Viewmodel ist dafür verantwortlich die Daten aus dem Model aufzubereiten, so dass sie von der View angezeigt werden können. Das Viewmodel wird als Datenkontext (Data Context) an die View gebunden. Ändern sich die Werte im Model, werden diese über das Viewmodel in der View geändert angezeigt. Dadurch gibt es keine direkte Verbindung zwischen der View und dem Model und die View kann unabhängig vom Model geändert werden.

Model: Das Model enthält die Daten der Anwendung, welche später in der View angezeigt werden sollen.

Plug-in-System

Um neue Visualisierungen, Metriken oder Statistiken in das Framework einbinden zu können, wird ein Plug-in-System entwickelt. Über das Plug-in-System können beliebige Klassen eingebunden oder entfernt werden. Es wird jeweils eine getrennte Plug-in-Schnittstelle für die Metriken, Statistiken und Visualisierungen zur Verfügung gestellt, damit diese voneinander unabhängig sind.

5.1.2 UML-Diagramme

Um die Zusammenhänge des Frameworks zu beschreiben, werden im Folgenden UML-Diagramme für die Komponenten des Systems, für die Klassen des Frameworks und für Abläufe und Aktivitäten verwendet.

Komponentendiagramm

Wie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, basiert die Architektur des Frameworks auf der Drei-Schichten-Architektur. Diese Struktur spiegelt sich auch im Komponentendiagramm wieder (siehe Abbildung 5.2). Das Framework besteht aus den drei Komponenten *User Interface*, *Logic* und *Data Model*. Von der Komponente *Logic* leitet sich zusätzlich noch die Komponente *StandardPlugins* ab, d. h. die Klassen der Komponente *StandardPlugins* müssen eine Schnittstelle der *Logic*-Komponente implementieren.

Klassendiagramme

In diesem Abschnitt werden die Klassendiagramme für die einzelnen Komponenten vorgestellt. Die Klassendiagramme dienen dem Entwurf der Klassen einer Komponente und enthalten Methoden und Eigenschaften.

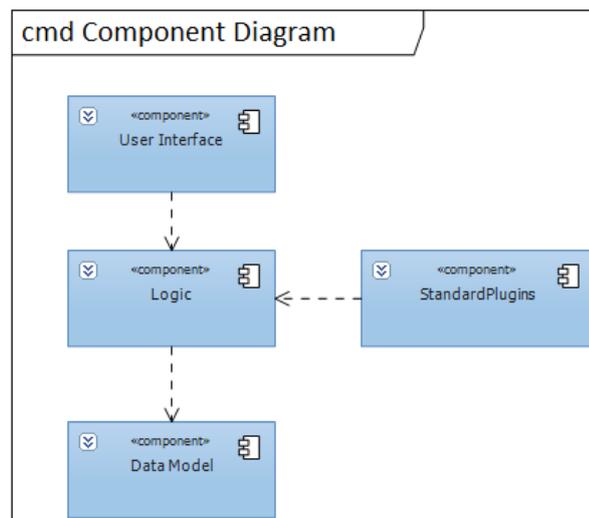


Abbildung 5.2: Im Komponentendiagramm spiegelt sich die Verwendung der Dreischichten-Architektur wieder. Das Framework besteht aus den Komponenten *User Interface*, *Logic* und *Data Model*. Für implementierte Plug-ins gibt es die Komponente *StandardPlugins*, welche eine Schnittstelle der Logik implementieren muss.

Benutzeroberfläche: Die Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 5.3) enthält als Hauptfenster der Anwendung die Klasse *MainWindow*. Darunter liegen die Hauptklassen für die Erstellung, Durchführung und Analyse einer Eyetracking-Benutzerstudie. Die Klasse *ProjectUC* ist ein User Control welches alle Oberflächenelemente für die Erstellung einer Benutzerstudie enthält. Für die Durchführung einer Benutzerstudie gibt es die Klasse *ModeratorUC* und *ParticipantDialog*, welche die Elemente für den Versuchsleiter bzw. den Probanden enthalten. Im *ParticipantDialog* werden unterschiedliche Dokumente und Fragebögen angezeigt, für die es jeweils eine eigene Klasse gibt. Das Tutorial und die Einverständniserklärung werden in der Klasse *DocumentUC* verwaltet. Der allgemeine Fragebogen befindet sich in der Klasse *QuestionnaireUC*. Für den Sehtest gibt es die Klasse *VisiontestUC* und für den Nasa TLX Fragebogen die Klasse *NasaTLXUC*. Die Analyse wird über die Klasse *AnalysisUC* gesteuert. Je nach dem welchen Typ ein Plug-in hat, gibt es für die Metriken die Klasse *MetricUC*, für die Statistiken die Klasse *StatisticUC* und für die Visualisierungen die Klasse *VisualizationUC*. Für die Auswertung der Fragebögen und der Erstellung eines Studienberichts in LaTeX wird die Klasse *QuestionnaireAnalysisUC* verwendet.

Neben den Klassen für die Benutzerstudie gibt es noch die Klassen *DatabaseDialog* und *MessageDialog*. *DatabaseDialog* ist der Dialog für die Verbindung mit der Datenbank. *MessageDialog* ist der Dialog, um Fehler- und Hinweismeldungen anzuzeigen.

Logik: Die Logik-Komponente enthält das Plug-in-System (siehe Abbildung 5.5) und Klassen für die Berechnung und Aufbereitung von Daten für die Oberfläche. Das Plug-in-

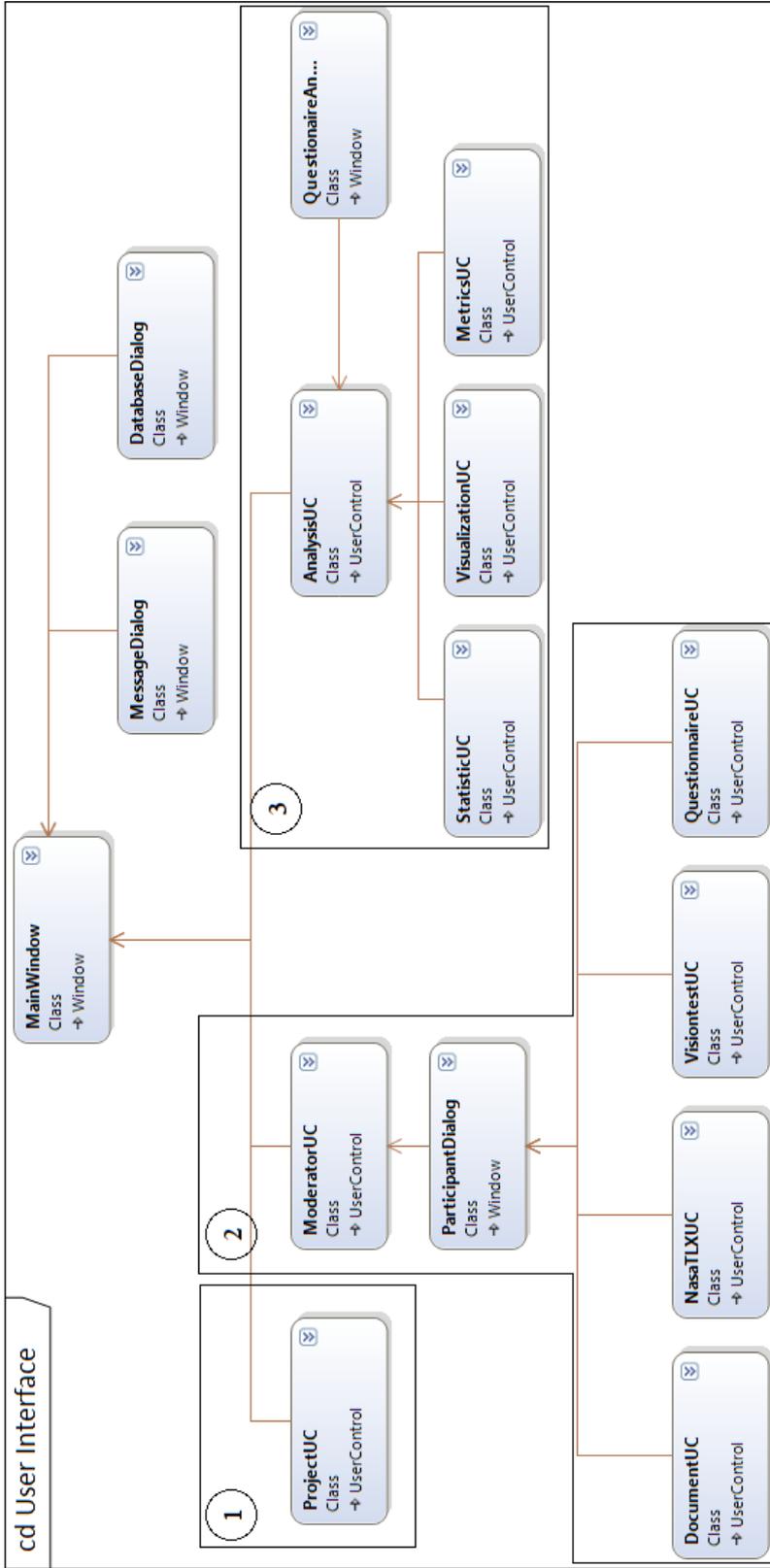


Abbildung 5-3: Im Klassendiagramm für die Benutzeroberfläche spiegelt sich der typische Ablauf einer Benutzerstudie wider (von links nach rechts im Diagramm). Neben dem Hauptfenster und Hilfs-Dialogen, gibt es für die Erstellung (1), Durchführung (2) und Analyse (3) einer Benutzerstudie jeweils eigene Klassen. Die Durchführung der Benutzerstudie teilt sich in Versuchsleiter und Proband auf. Bei der Analyse wird zwischen verschiedenen Typen der Plug-ins unterschieden.

System besteht aus den Klassen *PluginCollection*, *PluginSectionHandler* und *DataItem* sowie aus den Schnittstellen *IStatisticPlugin*, *IMetricPlugin* und *IVisPlugin*.

Die Klasse *PluginCollection* enthält die Eigenschaften *MetricPlugin*, *StatisticPlugin* und *VisPlugin*, welche Listen des jeweiligen Typs für die erstellen Plug-ins bereitstellen.

Die Klasse *PluginSectionHandler* ist eine Implementierung der Schnittstelle *IConfigurationSectionHandler*, welche die Methode *Create* realisiert. Diese liest eine XML-Datei aus und erstellt die Plug-ins welche in der Datei definiert wurden. Die einzubindenden Plug-ins müssen in der XML-Datei *App.Config* als XML-Knoten hinzugefügt werden (siehe Abschnitt 5.2.2).

Die Schnittstellen *IStatisticPlugin*, *IMetricPlugin* und *IVisPlugin* enthalten jeweils die Eigenschaften *Name* und *Participants* sowie die Methode *Create*. Die *Name*-Eigenschaft enthält den Namen des Plug-ins. Die Eigenschaft *Participants* legt fest wie viele Probanden verarbeitet werden können. Die Eigenschaft kann im *IMetricPlugin* entweder den Wert „einer“ oder den Wert „mehrere“ annehmen. Im *IStatisticPlugin* können die Werte „egal“ oder „mehrere“ verwendet werden und im *IVisPlugin* „einer“, „mehrere“ oder „alle“. Diese Eigenschaft wird benötigt, um während der Analyse die entsprechenden Optionen bei den Oberflächenelementen für die Metriken, Statistiken und Visualisierungen ein- und auszublenden. Die Methode *Calculate* führt die Berechnung für die jeweilige Klasse durch. Um beim Anzeigen der berechneten Metrik die richtigen Spaltenköpfe für die Tabelle zu erhalten, wird die Klasse *DataItem* im *IMetricPlugin* verwendet.

Neben den Plug-ins enthält die Komponente *Logic* Berechnungsklassen, um die Daten für die Oberfläche aufzubereiten (siehe Abbildung 5.4). Die Klassen *FilenameToDirectoryConverter* und *ListToItemConverter* bringen die Daten für die Treeviews in das gewünschte Format. Die Klasse *TreeviewExtensions* enthält eine Methode, um ein Element in einer Treeview zu markieren, ohne dass der Benutzer ein Element anklicken muss. Dies ist beim Erstellen eines neuen Projekts von Bedeutung. Die Klasse *BoxPlot* ist dafür zuständig, ein Boxplot-Diagramm zu erstellen. Die Klasse *CalculateQuestionnaire* fasst die Antworten der Probanden in einer Liste zusammen, welche in der Oberfläche angezeigt werden.

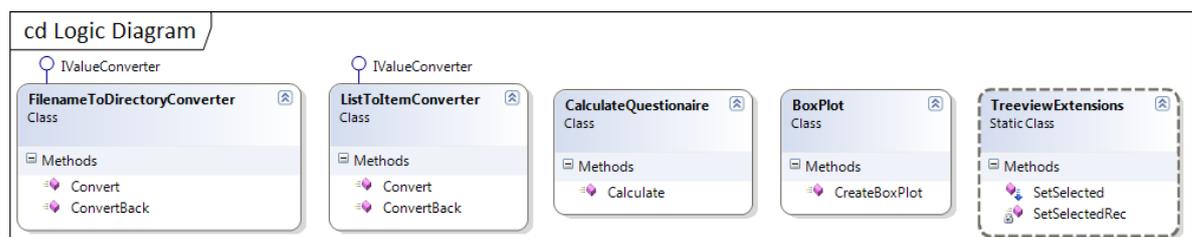


Abbildung 5.4: Die Komponente *Logic* enthält neben dem Plug-in-System auch Klassen für die Berechnung eines Boxplots, der Auswertung des Fragebogens sowie Klassen, um die Daten in den Treeviews der Oberfläche in das passende Format zu bringen.

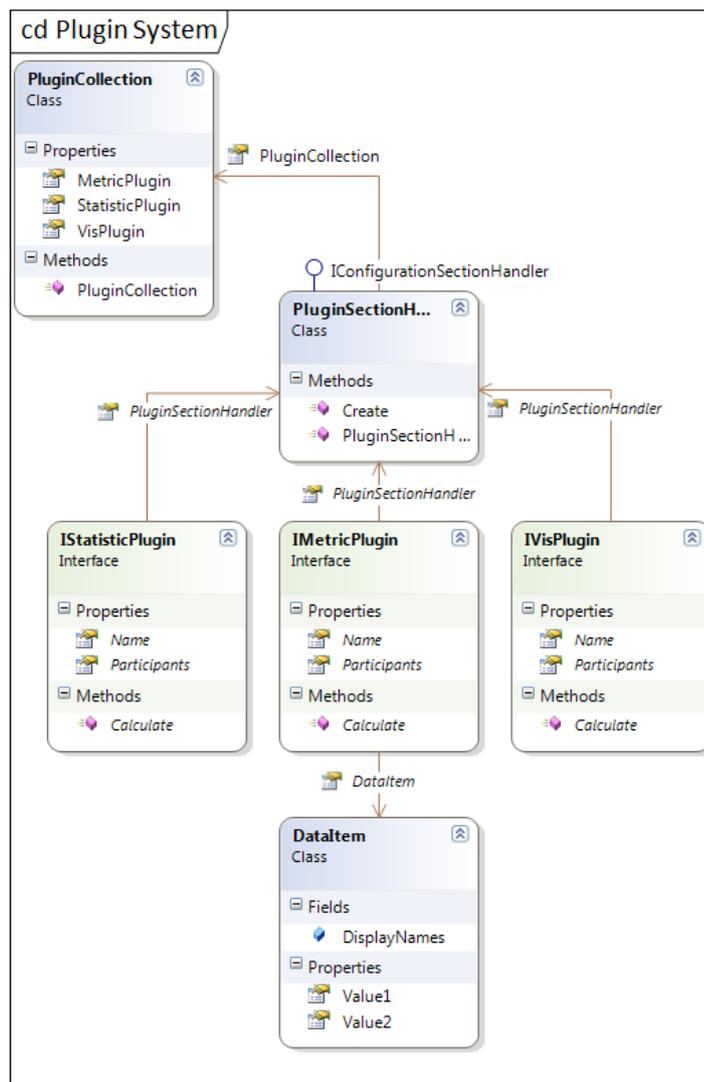


Abbildung 5.5: Das Plug-in-System mit den Schnittstellen *IStatisticPlugin*, *IMetricPlugin* und *IVisPlugin* sowie den Klassen *PluginSectionHandler* und *PluginCollection*. Neue Plug-ins müssen von einer der Schnittstellen abgeleitet werden, entsprechend des jeweiligen Typs.

Datenbank: Das Datenbankmodell (siehe Abbildung 5.6) definiert die Struktur und Abhängigkeiten der Daten. An oberster Stelle steht das Superprojekt. Ein Superprojekt kann beliebig viele Projekte enthalten. Ein Projekt kann beliebig viele Szenarien und Probanden enthalten. Dem Projekt stehen außerdem noch verschiedene Dateien, z. B. das Tutorial, die Einverständniserklärung oder die Sehtestbilder, zur Verfügung. Ein Szenario enthält beliebig viele Stimuli sowie Berechnungen. Für einen Stimulus können AOIs und semantische Objekte erstellt werden. Außerdem enthält ein Stimulus Fixationen. Die Fixationen müssen über die Recordings dem Probanden zugewiesen werden. Der Stimulus ist über

den *StimulusInRecording* mit dem Recording verbunden. Es ist möglich für einen Probanden mehrere Recordings für einen Stimulus zu erstellen. Neben den Recordings hat jeder Proband auch eine Fragebogeninstanz sowie Antworten für die ausgefüllten Fragebögen. Die Fragebogeninstanz muss einem speziellen Fragebogen zugewiesen werden, welcher über mehrere Fragen verfügen kann. Da eine Frage zu mehreren Fragebögen gehören kann, muss die Frage über *QuestionInQuestionnaire* einem Fragebogen zugeordnet werden.

Ablauf- und Aktivitätsdiagramme

Im Nachfolgenden werden die drei Schritte einer Benutzerstudie - Erstellen, Durchführen und Analysieren - sowie der allgemeine Ablauf bei der Verwendung des Frameworks anhand von Ablauf- und Aktivitätsdiagrammen erläutert.

Allgemeiner Ablauf: Die allgemeine Reihenfolge bei der Verwendung des Frameworks, besteht aus der Erstellung einer Benutzerstudie, der Durchführung der Benutzerstudie und der Analyse der aufgenommenen Werte. Zwischen der Durchführung der Benutzerstudie und der Auswertung wird ein Eyetracker verwendet, um die Augenbewegung der Probanden aufzunehmen. Die Daten der Benutzerstudie werden in einer Datenbank gespeichert. Die Analyse wird wieder mit dem Framework durchgeführt. Falls sich am Ende der Benutzerstudie bei der Analyse herausstellt, dass keine oder unzureichende Ergebnisse vorliegen, kann die Benutzerstudie überarbeitet und nochmal durchgeführt werden. War die Benutzerstudie und Analyse erfolgreich, kann ein Studienbericht über die Ergebnisse erstellt werden (siehe Abbildung 5.7).

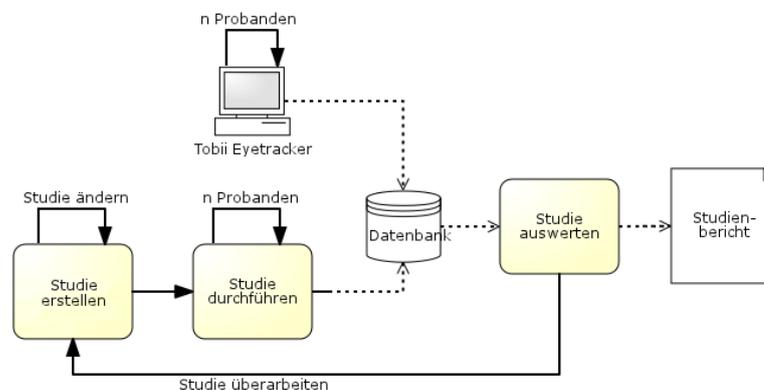


Abbildung 5.7: Ablauf bei der Verwendung des Frameworks: Die Benutzerstudie wird zuerst im Framework erstellt und durchgeführt. Die Augenbewegung wird über einen externen Eyetracker aufgenommen. Die Daten aus der Durchführung werden in die Datenbank geschrieben und werden für die Auswertung der Benutzerstudie verwendet. Liegen nach der Auswertung signifikante Ergebnisse vor, kann ein Studienbericht teilautomatisch erstellt werden. Falls dies nicht der Fall ist, kann die Benutzerstudie überarbeitet und neu durchgeführt werden.

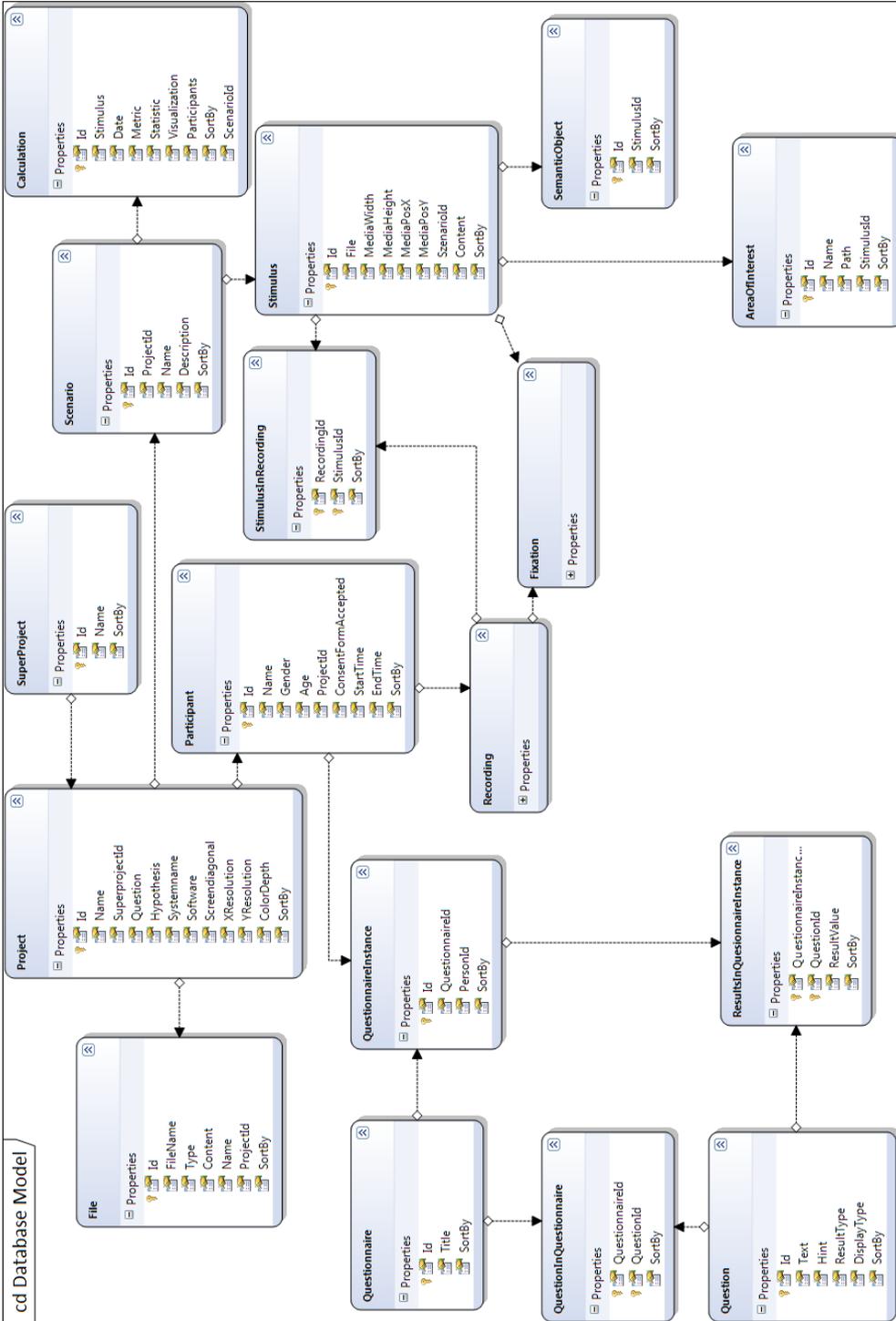


Abbildung 5.6: Das Datenbankmodell enthält die Struktur der Daten für Projekte. Ein Projekt ist einem Superprojekt zugeordnet. Zu einem Projekt gehören Szenarien und Probanden. Szenarien enthalten Stimuli und Berechnungen. Ein Stimulus ist über Recordings mit dem Probanden verbunden. Ein Recording enthält die Fixationsdaten aus der Eye-tracking Aufnahme. Außerdem gibt es Klassen für die Fragebögen, Fragen und Antworten der Benutzerstudie.

Benutzerstudie erstellen: Bei der Erstellung der Benutzerstudie muss im *MainWindow* das User Control *ProjectUC* angezeigt werden. Dort kann die Benutzerstudie erstellt werden und das neue Projekt wird beim Speichern über das *MainWindow* in die Datenbank geschrieben. Es ist dann in der *ProjectsObservable*-Liste enthalten (siehe Abbildung 5.8).

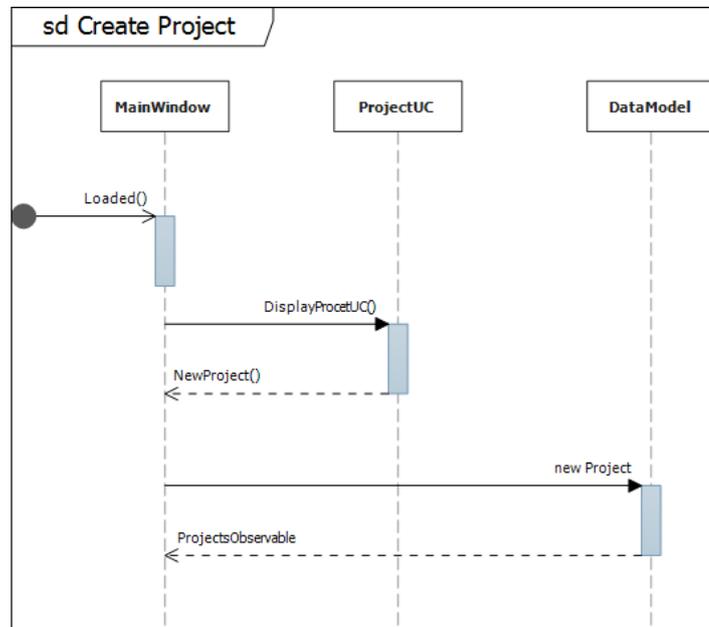


Abbildung 5.8: Eine Benutzerstudie wird über die *ProjectUC* im *MainWindow* erstellt, in die Datenbank geschrieben und ist dann in der *ProjectsObservable*-Liste verfügbar.

Benutzerstudie durchführen: Bei der Durchführung der Benutzerstudie muss eine eindeutige Identifikationsnummer für den Probanden angegeben werden, so dass die Daten dem Probanden zugewiesen werden können. Anschließend muss der Proband die Einverständniserklärung akzeptieren und den Fragebogen ausfüllen. Falls der Sehtest erfolgreich durchgeführt wurde, wird dem Probanden das Tutorial gezeigt, die Benutzerstudie durchgeführt und der Nasa TLX Fragebogen ausgefüllt (siehe Abbildung 5.9).

Benutzerstudie analysieren: Für die Analyse der Benutzerstudie muss zuerst das Projekt und das Szenario ausgewählt werden. Anschließend werden der Stimulus und ein oder mehrere Probanden ausgewählt. Dann kann eine Metrik berechnet werden oder, abhängig davon welche Metrik ausgewählt wurde, eine Statistik oder es kann eine Visualisierung angezeigt werden (siehe Abbildung 5.9).

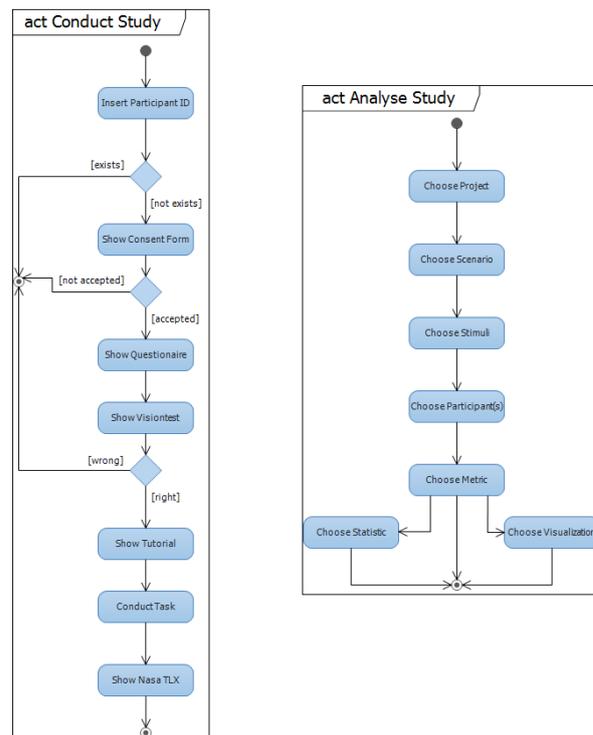


Abbildung 5.9: Die beiden Ablaufdiagramme zeigen links das Durchführen einer Benutzerstudie und rechts die Analyse einer Benutzerstudie. Bei der Durchführung der Benutzerstudie muss eine Probanden-ID vom Moderator angegeben werden. Der Proband muss die Einverständniserklärung akzeptieren (falls er dies nicht tut, wird die Studie abgebrochen), den Fragebogen ausfüllen, den Sehtest machen (falls er diesen nicht besteht, wird die Studie abgebrochen), das Tutorial lesen, die Aufgaben ausführen und den Nasa TLX Fragebogen ausfüllen. Bei der Analyse muss das Projekt, das Szenario, der Stimulus und die Probanden ausgewählt werden. Dann kann entweder eine Metrik, eine Statistik oder eine Visualisierung berechnet und angezeigt werden.

5.2 GUI

Im folgenden Abschnitt wird die Umsetzung der Architektur und des Lösungskonzepts prototypisch gezeigt. Der Prototyp setzt die Dreigliederung der Benutzerstudie um, indem für die Erstellung, Durchführung und Analyse jeweils getrennte Sichten bestehen. In diesem Abschnitt sind die Begriffe Projekt und Studie gleichbedeutend. Der Begriff Projekt wird in Zusammenhang mit der Datenbank verwendet, der Begriff (Benutzer-)Studie im Zusammenhang mit der Oberfläche.

5.2.1 Oberfläche

Bevor die Anwendung gestartet wird, wird der Datenbank-Dialog angezeigt, bei dem der Benutzer den Servername für den Datenbankserver angeben muss (siehe Abbildung 5.10).

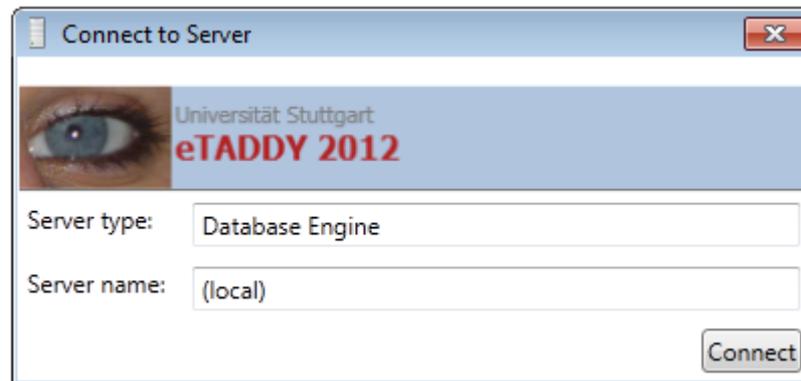


Abbildung 5.10: Vor dem Starten der Anwendung wird der Datenbankdialog angezeigt, in den der Benutzer den Servername des Datenbankservers eingeben muss.

Anschließend wird das Hauptfenster geöffnet (siehe Abbildung 5.11). Dieses besteht aus einer Treeview, welche links im Hauptfenster platziert ist (1). Hier werden das Superprojekt, alle Projekte und Szenarien angezeigt. Links unten sind die Schaltflächen für die Bedienung des Frameworks platziert (2). Der rechte Bereich (3) ist der Arbeitsbereich für den Benutzer.

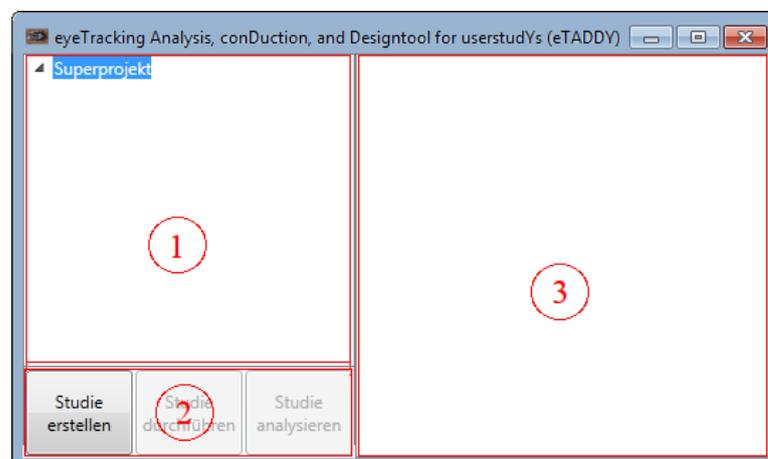


Abbildung 5.11: Das Hauptfenster der Anwendung mit der Treeview auf der linken Seite (1), den Schaltflächen links unten (2) und dem Arbeitsbereich auf der rechten Seite (3). In der Treeview wird das Superprojekt, alle Projekte und ihre dazugehörigen Szenarien angezeigt. Wenn ein Superprojekt ausgewählt ist, kann über die Schaltflächen unten links ein neues Projekt erstellt werden. Der Arbeitsbereich ist beim Auswählen eines Superprojekts leer.

Benutzerstudie erstellen

Ein Superprojekt wird bei der Erstellung der Datenbank automatisch angelegt. Gibt es kein Projekt in der Datenbank, kann der Benutzer ein neues Projekt erstellen, indem er das vorhandene Superprojekt markiert und die Schaltfläche „Studie erstellen“ auswählt (siehe Abbildung 5.12).

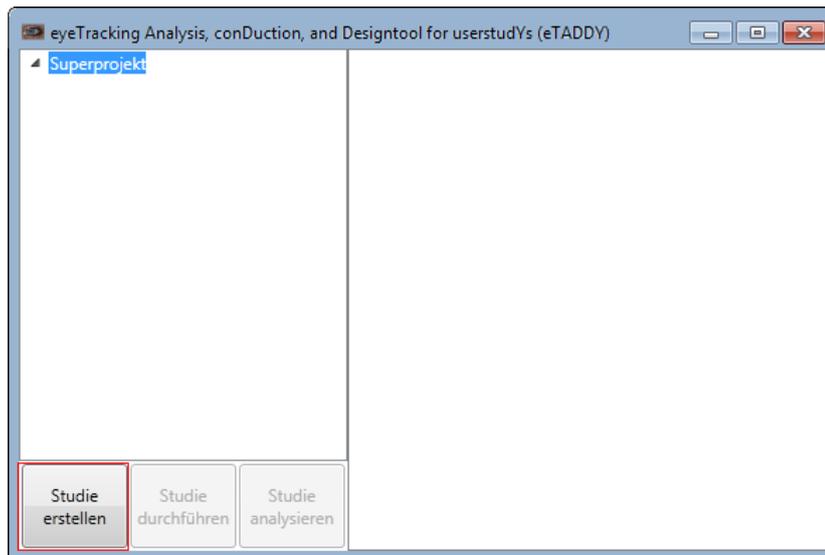


Abbildung 5.12: Um ein neues Projekt zu erstellen, muss der Benutzer die Schaltfläche „Studie erstellen“ auswählen.

Beim Erstellen eines neuen Projekts muss der Proband die Felder ausfüllen, die mit einem Stern (*) markiert sind (siehe Abbildung 5.13). Dies sind der Projektname, das Tutorial, die Einverständniserklärung und der Pfad zu den Sehtestbildern. Die Eingabe von Pfaden erfolgt über einen Browser-Dialog. Alle anderen Felder sind optional oder können zu einem späteren Zeitpunkt ausgefüllt werden. Werden vom Benutzer die Informationen zum System, zur Software, zur Bildschirmdiagonale, zur Auflösung und zur Farbtiefe angegeben, sind diese später im Studienbericht enthalten. Für die Auswertung muss es mindestens ein Szenario pro Projekt geben, es können aber beliebig viele Szenarien angelegt werden. Das Projekt kann über die Schaltflächen „Speichern“ und „Abbrechen“ rechts unten gespeichert oder verworfen werden.

Gibt es ein Projekt in der Treeview, kann dieses ausgewählt werden. Die Schaltfläche links unten ändert sich bei der Auswahl eines Projekts von „Studie erstellen“ in „Studie ändern“. Außerdem wird die Schaltfläche „Studie durchführen“ aktiviert. Durch Auswählen der Schaltfläche „Studie ändern“ kann das Projekt geändert werden (siehe Abbildung 5.14). Hier besteht die Möglichkeit das Tutorial und die Einverständniserklärung in einem integrierten Xps-Document-Viewer anzuzeigen (siehe Abbildung 5.15).

Abbildung 5.13: Beim Erstellen eines neuen Projekts muss im Arbeitsbereich (1) der Projektname, das Tutorial, die Einverständniserklärung und die Sehtestbilder angegeben werden. Das Projekt kann über die Schaltflächen links unten (2) gespeichert oder verworfen werden.

Abbildung 5.14: Wird ein Projekt in der Treeview ausgewählt, können über die Schaltfläche „Studie ändern“ Änderungen vorgenommen werden oder durch Auswahl der Schaltfläche „Studie durchführen“ einen Studiendurchlauf mit einem Probanden durchgeführt werden.

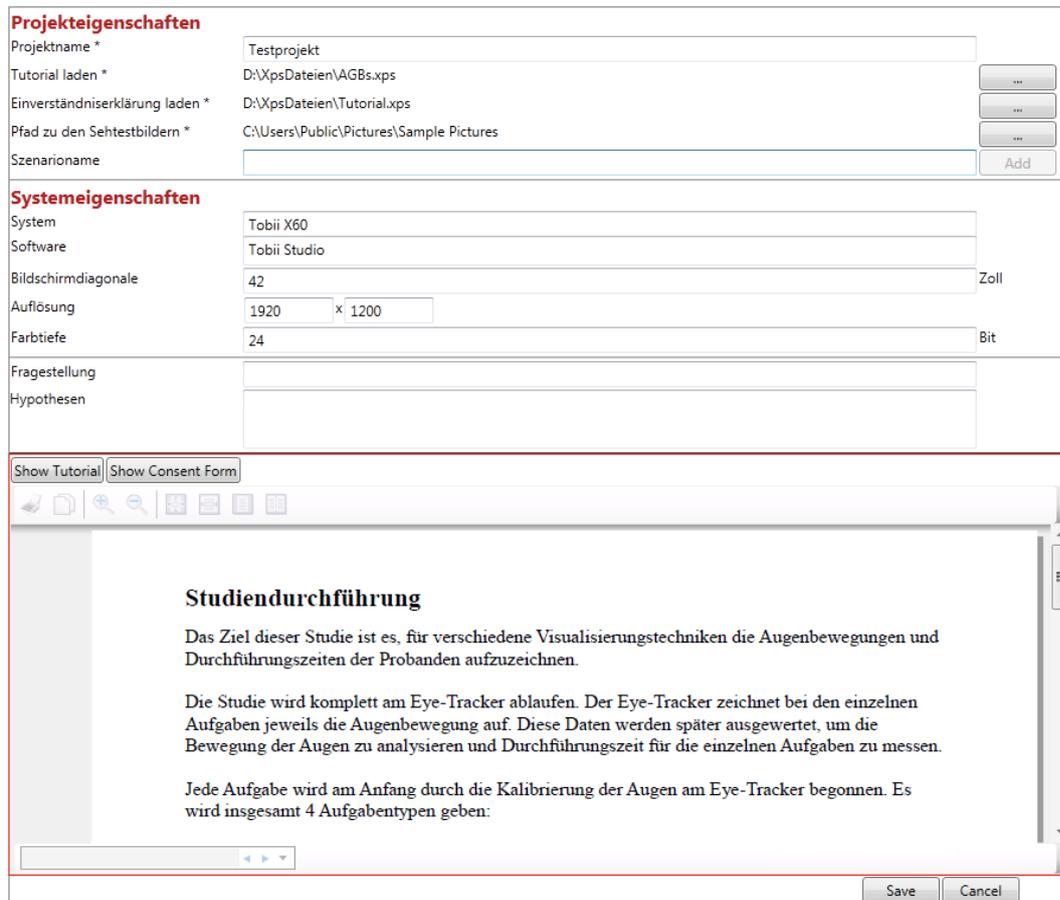


Abbildung 5.15: Beim Ändern des Projekts werden die gespeicherten Informationen angezeigt und es besteht die Möglichkeit sich das Tutorial und die Einverständniserklärung in einem Xps-Document-Viewer anzeigen zu lassen.

Benutzerstudie durchführen

Wird die Schaltfläche „Studie durchführen“ ausgewählt, wird im Hauptfenster die Ansicht für den Versuchsleiter angezeigt (siehe Abbildung 5.16). Hier muss der Versuchsleiter die Probanden-Id, welche dreistellig sein muss, eingeben. Anschließend wird er durch die Benutzerstudie geführt, indem er die eingblendeten Schaltflächen bedient und die Kontrollboxen markiert. Hierfür muss der Versuchsleiter zuerst die Schaltfläche „AGBs“ für die Einverständniserklärung auswählen. Im Probandendialog wird die Einverständniserklärung in einem Document Viewer angezeigt. Hat der Proband die Einverständniserklärung gelesen, kann der Versuchsleiter die Kontrollbox „AGBs akzeptiert“ markieren und die Schaltfläche „Fragebogen“ wird aktiv. Beim Anklicken der Schaltfläche wird im Probandendialog der Fragebogen angezeigt (siehe linker Dialog in Abbildung 5.17). Hat der Proband die Fragen beantwortet, muss der Versuchsleiter die Kontrollbox „Fragebogen ausgefüllt“ markieren und die Schaltfläche für den Sehtest wird aktiviert. Beim Sehtest werden dem Probanden

nacheinander die Bilder gezeigt, die bei der Erstellung des Projekts ausgewählt wurden. Der Versuchsleiter muss angeben, ob der Proband die richtige oder falsche Antwort gegeben hat. Wurden alle Bilder gezeigt, kann der Versuchsleiter die Kontrollbox „Sehtest durchgeführt“ markieren und die Schaltfläche „Tutorial“ wird aktiviert. Der Proband bekommt das Tutorial in einem Xps-Document-Viewer zu sehen und kann sich dieses durchlesen. Hat er das Tutorial gelesen, muss der Versuchsleiter die Kontrollbox „Tutorial gelesen“ markieren und die Schaltfläche „Nasa TLX“ wird aktiviert (siehe rechter Dialog in Abbildung 5.17). Im Anschluss an das Lesen des Tutorial führt der Proband die eigentliche Benutzertudie am Eyetracker durch. Anschließend wird dem Proband im Framework der Nasa TLX Fragebogen angezeigt und er kann diesen ausfüllen. Hat er den Fragebogen ausgefüllt, kann der Versuchsleiter die Kontrollbox „Nasa TLX ausgefüllt“ markieren. Jetzt wird die Speicherfläche „Speichern“ aktiv und die Ergebnisse der Benutzerstudie können gespeichert werden (siehe Abbildung 5.18). Nach dem Speichern wird im Hauptfenster die Information zum Projekt angezeigt.

Abbildung 5.16: Wird ein Projekt in der Treeview markiert, kann die Benutzertudie durchgeführt werden. Dafür wird im Hauptfenster die Ansicht für den Versuchsleiter angezeigt. Hier muss der Versuchsleiter die Probanden-ID eingeben. Anschließend wird er durch die Benutzerstudie geführt, indem er die eingblendeten Schaltflächen bedient und die Kontrollboxen markiert.

Abbildung 5.17: Links: Fragebogen für die allgemeinen Fragen an einen Probanden. Rechts: Fragebogen für einen NASA TLX Fragebogen. Die Fragebögen werden jeweils in einem separaten Dialog für den Probanden angezeigt.

Abbildung 5.18: Hat der Proband die Einverständniserklärung akzeptiert, den Fragebogen ausgefüllt, den Sehtest durchgeführt, das Tutorial gelesen und den Nasa TLX Fragebogen ausgefüllt, sind alle Kontrollboxen vom Moderator markiert und der Sehtest ausgefüllt. Die Schaltfläche „Speichern“ ist aktiviert und die Daten zum Proband können gespeichert werden.

Benutzerstudie analysieren

Der Arbeitsbereich beim Analysieren der Benutzerstudie gliedert sich in sieben Bereiche, welche in den nachfolgenden Abschnitten genauer vorgestellt werden (siehe Abbildung 5.19):

1. Datenimport
2. Stimulusauswahl
3. Probandenauswahl
4. Auswahl von Metriken, Statistiken und Visualisierungen
5. Ergebnisse und Historie der Auswertung
6. Fragebogenauswertung und Studienberichterstellung
7. Auswertung beenden

In Abbildung 5.19 sind die sieben Bereiche für die Analyse eingezeichnet. Links unten (1) befindet sich die Schaltfläche für den Import der Eyetracking-Daten. Ganz links (2) ist die Treeview mit den Stimuli des Szenarios platziert. Rechts von der Treeview (3) sind alle Probanden aufgelistet, für die es Eyetracking-Daten in der Datenbank gibt. In der Mitte oben (4) befinden sich die Metriken, Statistiken und Visualisierungen, welche für die Auswertung berechnet werden können. Rechts davon (6) ist die Schaltfläche für die Auswertung des Fragebogens und die Erstellung des Studienberichts. Die Historie der Auswertung (5) enthält alle Berechnungen und Visualisierungen, die der Benutzer während der Analyse bereits durchgeführt hat. Rechts unten in der Ecke (7) ist die Schaltfläche platziert, welche die Analyse beendet.

Daten importieren: Nachdem die Benutzerstudie an einem Eyetracker durchgeführt wurde, müssen die Eyetracking-Daten in die Datenbank des Frameworks importiert werden. Hierfür steht die Schaltfläche im linken unteren Bereich der Analyseumgebung zur Verfügung. Der Benutzer muss nach einem Klick auf die Schaltfläche den Ordner mit den Stimuli-Dateien und den Eyetracking-Dateien auswählen. Anschließend werden die Daten in die Datenbank geladen. Dieser Vorgang kann mehrere Minuten in Anspruch nehmen. Es müssen nicht alle Eyetracking-Daten auf einmal importiert werden. Probanden, für die Eyetracking-Daten vorliegen und die importiert werden sollen, müssen mit Hilfe des Frameworks im Bereich „Studie durchführen“ erstellt worden sein.

The screenshot shows a software interface for data analysis. It is divided into several sections:

- Section 1:** A button labeled "Importieren" at the bottom left.
- Section 2:** A list of stimulus files on the left: 01_karte.png, 02_karte.png, 03_karte.png, 04_karte.png, 05_karte.png, 06_karte.png.
- Section 3:** A list of participants from Participant 001 to 015, with checkboxes. A button "Alle Probanden markieren" is below the list.
- Section 4:** A panel for selecting metrics and statistics. It includes radio buttons for "Fertigstellungszeit", "Fixationsanzahl", "Fixationsdauer", "Pupillengroesse", "Sakkadenzahl", "Sakkadendauer", "Durchschnitt", "Maximum", "Median", "Minimum", "Standardabweichung", "Einsichproben T-Test", "Pupillengröße", "Heatmap", and "Scanpath". Buttons "Berechne Metrik" and "Berechne Statistik" are at the bottom.
- Section 5:** A heatmap visualization titled "Dreiecke - 02_karte.png" showing fixation points (F1, F2, F3) on a grid. The x-axis ranges from 0 to 1000, and the y-axis from 0 to 1000.
- Section 6:** A panel titled "Auswertung Fragebogen" at the top right.
- Section 7:** A "Cancel" button at the bottom right.

Abbildung 5.19: Die Analyse-Ansicht gliedert sich die sieben Bereiche: 1. Datenimport, 2. Stimulusauswahl, 3. Probandenauswahl, 4. Auswahl von Metriken, Statistiken und Visualisierungen, 5. Ergebnisse und Historie der Auswertung, 6. Fragebogenauswertung und Studienberichterstellung und 7. Auswertung beenden.

Stimuli: Die Treeview links in Bereich 2 enthält alle Stimuli eines Szenarios. Die Stimuli ergeben sich aus den Eyetracking-Daten, welche in die Datenbank importiert wurden. Der Benutzer erhält dadurch einen Überblick über die möglichen Stimuli und kann den gewünschten über die Treeview auswählen.

Probanden: Neben der Treeview für die Stimuli in Bereich 3 ist die Liste mit allen Probanden platziert. Es werden nur Probanden angezeigt, für die es Eyetracking-Daten in der

Datenbank gibt. Die Probanden sind mit jeweils einer Kontrollbox versehen. Dadurch können ein oder mehrere Probanden ausgewählt werden.

Metriken, Statistiken und Visualisierungen: Bereich 4 enthält eine Übersicht über die Metriken, Statistiken und Visualisierungen, welche als Plug-in in das Framework geladen wurden. Abhängig davon, wie viele Probanden in Bereich drei ausgewählt wurden, sind unterschiedliche Metriken enthalten (vgl. Abschnitt 4.1). Wurde kein Proband ausgewählt, kann eine Heatmap über alle Probanden und ihre Fixationen für einen Stimulus erstellt werden. Wird eine Metrik ausgewählt, kann diese entweder berechnet werden oder es kann zusätzlich eine statistische Methode oder eine Visualisierung ausgewählt werden. Für die Berechnung einer statistischen Methode muss zuvor eine Metrik gewählt werden. Visualisierungen können unabhängig von den Metriken berechnet werden.

Historie der Auswertung: Der große Bereich 5 in der Mitte enthält die Historie der Auswertung. In dieser werden die durchgeführten Berechnungen und Visualisierungen angezeigt. Die Historie ist nach Datum und Uhrzeit sortiert, die aktuellsten Berechnungen befinden sich an oberster Stelle. Über einen vertikalen Scrollbalken kann durch die durchgeführten Berechnungen navigiert werden. Jede durchgeführte Berechnung wird in einem separaten Kasten angezeigt. Dieser enthält den Namen der berechneten Plug-in(s), die Probanden, für welche die Berechnung durchgeführt wurde, das Datum und die Uhrzeit sowie das Ergebnis der Berechnung.

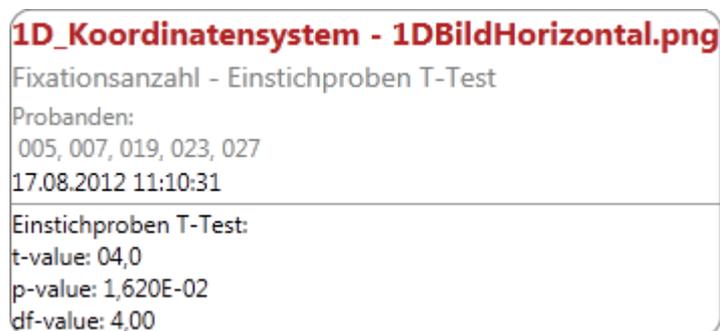


Abbildung 5.20: Durchgeführte Berechnung einer Statistik, mit allen wichtigen Informationen, wie Metrikname, Statistikname, Probanden, Datum, Uhrzeit und Ergebnis.

Fragebogenauswertung und Studienbericht: Im rechten oberen Eck in Bereich 6 befindet sich eine Schaltfläche für die Auswertung des Fragebogens. Wird dieser ausgewählt, erstellt das Framework automatisch die Auswertung des Fragebogens und zeigt diese in einem externen Dialog an (siehe Abbildung 5.21). Es werden momentan die folgende Daten im Fragebogen erhoben (fett) und für die Auswertung verschiedene statistische Berechnungen durchgeführt und Visualisierungen erstellt:

- **Alter:** Durchschnitt, Minimum, Maximum
- **Geschlecht:** Anzahl männlich, Anzahl weiblich
- **Sehhilfe:** Anzahl keine, Anzahl Brille, Anzahl Kontaktlinsen
- **Muttersprache:** Anzahl deutsch, Anzahl sonstige
- **Mathematiknote:** Durchschnitt
- **Mathematikkenntnisse:** Durchschnitt
- **PC-Arbeitszeit:** Durchschnitt
- **Spielzeit am PC:** Durchschnitt
- **Abschluss:** Balkendiagramme
- **angestrebter Abschluss:** Balkendiagramm
- **Studienfach:** Balkendiagramm
- **Nebenfach:** Balkendiagramm
- **Nasa TLX:** Balkendiagramm

Der Dialog enthält neben den Daten und Balkendiagrammen im unteren Bereich Schaltflächen, um die erstellten Balkendiagramme sowie Boxplots über die Metriken zu speichern, den Studienbericht zu erstellen und den Dialog zu beenden. Für jeden Stimulus und jede Metrik wird jeweils ein Boxplot mit allen Daten der Probanden erstellt. Die Boxplots sowie die Informationen aus der Fragebogenauswertung, die Auswertung des Sehtests, die Systeminformationen, die Auswertung des Nasa TLX Fragebogens und die Heatmap für jeden Stimulus werden in einem in LaTeX verfassten Studienbericht erstellt. Dieser muss vom Benutzer erweitert und kompiliert werden.

Umsetzung des Visual Information Seeking Mantras

Das Visual Information Seeking Mantra wurde bei der Analyse dadurch umgesetzt, dass der Benutzer in einer Treeview und Liste die Daten zu einem Szenario aufgelistet bekommt. Dadurch kann der Benutzer sich einen Überblick über die gesamte Datenmenge verschaffen (Overview). Wählt der Benutzer nur einen Stimulus aus, kann er sich eine Heatmap der Fixationsdaten erstellen lassen. Außerdem kann er eine Zusammenfassung der Fragebogendaten anzeigen lassen, um dadurch Benutzergruppen zu definieren. Im nächsten Schritt muss der Benutzer einzelne Probanden auswählen, dadurch ist das zweite Kriterium (Filter) umgesetzt. Anschließend stehen dem Benutzer verschiedene Metriken, Statistiken und Visualisierungen zur Verfügung, um Details über die Daten zu erfahren (Details-on-demand).



Abbildung 5.21: Die Auswertung des Fragebogens wird in diesem Dialog in Form von Text und Diagrammen angezeigt. Für quantitative Daten, wie das Alter, wird der Durchschnitt berechnet, für qualitative Daten, wie der Schulabschluss oder die Auswertung des Nasa TLX, werden Balkendiagramme verwendet.

5.2.2 Logik

Die Logik kann in die zwei Komponenten Plug-in-System und Implementierung von Plug-ins unterteilt werden. Diese werden im Folgenden vorgestellt und erläutert. Hierbei werden Methoden der Klassen anhand Quell- und XML-Code vorgestellt.

Plug-in-System

Das Plug-in-System wird über die Klasse *PluginSectionHandler* gesteuert. Hier wird die XML-Klasse *App.Config* gelesen und die Plug-ins geladen (siehe Quellcodebeispiel 5.1). Die Plug-ins müssen je nach Typ eine der drei Schnittstellen *IMetricPlugin*, *IStatisticPlugin* oder *IVisPlugin* implementieren. Die Config-Datei enthält als Wurzelknoten *configuration*. Darunter werden die Settings gesetzt und die Plug-ins definiert. Die Settings (*configSection*) enthält den Knotennamen *plugins* und als Typ die Datei, welche für das Parsen der XML-Datei verwendet wird sowie den Assemblyname. Der zweite Knoten *plugins* enthält als Kindknoten für jeden Plug-in-Typ einen separaten Knoten, d. h. jeweils einen Knoten für die Metrik-, Statistik- und Visualisierungs-Plug-ins. Innerhalb dieser Knoten werden die Plug-ins definiert. Jeder Knoten enthält den Pfad zur Assemblydatei des Plug-ins sowie den Pfad und den Name des Plug-ins als Typ.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<configuration>
  <configSections>
    <section name="plugins" type="Logic.PluginSectionHandler, Logic" />
  </configSections>
  <plugins>
    <statisticPlugins>
      <plugin dll="..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
        type="StandardPlugins.IStatisticPlugins.Average" />
      <plugin dll="..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
        type="StandardPlugins.IStatisticPlugins.Maximum" />
      <plugin dll="..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
        type="StandardPlugins.IStatisticPlugins.Median" />
      <plugin dll="..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
        type="StandardPlugins.IStatisticPlugins.Minimum" />
      <plugin dll="..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
        type="StandardPlugins.IStatisticPlugins.StandardDeviation" />
      <plugin dll="..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
        type="StandardPlugins.IStatisticPlugins.TtestOneSample" />
    </statisticPlugins>
    <metricPlugins>
      <plugin dll="..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
        type="StandardPlugins.IMetricPlugins.CompletionTime" />
      <plugin dll="..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
        type="StandardPlugins.IMetricPlugins.Fixation" />
      <plugin dll="..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
        type="StandardPlugins.IMetricPlugins.FixationDuration" />
      <plugin dll="..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
        type="StandardPlugins.IMetricPlugins.PupilSize" />
    </metricPlugins>
  </plugins>
</configuration>
```

```
<plugin dll="..\..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
  type="StandardPlugins.IMetricPlugins.Saccade" />
<plugin dll="..\..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
  type="StandardPlugins.IMetricPlugins.SaccadeDuration" />
</metricPlugins>
<visPlugins>
  <plugin dll="..\..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
    type="StandardPlugins.IVisPlugins.PupilChange" />
  <plugin dll="..\..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
    type="StandardPlugins.IVisPlugins.Heatmap" />
  <plugin dll="..\..\..\StandardPlugins\bin\Debug\StandardPlugins.dll"
    type="StandardPlugins.IVisPlugins.Scanpath" />
</visPlugins>
</plugins>
</configuration>
```

Listing 5.1: Config-Datei im XML-Format für die Plug-ins. Jedes Plug-in wird als Kindknoten entsprechend seines Typs entweder dem XML-Knoten `statisticPlugin`, `metricPlugin` oder `visPlugin` hinzugefügt.

Metriken: Für Plug-ins des Typs Metrik muss die Schnittstelle *IMetricPlugin* mit der Methode *Calculate* und den Eigenschaften *Name* und *Participants* implementiert werden. Der Methode muss der Stimulus für den die Berechnung durchgeführt werden soll und eine Liste mit den Probanden übergeben werden. Als Rückgabewert wird ein Dictionary zurückgegeben, welcher als Key entweder den Probandenname oder den Fixationsindex enthält und als Value den berechneten Wert der Metrik.

```
Dictionary<Object, Object> Calculate(Stimulus stimulus, List<Participant>
  participants);
```

Statistiken: Bei statistischen Auswertungen muss die Schnittstelle *IStatisticPlugin* mit der Methode *Calculate* und den Eigenschaften *Name* und *Participants* implementiert werden. Die Methode bekommt als Übergabeparameter ein Dictionary mit den Werten aus der Metrik und die Liste mit den Probanden übergeben. Als Rückgabewert wird ein Dictionary zurückgegeben, welcher als Key keinen Probanden oder einen Probanden enthält und als Value die Resultate der Berechnung.

```
Dictionary<Object, Object> Calculate(Dictionary<Object, Object> values,
  List<Participant> participant);
```

RDotNet: Bei den Statistik-Plug-ins wird auf die Statistiksprache R zurückgegriffen. Über das Open Source Projekt RDotNet können Berechnungen mit R durchgeführt und in C# verwendet werden [54]. Hierfür muss eine Instanz der REngine erstellt werden, welche den Zugriff auf R erlaubt (siehe Quellcodebeispiel 5.2).

```

using System;
using System.Linq;
using RDotNet;

class Program
{
    static void Main(string[] args)
    {
        // Set the folder in which R.dll locates.
        REngine.SetDllDirectory(@"C:\Program Files\R\R-2.12.0\bin\i386");
        using (REngine engine = REngine.CreateInstance("RDotNet", new[] { "-q" })) // quiet mode
        {
            // .NET Framework array to R vector.
            NumericVector group1 = engine.CreateNumericVector(new double[] { 30.02, 29.99,
                30.11, 29.97, 30.01, 29.99 });
            engine.SetSymbol("group1", group1);
            // Direct parsing from R script.
            NumericVector group2 = engine.EagerEvaluate("group2 <- c(29.89, 29.93, 29.72, 29.98,
                30.02, 29.98)").AsNumeric();

            // Test difference of mean and get the P-value.
            GenericVector testResult = engine.EagerEvaluate("t.test(group1, group2)").AsList();
            double p = testResult["p.value"].AsNumeric().First();

            Console.WriteLine("Group1: [{0}]", string.Join(", ", group1));
            Console.WriteLine("Group2: [{0}]", string.Join(", ", group2));
            Console.WriteLine("P-value = {0:0.000}", p);
        }
    }
}

```

Listing 5.2: Beispiel, wie R über das RDotNet-Projekt auf die Berechnungen in R zugegriffen werden kann. Zuerst muss eine Instanz der REngine erstellt werden.

Visualisierungen: Die Visualisierungen müssen die Schnittstelle *IVisPlugin* mit der Methode *Calculate* und den Eigenschaften *Name* und *Participants* implementieren. Die Methode bekommt den Stimulus und eine Liste mit Probanden übergeben. Als Rückgabewert wird ein Content Control erstellt, welches in der Oberfläche angezeigt werden kann.

```
ContentControl Calculate(Stimulus stimulus, List<Participant> participants);
```

Implementierung der Plug-ins

Abbildung 5.22 zeigt die drei Typen von Plug-ins - Metriken, Statistiken, Visualisierungen - sowie die im Framework implementierten Plug-ins. Die einzelnen Plug-ins werden im Folgenden beschrieben.

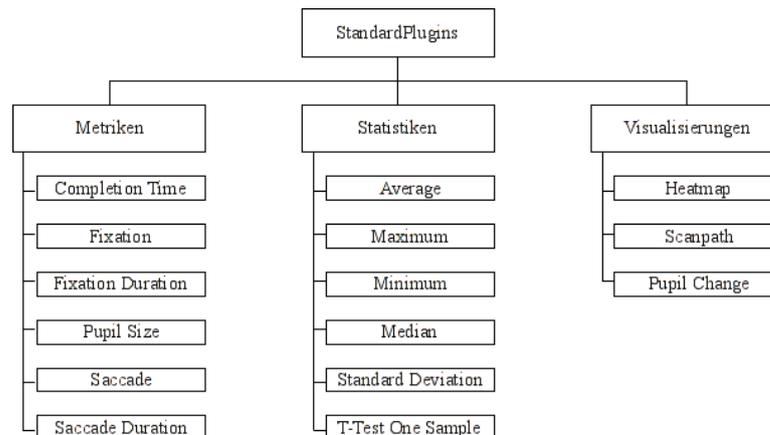


Abbildung 5.22: Die Plug-ins können in die drei Typen Metrik, Statistik und Visualisierung unterteilt werden. Dargestellt sind unter jedem Typ die Plug-ins, die im Framework umgesetzt wurden.

Metriken: Tabelle 5.1 listet alle implementierten Metriken und deren Berechnung auf.

Name	Beschreibung
Completion Time	Berechnet die Dauer, die ein Proband benötigt hat, um eine Aufgabe für einen Stimulus zu lösen. Hierfür wird die Start- und Endzeit für diesen Probanden und diesen Stimulus aus der Datenbank ausgelesen und voneinander subtrahiert.
Fixation	Berechnet die Anzahl der Fixationen, die ein Proband für einen Stimulus benötigt hat. Hierfür werden die Fixationen für einen Probanden und einen Stimulus in der Datenbank gezählt.
Fixation Duration	Berechnet, wie lange jede Fixation in einem Stimulus für einen Probanden gedauert hat. Dieser Wert kann aus der Datenbank ausgelesen werden.
Pupil Size	Berechnet die Größe der Pupille eines Probanden bei einem Stimulus für jede Fixation. Hierfür wird der Durchschnitt aller Pupillengrößen aus der Datenbank für eine Fixation berechnet.
Saccade	Berechnet die Anzahl an Sakkaden, die ein Proband für einen Stimulus benötigt hat. Hierfür werden die Fixationen für einen Probanden und einen Stimulus in der Datenbank gezählt und anschließend eins abgezogen, da nach jeder Fixation eine Sakkade stattfindet, aber mit einer Fixation geendet wird.
Saccade Duration	Berechnet, wie lange jede Sakkade in einem Stimulus für einen Probanden gedauert hat. Dieser Wert berechnet sich aus dem Endzeitpunkt der einen Fixation und dem Startzeitpunkt der nächsten Fixation.

Tabelle 5.1: Beschreibung der im Framework umgesetzten Metriken.

Statistiken: Es können die in Abbildung 5.22 unter Statistiken aufgelisteten Berechnungen durchgeführt werden. Für die Berechnung einer Statistik wird ein Vektor mit den Daten für die Berechnung mit R benötigt. Handelt es sich um eine Metrik, welche mehr als ein Datum erzeugt (z. B. *Pupil Size*), wird ein Proband übergeben. Für Metriken, welche ein Datum erzeugen (z. B. *Fixation*), müssen mehrere Probanden übergeben werden.

Visualisierungen: Bei den Visualisierungen können Heatmaps, Scanpaths und Pupillengrößendiagramme erstellt werden. Eine Heatmap verwendet für einen Stimulus alle Probandendaten (siehe Abbildung 5.23). Die Berechnung der Heatmap wird von einem externen Algorithmus berechnet, indem berechnet wird an welchen Stellen im Stimulus Fixationen stattgefunden haben. Hierfür werden alle Probandendaten verwendet. Entsprechend der Häufigkeit der Fixationen werden die Flächen dunkler eingefärbt. Scanpaths werden für jeden Probanden einzeln erstellt (siehe Abbildung 5.23). Die Fixationen des Probanden werden je nach Dauer durch einen entsprechend größeren oder kleineren Kreis dargestellt. Die Fixationen werden über Verbindungslinien miteinander verbunden, wenn sie zeitlich nacheinander stattfanden. Mit dem Pupillengrößendiagramm kann, über die zur Verfügung gestellte Charts-Klasse [50], ein Liniendiagramm erstellt werden, welches die Pupillengröße eines Probanden für einen Stimulus abbildet (siehe Abbildung 5.24)

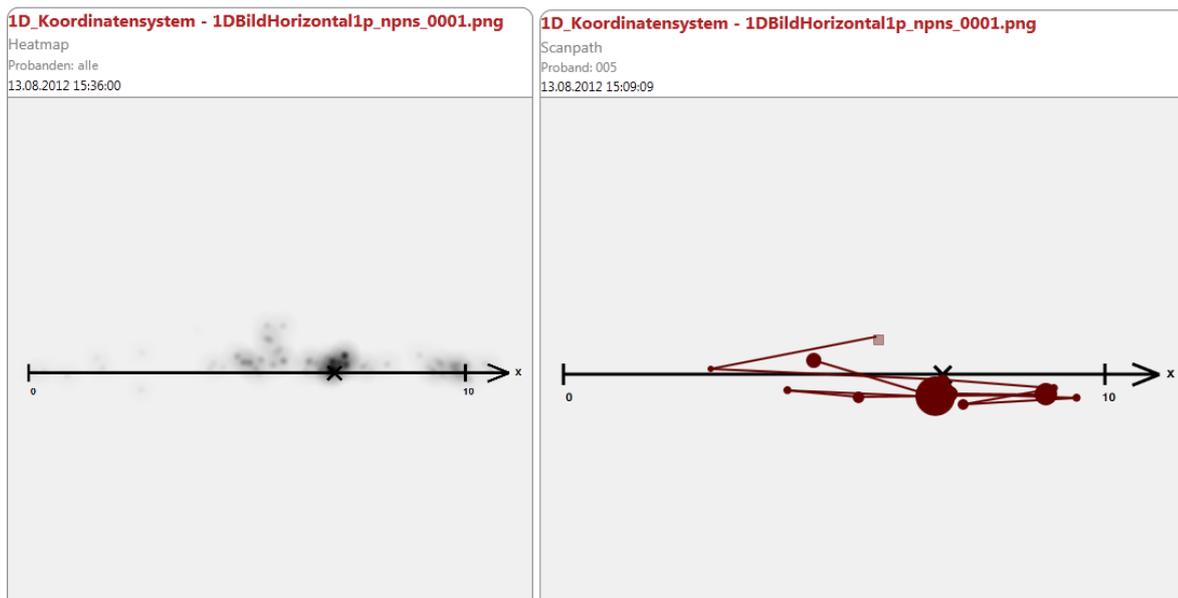


Abbildung 5.23: Knoten der Historie für eine im Framework erstellte Heatmap (links) und einen Scanpath (rechts).

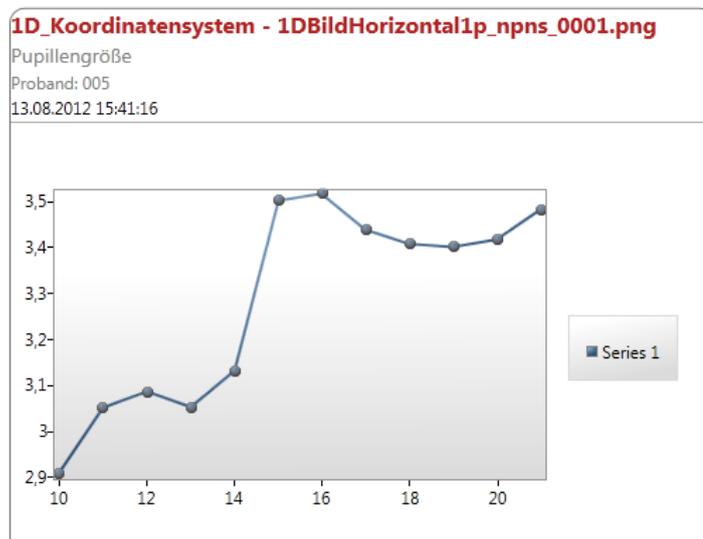


Abbildung 5.24: Knoten der Historie für ein im Framework erstelltes Pupillendiagramm.

6 Demonstration des Prototyps

In diesem Kapitel wird eine Benutzerstudie ausgewertet, mit Hilfe des in dieser Diplomarbeit entwickelten Analysekonzepts. Die Benutzerstudie wurde am Institut für Visualisierung und interaktive Systeme (Vis) im Juli und August 2012 durchgeführt. Das Kapitel basiert auf dem Aufbau, welcher in Abschnitt 2.2.10 vorgestellt wurde. Zuerst wird eine Einführung in die Theorie und die Fragestellungen der Benutzerstudie gegeben. Anschließend wird die verwendete Methodik inklusive der Versuchspersonen, Apparate und Materialien, Durchführung und des Versuchsplans beschrieben. Der Hauptbestandteil dieses Kapitels ist das Vorstellen der Ergebnisse, für welche das entwickelte Framework verwendet wird. Anschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst.

6.1 Einleitung und Theorie

In dieser am Vis durchgeführten Visual Elements 2 Studie soll untersucht werden, wie Menschen Werte in ein- und zweidimensionalen Koordinatensystemen lesen. Untersucht werden soll, ob es verschiedene Strategien bei der Vorgehensweise, bei unterschiedlichen Aufgaben gibt. Das Ziel dieser Benutzerstudie ist es, auf Basis dieser Ergebnisse ein Modell zu entwickeln, wie Benutzer Informationen aus einfachen Balkendiagrammen auslesen. Diese Diplomarbeit untersucht zwei Hypothesen der Studie mit Hilfe des Frameworks, um zu zeigen, wie das Analysekonzept verwendet werden kann. Die zu untersuchenden Hypothesen lauten:

- H1: Es wird untersucht, ob das Lesen eines Punktes in einem eindimensionalen Koordinatensystem ohne Skalenstriche bei einem horizontal gezeichneten Koordinatensystem schneller ist als bei einem vertikal gezeichneten. Außerdem wird untersucht, ob unterschiedliche Vorgehensstrategien bei horizontalen und vertikalen Koordinatensystemen angewendet werden.
- H2: Es wird untersucht, ob das Lesen des größten y-Wertes in einem zweidimensionalen Koordinatensystem mit Hilfsgitter schneller ist als ohne Hilfsgitter und ohne Skalenstriche. Außerdem wird untersucht, ob unterschiedliche Vorgehensstrategien bei Koordinatensystemen ohne und mit Hilfsgittern angewendet werden.

6.2 Methode

Im folgenden Abschnitt wird die durchgeführte Benutzerstudie beschrieben. Es wird auf die Versuchspersonen, die verwendeten Apparate und Materialien, den Versuchsplan sowie die Durchführung eingegangen. Bei der Durchführung wird der Ablauf und die Aufgaben der Benutzerstudie erläutert.

6.2.1 Versuchspersonen

Untersucht wird eine Untermenge aller Probanden der Benutzerstudie. Es wurden vier Informatiker und ein Softwaretechniker mit einem durchschnittlichen Alter von 23,8 Jahren (Maximum: 25 Jahre, Minimum: 23 Jahre), welche normale oder korrigierte Sehkraft haben, untersucht. Alle Probanden sind männlich und gaben als Muttersprache deutsch an. Sie schätzen ihre Mathematikkenntnisse im Durchschnitt auf die Note 1,8, haben alle Abitur und befinden sich in einem Diplomstudiengang.

Die Probanden wurden über Mund-zu-Mund-Propaganda, einen im Informatikgebäude ausgehängten Flyer oder eine Email über verschiedene Emailverteiler auf die Studie aufmerksam. Alle erhielten nach Beendigung der Studie zehn Euro.

6.2.2 Apparate und Materialien

Für die Benutzerstudie wird der Eyetracker T60XL der Firma Tobii verwendet. Der Eyetracker hat eine Auflösung von 1920 x 1200 Pixel und eine Bildschirmdiagonale von 24 Zoll. Die Abtastfrequenz des Gerätes beträgt 60 HZ und die Bildfrequenz 640x480 bei 30 Frames pro Sekunde. Für die Erstellung des Projekts und der Aufgabenblöcke wurde die Software Tobii Studio 3.1 der Firma Tobii verwendet. Für die Aufnahme stellt der Eyetracker ein Dark- und Brightpupil-Tracking zur Verfügung (siehe Abschnitt 2.4.5). Für die Auswertung und Erstellung der Benutzerstudie wird die prototypische Implementierung dieser Diplomarbeit verwendet. Das Framework beinhaltet den allgemeinen Fragebogen (siehe Abbildung 5.17), welchen die Probanden am Anfang der Benutzerstudie ausfüllen, sowie den Ishihara Sehtest, welchen die Probanden durchführen. Für den Sehtest wurde ein Snellentest verwendet, welcher im Studienraum auf Papier ausgedruckt aufgehängt war. Die Probanden mussten die Stimuli über eine Standardtastatur wechseln und standen nicht unter Zeitdruck.

6.2.3 Versuchsplan

Es wurde eine within-subject Studie durchgeführt, d. h. alle Probanden haben die gleichen Aufgaben durchgeführt und die gleichen Stimuli in der gleichen Reihenfolge bearbeitet. Mögliche Störvariablen der Versuchspersonen wurden durch die Erhebung von Daten über einen Fragebogen ausgeschaltet. Im Fragebogen mussten die Probanden zu folgenden Fragen Angaben geben:

- Alter
- Geschlecht
- Sehhilfe
- Muttersprache
- Mathematiknote
- Mathematikkenntnisse
- durchschnittliche Arbeitszeit am PC pro Woche
- durchschnittliche Zeit pro Woche, die am PC mit spielen verbracht wird
- Abschluss
- angestrebter Abschluss
- Hauptfach
- Nebenfach
- Visualisierungskennntnisse

Störvariablen der Versuchsumgebung wurden dadurch kontrolliert, dass die Studie am Institut für Visualisierung und interaktive Systeme im selben Raum unter den gleichen Bedingungen mit den gleichen Apparaturen durchgeführt wurde.

Für Hypothese 1 (H1) wird die unabhängige Variable Art des Koordinatensystems mit der Merkmalsausprägung horizontal und vertikal definiert. Als abhängige Variable wird die Schnelligkeit der Probanden definiert (Fertigstellungszeit und Fixationsanzahl). Die Störvariablen bei dieser Hypothesen sind die Dimension des Koordinatensystems, die Skalierung des Koordinatensystems und die Position des zu lesenden Punktes. Diese werden konstant gehalten, d. h. es werden nur eindimensionale Koordinatensysteme ohne Skalenstriche untersucht mit einem zu lesenden Punkt an Position sechs.

Für Hypothese 2 (H2) wird die unabhängige Variable Hilfsgitter mit der Merkmalsausprägung mit und ohne Hilfsgitter definiert. Als abhängige Variable wird die Schnelligkeit der Probanden definiert (Fertigstellungszeit und Fixationsanzahl). Die Störvariablen bei dieser Hypothese sind die Dimension des Koordinatensystems, die Position des zu lesenden Punktes und die Positionen der anderen neun Punkte. Die Störvariable Dimension wird konstant gehalten, indem nur zweidimensionale Koordinatensysteme betrachtet werden. Der zu lesende Punkt hat immer den Wert 10. Die anderen neun Punkte im Koordinatensystem werden beliebig im Koordinatensystem verteilt (Randomisierung).

6.2.4 Durchführung

Im Folgenden wird erklärt, wie die Benutzerstudie abgelaufen ist. Dafür werden die vier Aufgabenblöcke mit den einzelnen Aufgabentypen vorgestellt, welche die Probanden lösen mussten.

Ablauf

Nach der Begrüßung der Probanden und dem Hinweis ihr Handy auszuschalten, erhielten sie die Einverständniserklärung für die Benutzerstudie. In dieser wurden die Probanden darauf hingewiesen, wie die Benutzerstudie abläuft, dass sie die Benutzerstudie jederzeit abbrechen, den Raum verlassen oder eine Pause machen können. Außerdem wurde darauf hingewiesen, dass alle gesammelten Daten anonym behandelt werden. Anschließend wurde ein Seh- und Ishihara-Farbtest (siehe Abbildung 6.1) durchgeführt, um festzustellen, ob die Probanden eine Sehschwäche oder Farbfehlsichtigkeit haben. Solche Probanden werden bei der Analyse ausgeschlossen. Um mögliche Störvariablen auszuschalten, mussten die Probanden als nächstes einen allgemeinen Fragebogen zu Alter, Geschlecht, Muttersprache, Mathematikkenntnissen, Visualisierungskenntnissen, etc. ausfüllen (siehe Abbildung 5.17).

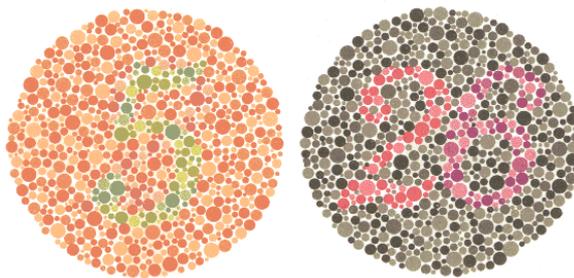


Abbildung 6.1: Ishihara Farbtesttafeln wurden verwendet, um zu Testen, ob die Probanden eine Rot-Grün-Farbsehschwäche, Farbschwäche, Protanopie oder Deuteranopie haben (siehe Abschnitt 2.3.2) [32].

Nach diesen Vorarbeiten begann die eigentliche Benutzerstudie mit dem Lesen des Tutorials für die erste Aufgabe. Anschließend wurde die Kalibration des Eyetrackert mit dem Proband und anschließend die erste Aufgabe durchgeführt. Jeder Aufgabenblock war in Fünferblöcke unterteilt, in denen dem Probanden jeweils fünf Stimuli der gleichen Sorte gezeigt wurden. Dieses Vorgehen - Tutorial lesen, Kalibrieren und Aufgabe durchführen - wurde für alle vier Aufgaben wiederholt. Am Ende erhielt der Proband zehn Euro, musste dies quittieren und war damit mit der Benutzerstudie fertig.

Aufgaben

Die Benutzerstudie besteht aus insgesamt vier Aufgaben, welche alle mit dem Ablesen von Werten zusammenhängen. Die einzelnen Aufgaben werden im Folgenden erklärt.

Ablesen von Zahlen in einem eindimensionalen Koordinatensystem: Im ersten Aufgabenblock wurde das Ablesen von Zahlen in einem eindimensionalen Koordinatensystem studiert. In diesem Aufgabenblock gab es insgesamt 80 Stimuli und es wurden zwei Aufgabentypen in zwei Durchläufen untersucht:

- Ablesen eines Punktes in einem eindimensionalen Koordinatensystem.
- Fünf Punkte werden in einem eindimensionalen Koordinatensystem mit einem Kreuz markiert. Der Wert eines vom Versuchsleiter vorgegebenen Punktes soll angegeben werden.

Im ersten Durchlauf hatten die Koordinatensysteme keine, im zweiten Durchlauf hatten sie Skalenstriche. Jeder Durchlauf bestand aus Fünferblöcken. Jeweils fünf Stimuli für Aufgabentyp eins mit horizontalen Koordinatensystemen sowie fünf Stimuli für Aufgabentyp eins mit vertikalen Koordinatensystemen. Anschließend fünf Stimuli für Aufgabentyp zwei mit horizontalen Koordinatensystemen sowie fünf Stimuli für Aufgabentyp zwei mit vertikalen Koordinatensystemen. Diese Abfolge wurde für jeden Durchlauf jeweils zwei Mal durchgeführt, so dass insgesamt zehn Stimuli pro Kombination untersucht wurden (siehe Abbildung 6.2).

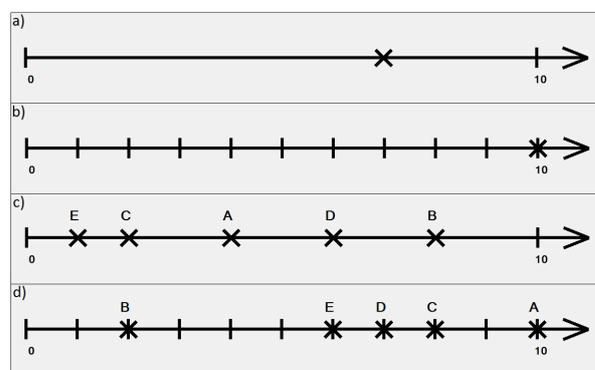


Abbildung 6.2: Ablesen eines Punktes a) ohne Skalenstriche; b) mit Skalenstrichen; Ablesen eines Punktes, welcher vom Versuchsleiter vorgegeben ist c) ohne Skalenstriche; d) mit Skalenstrichen. Alle Aufgabentypen wurden auch in einem vertikalen Koordinatensystem verwendet.

Ablesen von Zahlen in zweidimensionalen Koordinatensystemen: Im zweiten Aufgabenblock wurde das Ablesen von Zahlen in einem zweidimensionalen Koordinatensystem

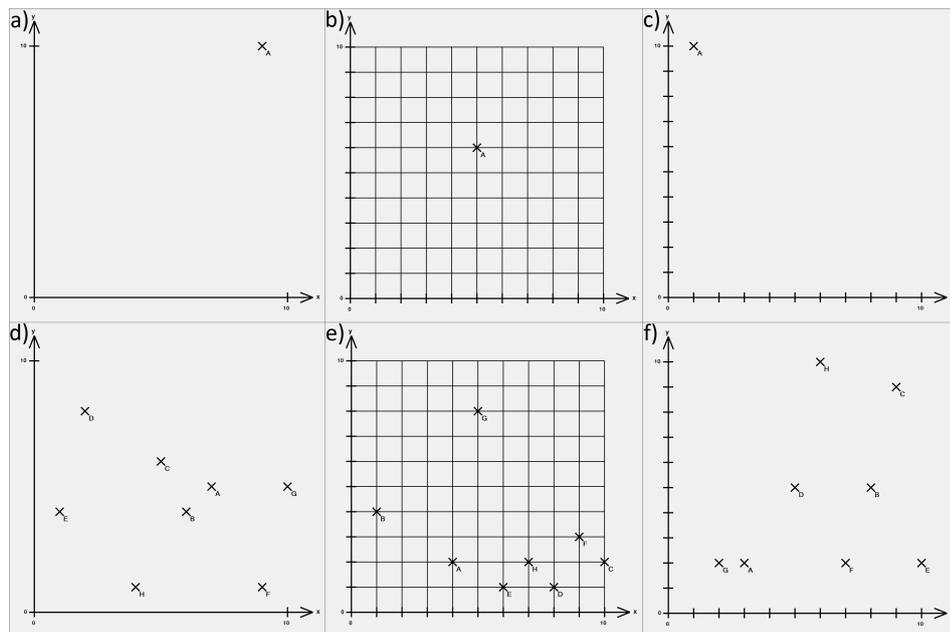


Abbildung 6.3: Ablesen eines Punktes im zweidimensionalen Koordinatensystem a) ohne Skalenstriche; b) mit Hilfsgitter; c) mit Skalenstrichen; Ablesen von acht Punkten im zweidimensionalen Koordinatensystem d) ohne Skalenstriche; e) mit Hilfsgitter; f) mit Skalenstrichen;

studiert. Den Probanden wurden insgesamt 110 Stimuli für diesen Aufgabenblock gezeigt und es wurden drei Aufgabentypen in zwei Durchläufen untersucht:

- Ablesen von Punkten im zweidimensionalen Koordinatensystem ohne Skalenstriche.
- Ablesen von Punkten im zweidimensionalen Koordinatensystem mit Skalenstrichen.
- Ablesen von Punkten im zweidimensionalen Koordinatensystem mit Hilfsgitter.

Der erste Durchlauf bestand aus Fünferblöcken für jeden Aufgabentyp mit jeweils einem Punkt, zwei, vier und acht Punkten sowie einem Punkt und acht Punkten für Aufgabentyp eins. Der zweite Durchlauf verlief gleich, wie Durchlauf eins, mit dem Unterschied, dass Aufgabentyp zwei untersucht wurde. Beim dritten Durchlauf wurde Aufgabentyp drei untersucht; je zweimal mit einem Punkt und mit acht Punkten (siehe Abbildung 6.3).

Ablezen des größten Wertes in einem zweidimensionalen Koordinatensystem: Im dritten Aufgabenblock wurde das Ablezen der Zahl mit dem größten Y-Wert in einem zweidimensionalen Koordinatensystem studiert. Den Probanden wurden insgesamt 90 Stimuli für diesen Aufgabenblock gezeigt und es wurden drei Aufgaben untersucht (siehe Abbildung 6.4):

- Ablezen des Punktes mit dem größten Y-Wert bei einer Auswahl von Punkten im zweidimensionalen Koordinatensystem ohne Skalenstriche.

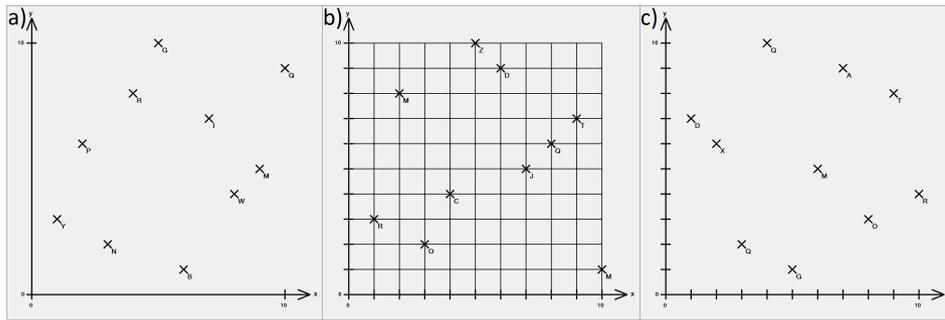


Abbildung 6.4: Ablesen des Punktes mit dem größten Y-Wert bei einer Auswahl von 10 Punkten im zweidimensionalen Koordinatensystem a) ohne Skalenstriche; b) mit Hilfsgitter; c) mit Skalenstrichen;

- Ablesen des Punktes mit dem größten Y-Wert bei einer Auswahl von Punkten im zweidimensionalen Koordinatensystem mit Skalenstrichen.
- Ablesen des Punktes mit dem größten Y-Wert bei einer Auswahl von Punkten im zweidimensionalen Koordinatensystem mit Hilfsgitter.

Im jedem Durchlauf wurden in Fünferblöcken jeweils zwei, fünf und zehn Punkte angezeigt und jede Kombination jeweils zwei Mal für alle drei Aufgabentypen durchgeführt (siehe Abbildung 6.4).

Ablesen von Werten in Balkendiagrammen: Im letzten Aufgabenblock wurde das Ablesen von Werten für Kategorien in einem Balkendiagramm studiert (siehe Abbildung 6.5). Den Probanden wurden dafür acht Stimuli gezeigt und verschiedene Kategorien vom Versuchsleiter genannt, für welche die Probanden den entsprechenden Wert nennen mussten.

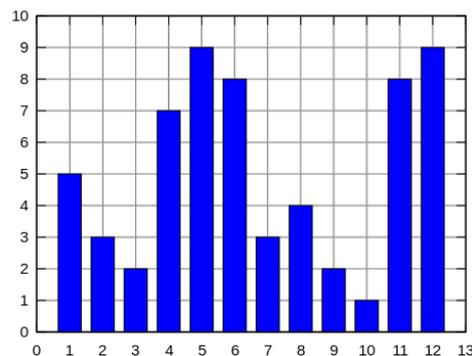


Abbildung 6.5: Welchen Wert hat die Kategorie 8? - 4. Im letzten Aufgabenblock der Benutzerstudie musste der Proband den Wert, einer vom Versuchsleiter vorgegebenen Kategorie, nennen.

6.3 Ergebnisse

Anhand der beiden in Abschnitt 6.1 definierten Hypothesen werden die in Abschnitt 6.2.4 gestellten Aufgaben untersucht. Es werden die aufgenommenen Eyetracking-Daten mit Hilfe des Frameworks entsprechend der Hypothese ausgewertet.

6.3.1 Hypothese 1

Für die Untersuchung von Hypothese 1 werden die Fertigstellungszeiten und Fixationsanzahlen der Probanden für den Punkt mit Wert sechs erhoben. Die Fertigstellungszeiten sind in Tabelle 6.1 und die Fixationsanzahl in Tabelle 6.2 aufgelistet.

Proband	Fertigstellungszeit horizontal	Fertigstellungszeit vertikal
Proband 1	3,78 ms	3,097 ms
Proband 2	2,313 ms	4,130 ms
Proband 3	1,050 ms	1,247 ms
Proband 4	1,000 ms	3,267 ms
Proband 5	3,250 ms	6,114 ms

Tabelle 6.1: Fertigstellungszeiten der fünf untersuchten Probanden für Hypothese 1. Es werden jeweils die Fertigstellungszeiten für die horizontalen und die vertikalen Koordinatensysteme aufgelistet.

Proband	Fixationsanzahl horizontal	Fixationsanzahl vertikal
Proband 1	17	12
Proband 2	9	15
Proband 3	6	5
Proband 4	5	7
Proband 5	13	26

Tabelle 6.2: Fixationsanzahl der fünf untersuchten Probanden für Hypothese 1. Es werden jeweils die Fixationsanzahl für die horizontalen und die vertikalen Koordinatensysteme aufgelistet.

Die Boxplots in Abbildung 6.6 für die Fertigstellungszeiten und Abbildung 6.7 für die Fixationsanzahl des horizontalen und des vertikalen Koordinatensystems zeigen keine Ausreißer an.

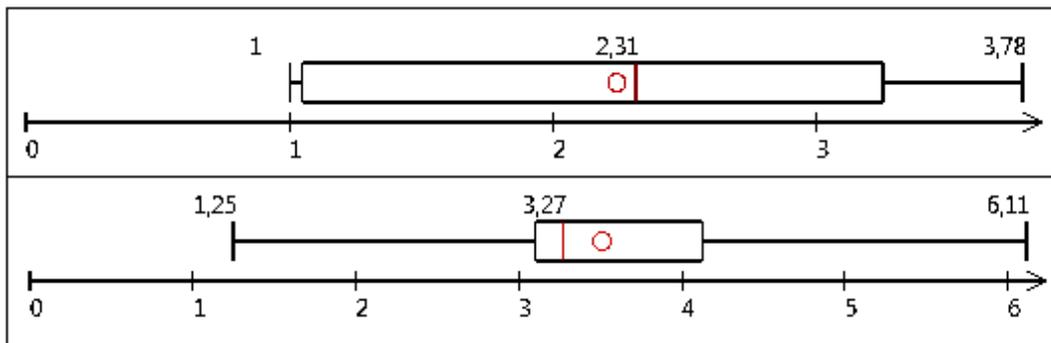


Abbildung 6.6: Boxplot für die Fertigstellungszeiten der fünf erfassten Probanden für das horizontale (oben) und vertikale (unten) Koordinatensystem.

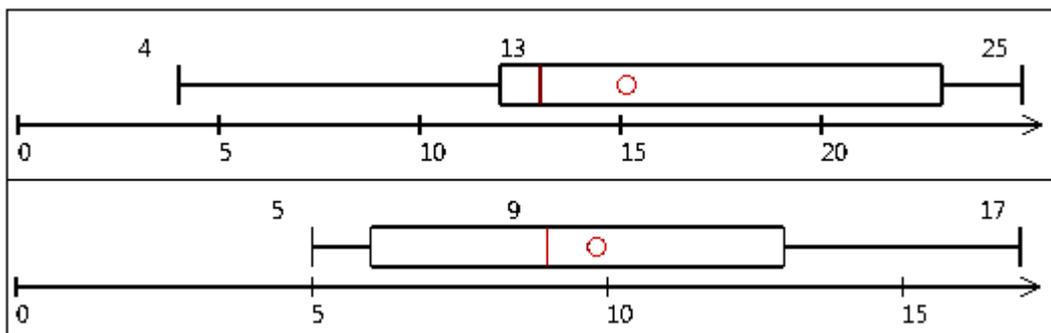


Abbildung 6.7: Boxplot für die Fixationsanzahl der fünf erfassten Probanden für das horizontale (oben) und vertikale (unten) Koordinatensystem.

Um zu testen, ob die Alternativhypothese gilt, wird ein Zweistichproben T-Test durchgeführt. Die Alternativhypothese lautet, dass der Mittelwert der Stichprobe für die horizontalen Koordinatensysteme ungleich des Mittelwerts der Stichprobe für die vertikalen Koordinatensysteme ist ($\mu_h \neq \mu_v$). Dieser liefert für die Fertigstellungszeit eine t-Verteilung von $-1,3316$ und einen p-Wert von $0,2235$. Für die Fixationsanzahl ergibt sich eine t-Verteilung von $-0,6937$ und ein p-Wert von $0,5116$. Da der p-Wert in beiden Fällen größer des alpha Signifikanzniveaus von $0,05$ ist, kann die Alternativhypothese nicht bestätigt werden. Es kann also nicht darauf geschlossen werden, dass ein Wert in einem horizontalen Koordinatensystem schneller gelesen werden kann, als in einem vertikalen.

Die beiden Heatmaps und die beiden Scanpaths in Abbildung 6.8, Abbildung 6.9, Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11 zeigen eine ähnliche Form der Fixationen. Es können keine Benutzergruppen daraus abgeleitet werden.

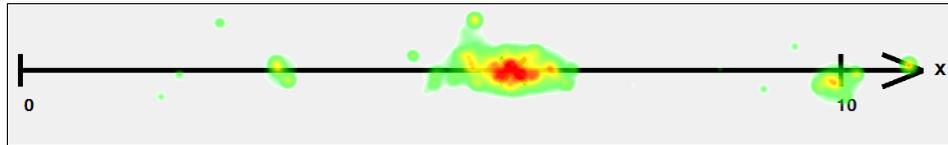


Abbildung 6.8: Heatmap der Fixationen der Probanden für das horizontale Koordinatensystem

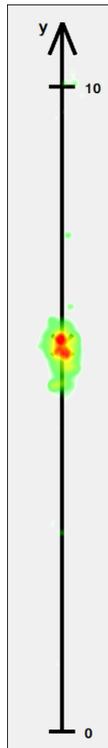


Abbildung 6.9: Heatmap der Fixationen der Probanden für das vertikale Koordinatensystem

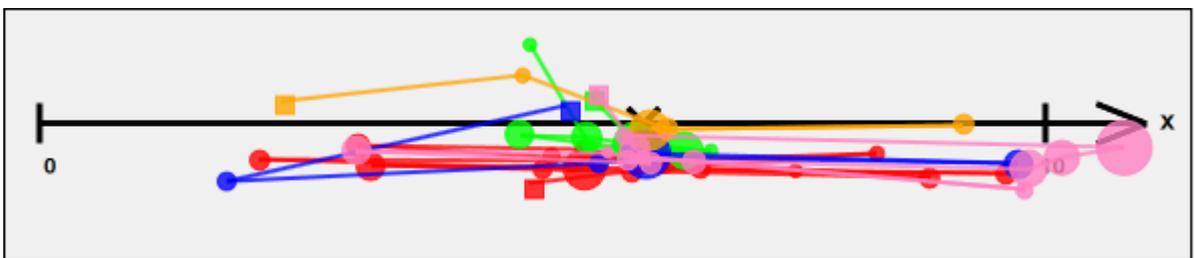


Abbildung 6.10: Scanpath der Fixationen der Probanden für das horizontale Koordinatensystem

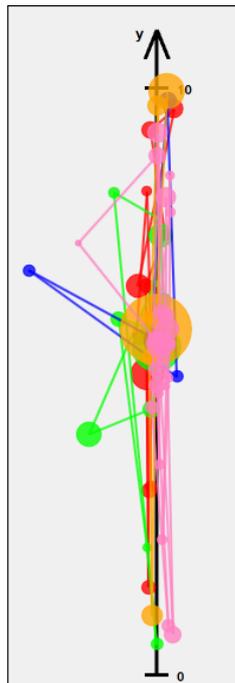


Abbildung 6.11: Scanpath der Fixationen der Probanden für das vertikale Koordinatensystem

6.3.2 Hypothese 2

Für die Untersuchung von Hypothese 2 werden die Fertigstellungszeiten und Fixationsanzahlen der Probanden für einen Punkt mit Wert zehn erhoben. Die Fertigstellungszeiten sind in Tabelle 6.3 und die Fixationsanzahl in Tabelle 6.4 aufgelistet.

Proband	Fertigstellungszeit ohne Hilfsgitter	Fertigstellungszeit mit Hilfsgitter
Proband 1	2,050 ms	1,217 ms
Proband 2	1,700 ms	1,334 ms
Proband 3	1,017 ms	0,500 ms
Proband 4	0,834 ms	0,517 ms
Proband 5	2,083 ms	0,766 ms

Tabelle 6.3: Fertigstellungszeiten der fünf untersuchten Probanden für Hypothese 2. Es werden jeweils die Fertigstellungszeiten für die Koordinatensysteme ohne und mit Hilfsgitter aufgelistet.

Proband	Fixationsanzahl ohne Hilfsgitter	Fixationsanzahl mit Hilfsgitter
Proband 1	13	7
Proband 2	8	7
Proband 3	6	3
Proband 4	2	2
Proband 5	10	5

Tabelle 6.4: Fixationsanzahl der fünf untersuchten Probanden für Hypothese 2. Es werden jeweils die Fixationsanzahl für die Koordinatensysteme ohne und mit Hilfsgitter aufgelistet.

Die Boxplots in Abbildung 6.12 für die Fertigstellungszeiten und Abbildung 6.13 für die Fixationsanzahl der Koordinatensysteme ohne und mit Hilfsgitter zeigen keine Ausreißer an.

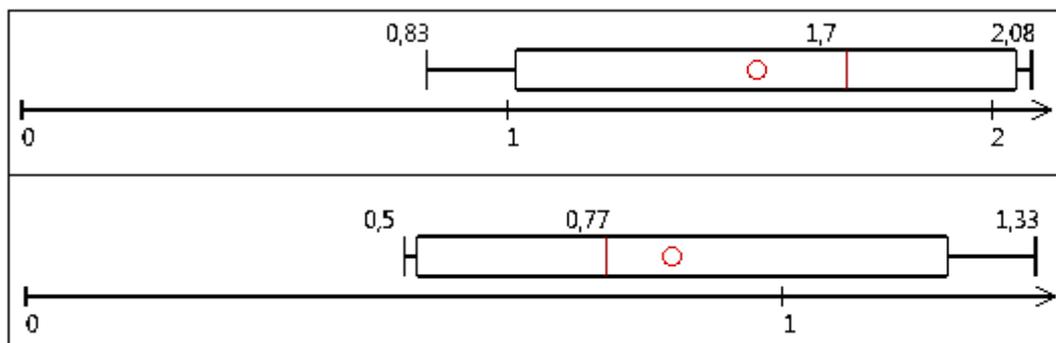


Abbildung 6.12: Boxplot für die Fertigstellungszeiten der fünf erfassten Probanden für das Koordinatensystem ohne (oben) und mit (unten) Hilfsgitter.

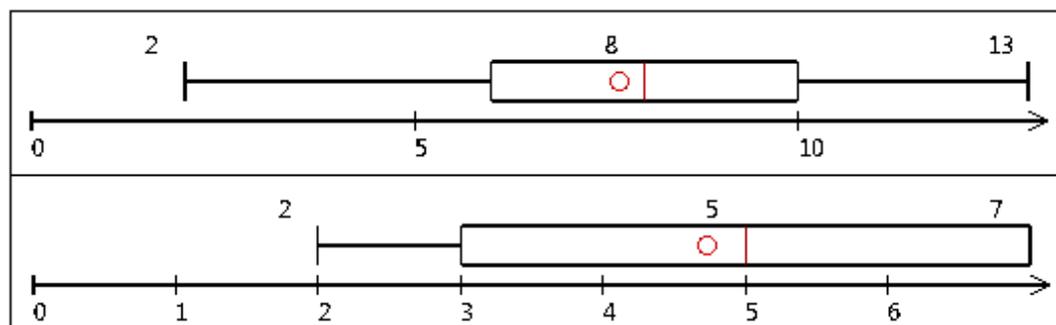


Abbildung 6.13: Boxplot für die Fixationsanzahl der fünf erfassten Probanden für das Koordinatensystem ohne (oben) und mit (unten) Hilfsgitter.

Um zu testen, ob die Alternativhypothese $\mu_h \neq \mu_v$ gilt, wird ein Zweistichproben T-Test durchgeführt. Dieser liefert für die Fertigstellungszeit eine t-Verteilung von 2,14 und einen p-Wert von 0,06968. Für die Fixationsanzahl ergibt sich eine t-Verteilung von 1,4174 und ein p-Wert von 0,2045. Da der p-Wert in beiden Fällen größer des alpha Signifikanzniveaus von 0,05 ist, kann die Alternativhypothese nicht bestätigt werden. Es kann also nicht darauf geschlossen werden, dass der maximale y-Wert mit Hilfsgitter schneller gelesen werden kann als ohne Hilfsgitter.

Die beiden Heatmaps und Scanpaths in Abbildung 6.14 und Abbildung 6.15 zeigen, dass bei einem Koordinatensystem ohne Hilfsgitter die Probanden die einzelnen markierten Punkte fokussiert haben, bevor sie den maximalen Wert bestimmt haben. Bei den Koordinatensystemen mit Hilfsgitter wurden nur Fixationen auf der Linie des maximalen Wertes durchgeführt. Es können aber keine Benutzergruppen daraus abgeleitet werden.

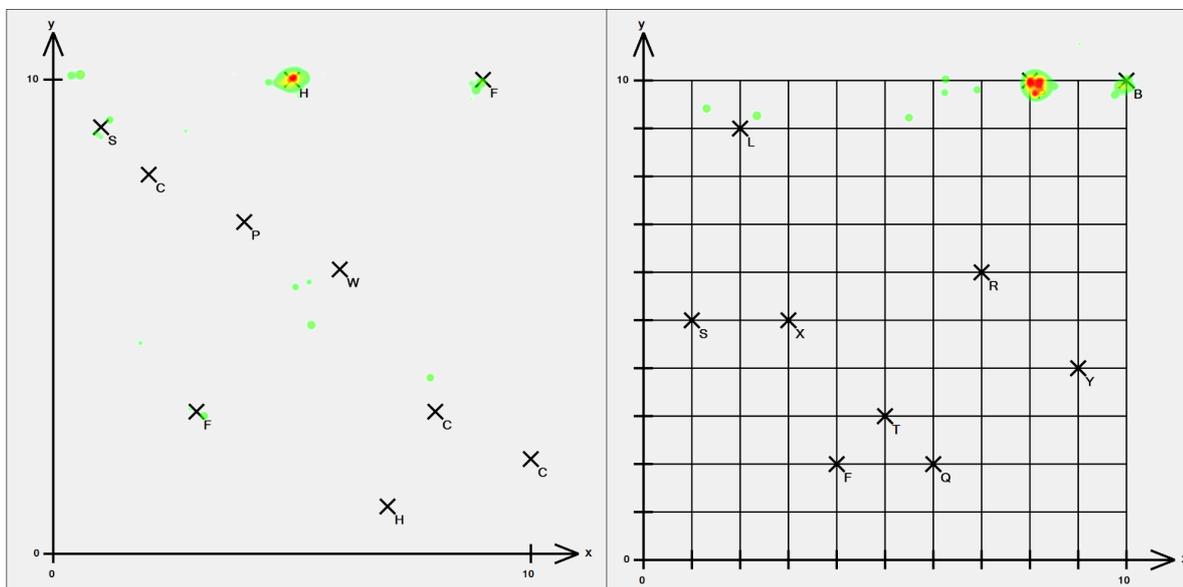


Abbildung 6.14: Heatmap der Fixationen der Probanden für das Koordinatensystem ohne (links) und mit (rechts) Hilfsgitter.

6.4 Zusammenfassung

Die Auswertung der Hypothesen zeigte, dass beide aufgestellten Hypothesen nicht bestätigt werden können. Es wäre aber möglich, dass bei Auswertung aller 30 untersuchten Probanden ein signifikantes Ergebnis entsteht. Die Auswertung zeigt aber, dass die Verwendung des Frameworks die Arbeitszeit verringert hat, da die Ergebnisse in kurzer Zeit zur Verfügung standen und nicht erst nach mehreren Stunden. Außerdem können die durchgeführten Berechnungen für die weitere Auswertung anderer Hypothesen genutzt werden und müssen nicht noch einmal berechnet werden.

6 Demonstration des Prototyps

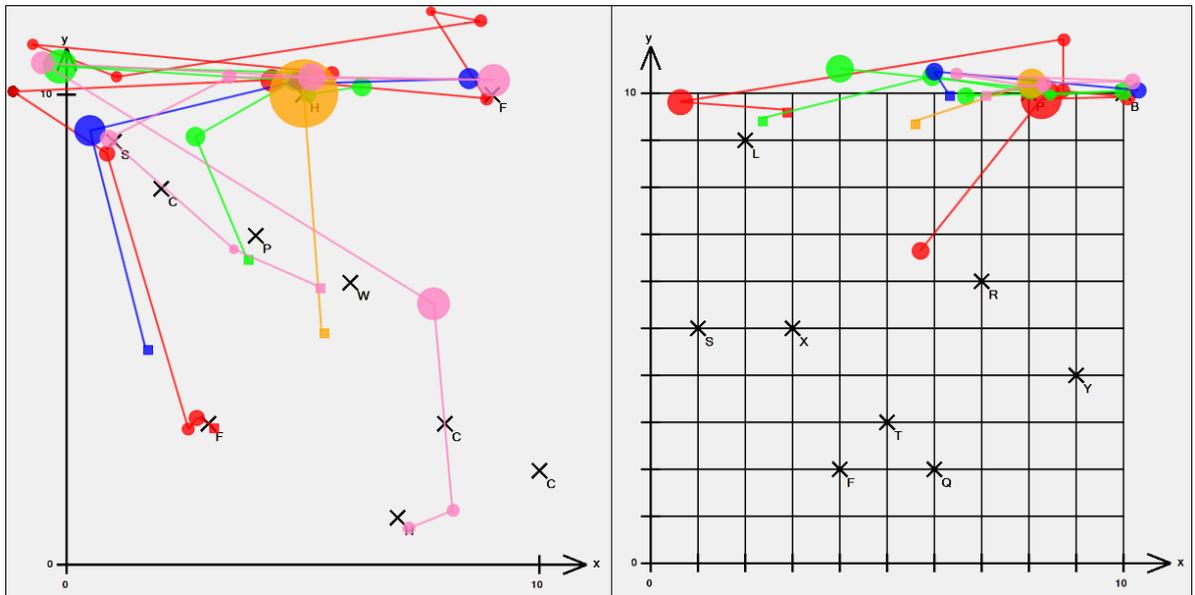


Abbildung 6.15: Scanpaths der Fixationen der Probanden für das Koordinatensystem ohne (links) und mit (rechts) Hilfsgitter.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel fasst die in der Diplomarbeit erarbeiteten Konzepte, Erkenntnisse und Ergebnisse zusammen. Außerdem wird ein Ausblick gegeben wie das Lösungskonzept weiterentwickelt werden kann und welche Erweiterungen im Prototyp dafür implementiert werden müssen.

7.1 Zusammenfassung

In dieser Diplomarbeit wurde ein Analysekonzept für die Evaluation von Eyetracking-Benutzerstudien entwickelt. Das entwickelte Analysekonzept basiert auf dem Visual Information Seeking Mantra und setzt die Konzepte der Data Provenance für die Historie der gesammelten und verwendeten Daten um. Das Konzept definierte für jeden der drei Schritte des Mantras Metriken, Statistiken und Visualisierungen, um einen Benutzer bei der Auswertung einer Eyetracking-Benutzerstudie zu unterstützen. Um zu gewährleisten, dass der Benutzer für die Auswertung der Benutzerstudie alle Daten zur Verfügung hat, wurde ein einheitliches Datenformat entwickelt und die Daten in einer Datenbank gespeichert. Außerdem sollte das Analysekonzept gewährleisten, dass verschiedene Metriken, Statistiken und Visualisierungen für die Auswertung zur Verfügung stehen und dass der Benutzer bei der Auswertung unterstützt wird.

Diese Bedingungen hatten zur Folge, dass ein prototypisches Framework implementiert wurde, welches dem Benutzer ermöglicht eine Eyetracking-Benutzerstudie zu erstellen, durchzuführen, auszuwerten sowie einen Studienbericht teilautomatisiert zu erstellen. Für die Auswertung können, nach der Durchführung einer Eyetracking-Benutzerstudie mit Hilfe eines Tobii Eyetracking-Systems, die aufgenommenen Daten in die Datenbank des Frameworks importiert werden. Diese stehen dann für die Analyse zur Verfügung. Der Benutzer hat neben der Auswertung anhand von Metriken, Statistiken und Visualisierungen die Möglichkeit, die Auswertung des Fragebogens der Benutzerstudie anzuzeigen sowie Boxplot-Diagramme und einen Studienbericht zu exportieren.

Anhand der Auswertung zweier Hypothesen einer durchgeführten Benutzerstudie, wurde die Funktionalität des Prototyps demonstriert. Die Auswertung der Daten anhand der implementierten Metriken, Statistiken und Visualisierungen zeigt, dass das Framework die Auswertung einer Benutzerstudie unterstützt und die teilautomatisierte Berichterstellung dem Benutzer Arbeit abnimmt.

7.2 Ausblick

Der folgende Abschnitt soll einen Ausblick über mögliche Weiterentwicklungen des Analysekonzepts geben. Außerdem wird ein Überblick über die Erweiterung der Implementierung gegeben.

7.2.1 Erweiterung des Analysekonzepts

Das Analysekonzept beschränkt sich momentan auf die Auswertung von Eyetracking-Benutzerstudien. Die grafischen Elemente innerhalb eines Stimulus, der in Form eines Bitmaps vorliegt, zum Beispiel Koordinatenstrich, Skalenstriche, Punktmarkierung, Skalenwerte etc. haben dabei keine Semantik. Die Verbindung der Objekte mit einer Semantik könnten aber Aufschluss darüber geben, wie das mentale Modell eines Benutzers, bei der Betrachtung dieses Stimulus, aussieht (siehe Abbildung 7.1). Diese Informationen könnten wiederum helfen, die grafischen Elemente anhand des mentalen Modells des Benutzers anzuordnen, so dass dieser sich besser zurechtfinden kann. Hierfür muss untersucht werden wie das mentale Modell eines Benutzers für verschiedene grafische Elemente aussieht, ähnlich wie bei der kognitiven Simulation (vergleiche dazu [1]) und es müssen die semantischen Informationen des Stimulus in das Datenbankmodell und in die Analyse des Frameworks integriert werden.

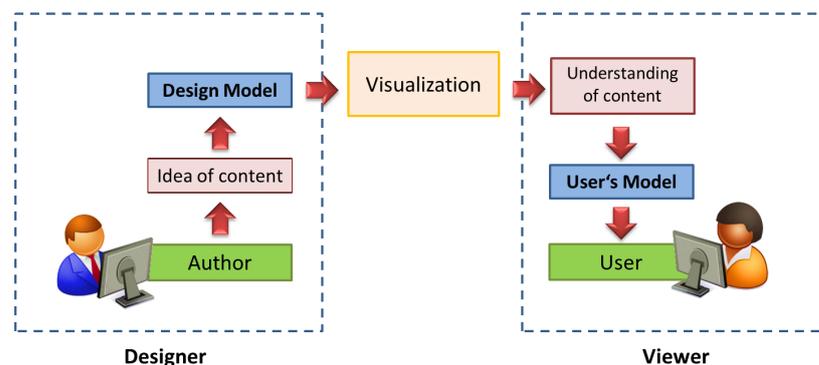


Abbildung 7.1: Verschiedene mentale Modelle des Designers und des Betrachters einer Visualisierung können zu Missverständnissen der visualisierten Information führen. Deswegen sollte das mentale Modell des Benutzers dem Designer bekannt sein, so dass dieser das Benutzermodell mit in die Erstellung einbeziehen kann.

7.2.2 Erweiterung der Implementierung

Die Erweiterbarkeit des Frameworks wurde durch die Verwendung eines Plug-in Systems über Schnittstellen gewährleistet. Dadurch können weitere Metriken, Statistiken und Visualisierungen integriert werden. Momentan fehlen Filtermöglichkeiten, um besser durch

die Daten navigieren zu können. Außerdem sollte das Framework für den Vergleich von Stimulus-Daten die Option anbieten, mehr als einen Stimulus auswählen zu können. Hierfür muss die Treeview bei der Analyse, wie bei der Auswahl der Probanden, durch eine Liste ersetzt werden, bei der jeder Stimulus durch eine Kontrollbox ausgewählt werden kann.

Momentan erlaubt das Framework nur die Verwendung eines Tobii Eyetracking-Systems, da der Datenimport nur für diese Daten ausgelegt ist. Um das Framework modular verwenden zu können, sollte es die Möglichkeit bieten, unabhängig vom Eyetracking-System, Daten zu importieren. Neben der Verwendung mehrerer Eyetracking-Systeme sollte das Framework die Option anbieten, mehrere Statistikprogramme außer R einbinden zu können.

Um den Benutzer bei der Auswertung und Studienberichterstellung besser zu unterstützen, sollten weitere Optionen eingebaut werden. Dies könnte zum Beispiel sein, dass der Benutzer in der Historie auswählen kann, welche Berechnungen und Visualisierungen er im Studienbericht haben möchte. Es wäre auch hilfreich, wenn die Historie nicht nur über scrollen durchsucht werden kann, sondern über das Datum der Erstellung oder den Typ der Metrik, Statistik oder Visualisierung. Hierfür könnte zum Beispiel eine Treeview oder Liste mit allen Daten verwendet werden.

Ein großes Problem bei der Auswertung einer Eyetracking-Benutzerstudie ist, dass die Anzeige der Visualisierungen viel Platz einnimmt. Da es insbesondere hilfreich für die Auswertung sein kann, mehrere Visualisierungen nebeneinander zu platzieren, reicht oft ein normaler Computerbildschirm nicht aus. Die Verwendung von großen Leinwänden, wie zum Beispiel einer Powerwall könnte hier Abhilfe schaffen. Dafür müsste aber das Interaktionskonzept erweitert werden, da eine Bedienung über Maus und Tastatur umständlich ist. Am Institut für Visualisierung und interaktive Systeme wird momentan untersucht, wie die Interaktion von Gesten und Touch mit einer Powerwall aussehen könnte (vergleiche hierfür die Arbeiten von N. Ploner [47] und E. Püttman [51]).

Anhang

Studiendurchführung

Das Ziel dieser Studie ist es, für verschiedene Visualisierungstechniken die Augenbewegungen und Durchführungszeiten der Probanden aufzuzeichnen.

Die Studie wird komplett am Eye-Tracker ablaufen. Der Eye-Tracker zeichnet bei den einzelnen Aufgaben jeweils die Augenbewegung auf. Diese Daten werden später ausgewertet, um die Bewegung der Augen zu analysieren und Durchführungszeit für die einzelnen Aufgaben zu messen.

Jede Aufgabe wird am Anfang durch die Kalibrierung der Augen am Eye-Tracker begonnen. Es wird insgesamt 4 Aufgabentypen geben:

- Ablesen von Zahlen in einem eindimensionalen
- Ablesen von Zahlen in zweidimensionalen Koordinatensystemen
- Ablesen des größten Wertes in einem zweidimensionalen Koordinatensystemen
- Ablesen von Werten in Balkendiagrammen

Jeder Aufgabenblock beginnt mit einer Einführung in die Aufgabe. In der Einführung werden einige Testbilder gezeigt, um die Aufgabe zu veranschaulichen.

Nach der Kalibrierung beginnt die eigentliche Aufgabe. Bei jedem Bildwechsel wird zuerst ein rotes Kreuz in der Bildschirmmitte angezeigt. Das rote Kreuz dient als Ausgangspunkt der Augen für das nächste Bild. Die Augen müssen immer auf das rote Kreuz gerichtet werden, bevor das nächste Bild eingeblendet wird.

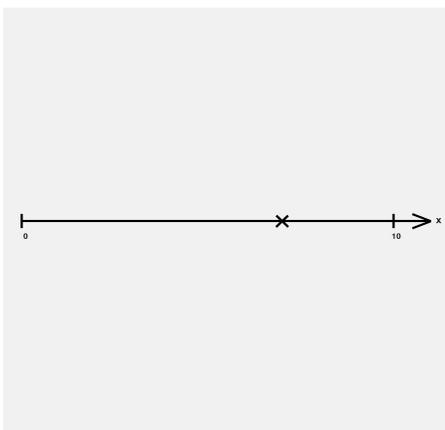
Aufgabe 1: Ablesen von Zahlen in einem eindimensionalen Koordinatensystem

Im ersten Aufgabenblock wird das Ablesen von Zahlen in einem eindimensionalen Koordinatensystem studiert. Unten sind eindimensionale Koordinatensysteme dargestellt. Der kleinste Wert liegt am linken Ende oder unteren Ende des Zahlenstrahls. Wir untersuchen drei Aufgaben, die mit eindimensionalen Koordinatensystemen durchgeführt werden sollen:

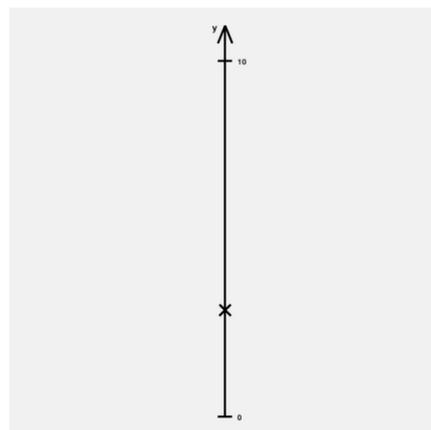
- Ablesen eines Punktes in dem eindimensionalen Koordinatensystem ohne Skalenstriche
- Ablesen eines Punktes in dem eindimensionalen Koordinatensystem mit Skalenschritten mit Abstand 1
- Fünf Punkte werden mit einem Kreuz markiert. Der Wert eines vom Operateur vorgegebenen Punktes soll angegeben werden.

Die Koordinatensysteme sind vertikal oder horizontal angeordnet.

Bitte geben Sie die mit dem Kreuz markierte Zahl an.

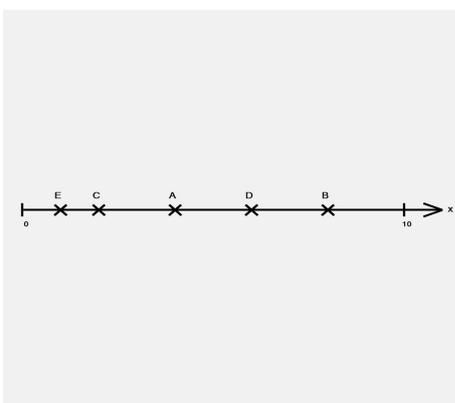


Der markierte Punkt hat den Wert 7



Der markierte Punkt hat den Wert 3

Bitte geben Sie den Wert des vom Operateur vorgegebenen Kreuzes an.



Beispiel: Punkt B hat den Wert 8

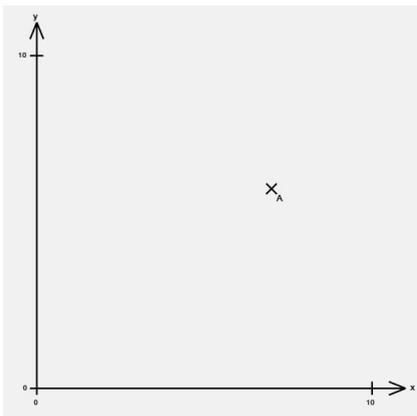
Aufgabe 2: Ablesen von Zahlen in zweidimensionalen Koordinatensystemen

Die Abbildungen unten zeigen zweidimensionale Koordinatensysteme. Ein zweidimensionales Koordinatensystem hat eine horizontale und eine vertikale Achse. Die horizontale Achse verläuft von unten links nach unten rechts, die vertikale Achse von links unten nach links oben. Wir untersuchen drei Fälle von Koordinatensystemen:

- ohne Skalenstriche
- mit Skalenstrichen in einem Abstand von 1
- Koordinatensysteme mit eingeblendetem Hilfsgitter

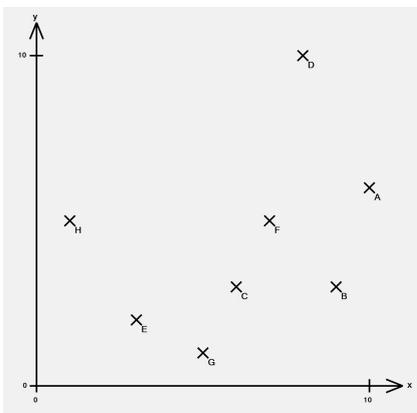
Ein oder mehrere Punkte sind in den Koordinatensystemen mit Kreuzen markiert. Die Aufgabe besteht darin, die X- und Y-Koordinaten der Punkte anzugeben. Die Reihenfolge spielt dabei keine Rolle.

Bitte geben Sie die X- und die Y-Koordinate des markierten Punktes an.



Beispiel: 7, 6

Bitte geben Sie in beliebiger Reihenfolge die X- und die Y-Koordinaten der markierten Punkte an.



Beispiel: 1, 4

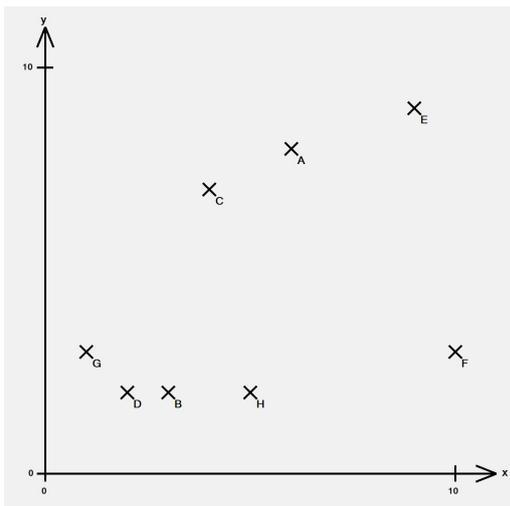
Aufgabe 3: Ablesen des größten Wertes in einem zweidimensionalen Koordinatensystemen

Die Abbildung unten zeigt ein zweidimensionales Koordinatensystem. Ein zweidimensionales Koordinatensystem hat eine horizontale und eine vertikale Achse. Die horizontale Achse verläuft von unten links nach unten rechts, die vertikale Achse von links unten nach links oben. Wir untersuchen drei Fälle von Koordinatensystemen:

- ohne Skalenstriche
- mit Skalenstrichen in einem Abstand von 1
- Koordinatensysteme mit eingeblendetem Hilfsgitter.

Mehrere Punkte sind in den Koordinatensystemen mit Kreuzen markiert. Die Aufgabe besteht darin, den Y-Wert des Punktes mit dem größten Y-Wert anzugeben.

Bitte geben Sie die Y-Koordinate des Punktes mit dem größten Y-Wert an.

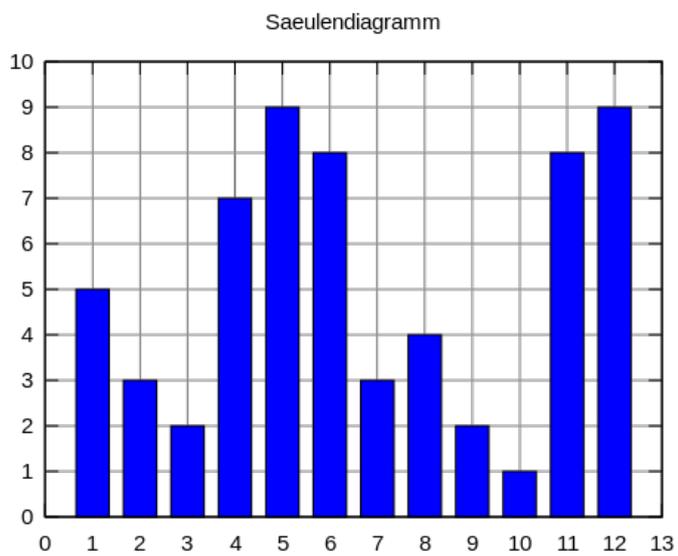


Beispiel: Punkt E hat den Y-Wert 9.

Aufgabe 4: Ablesen von Werten in Balkendiagrammen

In diesem Aufgabenteil werden acht Säulendiagramme gezeigt, aus denen Werte für bestimmte Kategorien ausgelesen werden sollen. So kann eine Beispielaufgabe folgendermaßen lauten:

Bitte geben Sie in dem unten dargestellten Balkendiagramm den zu der X-Kategorie 8 gehörenden Y-Wert an.



Beispiel: Die Antwort lautet 4.

Literaturverzeichnis

- [1] John R. Anderson, Daniel Bothell, Michael D. Byrne, Scott Douglass, Christian Lebiere, and Yulin Qin. An Integrated Theory of the Mind. *Psychological Review*, 111(4):1036–1060, Oct 2004. (Zitiert auf Seite 124)
- [2] Gennady Andrienko, Natalia Andrienko, Michael Burch, and Daniel Weiskopf. Visual Analytics Methodology for Eye Movement Studies. In *InfoVIS Proceedings 2012 (will appear)*, 2012. (Zitiert auf Seite 75)
- [3] Anne Aula, Päivi Majaranta, and Kari-Jouko Räihä. Eye-Tracking Reveals the Personal Styles for Search Result Evaluation. In *Human-Computer Interaction - INTERACT 2005*, volume 3585 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1058–1061. Springer Berlin / Heidelberg, 2005. (Zitiert auf Seite 64)
- [4] Martin Böhme, Andre Meyer, Thomas Martinetz, and Erhardt Barth. Remote Eye Tracking: State of the Art and Directions for Future Development. In *The second Conference on Communication by Gaze Interaction (COGAIN)*, 2006. (Zitiert auf Seite 47)
- [5] Jürgen Bortz. *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Springer, 2005. (Zitiert auf Seite 24)
- [6] Mattia Broilo, Nicola Piatto, Giulia Boato, Nicola Conci, and Francesco De Natale. Object Trajectory Analysis in Video Indexing and Retrieval Applications. In Dan Schonfeld, Caifeng Shan, Dacheng Tao, and Liang Wang, editors, *Video Search and Mining*, volume 287 of *Studies in Computational Intelligence*, pages 3–32. Springer Berlin / Heidelberg, 2010. (Zitiert auf Seite 75)
- [7] Daniel Bruneau, M. Angela Sasse, and John McCarthy. The Eyes Never Lie: The Use of Eye Tracking in HCI Research. In ACM, editor, *Proceedings of the CHI'02 Workshop on Physiological Computing*, CHI'02, 2002. (Zitiert auf Seite 39)
- [8] Peter Buneman, Sanjeev Khanna, and Tan Wang-Chiew. Why and Where: A Characterization of Data Provenance. In *Database Theory — ICDT 2001*, volume 1973 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 316–30, Berlin Heidelberg, 2001. Springer. (Zitiert auf Seite 15)
- [9] Paul Cairns and Anna L. Cox. *Research Methods for Human-Computer Interaction*. Cambridge University Press, 2008. (Zitiert auf den Seiten 21 und 59)
- [10] Eye com Research. <http://eyecomresearch.com/eyetrackingresearch/a-comparison-of-bright-and-dark-pupil-tracking-methods/>. (Zitiert auf Seite 45)

- [11] Heiko Drewes. *Eye Gaze Tracking for Human Computer Interaction*. PhD thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2010. (Zitiert auf den Seiten 50 und 59)
- [12] Andrew T. Duchowski. A Breadth-First Survey of Eye-tracking Applications. *Behaviour Research Methods, Instruments and Computers*, 34:455–70, 2002. (Zitiert auf Seite 56)
- [13] Andrew T. Duchowski. *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*. Springer, 2003. (Zitiert auf den Seiten 43 und 44)
- [14] Andrew T. Duchowski, Jason Driver, Sheriff Jolaoso, William Tan, Beverly N. William, and Ami Robbins. Scanpath Comparison Revisited. In *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye-Tracking Research Applications*, ETRA '10, pages 219–226, New York, NY, USA, 2010. ACM. (Zitiert auf Seite 65)
- [15] Duden. <http://www.duden.de/rechtschreibung/Perzeption>. (Zitiert auf Seite 30)
- [16] Duden. <http://www.duden.de/rechtschreibung/Wahrnehmung>. (Zitiert auf Seite 30)
- [17] Duden. <http://www.duden.de/rechtschreibung/Kognition>. (Zitiert auf Seite 30)
- [18] Thomas Ertl and Filip Sadlo. Vorlesung: Visualization, 2011. (Zitiert auf Seite 14)
- [19] Eyeworks. Eyetracking. <http://www.eyetracking.com/Software/EyeWorks>. (Zitiert auf Seite 62)
- [20] User First. <http://www.userfirst.com/solutions/eye-tracking/advertising-effectiveness>. (Zitiert auf Seite 58)
- [21] Digital Media for Artists. <http://www.dma.ufg.ac.at/assets/16457/intern/auge.jpg>. (Zitiert auf Seite 31)
- [22] Digital Media for Artists. <http://www.dma.ufg.ac.at/app/link/Grundlagenstep=1>. (Zitiert auf Seite 32)
- [23] Digital Media for Artists. http://www.dma.ufg.ac.at/assets/16579/intern/auge_winkel.jpg. (Zitiert auf Seite 32)
- [24] Digital Media for Artists. <http://www.dma.ufg.ac.at/assets/16457/intern/zapfen-sensitivitaet-absolut.jpg>. (Zitiert auf Seite 32)
- [25] Transport for London. <http://www.tfl.gov.uk/assets/images/general/beckmap1.jpg>. (Zitiert auf den Seiten 12 und 13)
- [26] Joseph H. Goldberg and Xerxes P. Kotval. Computer Interface Evaluation Using Eye Movements: Methods and Constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24:631–45, 1999. (Zitiert auf den Seiten 37 und 52)
- [27] David Hubel. *Auge und Gehirn*. Spektrum der Wissenschaft, 1990. (Zitiert auf Seite 33)
- [28] Oswald Huber. *Das Psychologische Experiment: Eine Einführung*. Hans Huber, 1987. (Zitiert auf den Seiten 15, 16, 17, 18, 23 und 29)
- [29] Edmund Burke Huey. *The Psychology of Reading*. M.I.T. Press, 1968. (Zitiert auf Seite 35)

- [30] Eyetracking Inc. *Eyeworks User Manual*, 3 edition. (Zitiert auf Seite 63)
- [31] Senso Motoric Instruments. http://www.smivision.com/fileadmin/user_upload/downloads/product_flyer/prod_smi_iviewx_hispeed_flyer.pdf. (Zitiert auf den Seiten 48 und 49)
- [32] Shinobu Ishihara. *Tests for Colour-blindness*. Kanehara Shuppan Co, 1972. (Zitiert auf Seite 112)
- [33] Robert J. K. Jacob and Keith S. Karn. *Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Ready to Deliver the Promises*. 2003. (Zitiert auf den Seiten 35, 36, 40, 41, 42 und 43)
- [34] Markus Joos, Matthias Rötting, and Boris M. Velichkovsky. *Bewegungen des Menschlichen Auges: Fakten, Methoden und Innovative Anwendungen*, pages 142–168. Gruyter, 2003. (Zitiert auf den Seiten 37 und 38)
- [35] Kuleuven. Dual Purkinje Eyetrackers. <http://ppw.kuleuven.be/english/lep/resources/purkinje>. (Zitiert auf den Seiten 45 und 46)
- [36] Applied Science Laboratories. <http://www.asleyetracking.com/>. (Zitiert auf Seite 48)
- [37] Applied Science Laboratories. fMRI FAQs. <http://www.asleyetracking.com/Site/Products/EYETRAC6Series/LongRangeOptic/tabid/69/Default.aspx>. (Zitiert auf den Seiten 49 und 50)
- [38] Applied Science Laboratories. H6 Optics. <http://www.asleyetracking.com/Site/Portals/0/H6Optics.pdf>. (Zitiert auf Seite 48)
- [39] Applied Science Laboratories. Model H-BN6. <http://www.asleyetracking.com/Site/Portals/0/H-BN6.pdf>. (Zitiert auf Seite 48)
- [40] Michael Land, Neil Mennie, and Jennifer Rusted. The Roles of Vision and Eye Movements in the Control of Activities of Daily Living. *Perception*, 28:1311–28, 1999. (Zitiert auf Seite 57)
- [41] MSDN Magazin. WPF-Anwendungen mit dem Model-View-View-Model-Entwurfsmuster. <http://msdn.microsoft.com/de-de/magazine/dd419663.aspx>. (Zitiert auf Seite 82)
- [42] Metrovision. www.metrovision.fr. (Zitiert auf Seite 44)
- [43] MSDN. Windows Presentation Foundation. <http://msdn.microsoft.com/de-de/library/ms754130.aspx>. (Zitiert auf Seite 82)
- [44] Deutsches Museum. <http://www.deutsches-museum.de/ausstellungen/werkstoffe-produktion/altamira-hoehle/>. (Zitiert auf Seite 12)
- [45] Nasa. Nasa Task Load Index (TLX). Moffett Field, California. (Zitiert auf Seite 21)
- [46] Stephen E. Palmer. *Vision Science - Photons to Phenomenology*. M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1999. (Zitiert auf Seite 30)

- [47] Nico Ploner. Gestensteuerung für Powerwall-basierte Visualisierungen. Master's thesis, Universität Stuttgart, 2012. (Zitiert auf Seite 125)
- [48] Alex Poole and Linden J. Ball. *Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Current Status and Future Prospects*, volume Encyclopedia of HCI. Pennsylvania: Idea Group, Inc, 2005. (Zitiert auf den Seiten 39, 40, 41, 42, 43 und 46)
- [49] C. M. Privitera and L. W. Stark. Algorithms for Defining Visual Regions-of-Interest: Comparison with Eye Fixations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(9):970–982, 2000. (Zitiert auf Seite 65)
- [50] The Code Project. WPF Charting using MVVM Pattern. <http://www.codeproject.com/Articles/117673/WPF-Charting-using-MVVM-Pattern>. (Zitiert auf Seite 107)
- [51] Edwin Püttman. Tabletop-Computer-basierte Steuerung für Powerwall-Visualisierungen. Master's thesis, Universität Stuttgart, 2012. (Zitiert auf Seite 125)
- [52] Andreas Quatember. *Statistik ohne Angst vor Formeln*. Pearson Studium, 2011. (Zitiert auf den Seiten 24 und 27)
- [53] Michael Raschke, Xuemei Chen, and Thomas Ertl. Parallel Scan-Path Visualization. In *Proceedings of the 2012 Symposium on Eye-Tracking Research and Applications*, volume 2012, pages 165–168, 2012. (Zitiert auf Seite 53)
- [54] RDotNet. <http://rdotnet.codeplex.com/>. (Zitiert auf Seite 104)
- [55] Nicholas Del Rio and Paulo Pinheiro da Silva. Probe-it! Visualization Support for Provenance. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Visual Computing - Volume Part II, ISVC'07*, pages 732–41, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer. (Zitiert auf Seite 15)
- [56] Thomas Schlegel. Vorlesung: Usability and Interaction, 2009. (Zitiert auf den Seiten 33 und 34)
- [57] Heidrun Schumann and Wolfgang Müller. *Visualisierung: Grundlagen und Allgemeine Methoden*. Springer, 2000. (Zitiert auf Seite 13)
- [58] Ben Shneiderman. The Eyes have it. In *IEEE Visual Languages '96*, pages 336–343, 1996. (Zitiert auf den Seiten 14, 15 und 73)
- [59] Oleg Spakov. *iComponent - Devide-Independent Platform for Analyzing Eye Movement Date and Developing Eye-based Applications*. PhD thesis, University of Tampere, 2008. (Zitiert auf den Seiten 51, 53, 54, 55 und 56)
- [60] Tobii Technology. http://www.tobii.com/ImageVaultFiles/id_775/cf_60/Tobii_Image_T60XL_Front_WS619.jpg. (Zitiert auf Seite 47)
- [61] Tobii Technology. <http://www.tobii.com/en/eye-tracking-research/global/products/software/tobii-studio-analysis-software/>. (Zitiert auf Seite 61)
- [62] Tobii Technology. *Tobii Studio User Manual*. (Zitiert auf den Seiten 50, 54 und 61)

- [63] Edward Tufte. *The Visual Display of Quantitative Information*. Graphics Press, 1983. (Zitiert auf den Seiten 11 und 12)
- [64] Jürgen Bortz und Nicole Döring. *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. Springer, 2002. (Zitiert auf den Seiten 15, 16, 17 und 18)
- [65] Chronos Vision. <http://www.chronos-vision.de/eye-tracking-produkte.html>. (Zitiert auf Seite 44)
- [66] Chronos Vision. http://www.chronos-vision.de/downloads/CV_Product_SSC.pdf. (Zitiert auf Seite 45)
- [67] Colin Ware. *Information Visualization: Perception for Design*. Morgan Kaufmann Publishers, 2004. (Zitiert auf Seite 33)
- [68] Colin Ware. *Visual Thinking for Design*. Morgan Kaufmann Publishers, 2008. (Zitiert auf den Seiten 30 und 33)
- [69] Randall White, Romain Mensan, Raphaëlle Bourrillon, Catherine Cretin, Thomas F. G. Higham, Amy E. Clark, Matthew L. Sisk, Elise Tartar, Philippe Gardère, Paul Goldberg, Jacques Pelegrin, Hélène Valladas, Nadine Tisnérat-Laborde, Jacques de Sanoit, Dominique Chambellan, and Laurent Chiotti. Context and Dating of Aurignacian Vulvar Representations from Abri Castanet, France. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, volume 109, pages 8450–8455, 2012. (Zitiert auf Seite 11)
- [70] Wikipedia. <http://de.wikipedia.org/wiki/Boxplot>. (Zitiert auf Seite 25)
- [71] Alfred Yarbus. *Eye Movements and Vision*. Plenum Press, 1967. (Zitiert auf den Seiten 35 und 36)
- [72] Hoi Ying, Melanie Tory, and Colin Swindells. eseetrack - Visualizing Sequential Fixation Patterns. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 16(6):953–962, 2010. (Zitiert auf den Seiten 64 und 65)
- [73] Laurence R. Young and David Sheena. Survey of Eye Movement Recording Methods. *Behaviour Research Methods*, 7:397–429, 1975. (Zitiert auf Seite 44)
- [74] Detlef Zühlke. *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen Useware-Engineering für Technische Systeme*. Springer, 2 edition, 2012. (Zitiert auf Seite 31)

Alle URLs wurden zuletzt am 15.08.2012 geprüft.

Erklärung

Hiermit versichere ich, diese Arbeit selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen benutzt zu haben.

(Tanja Blascheck)