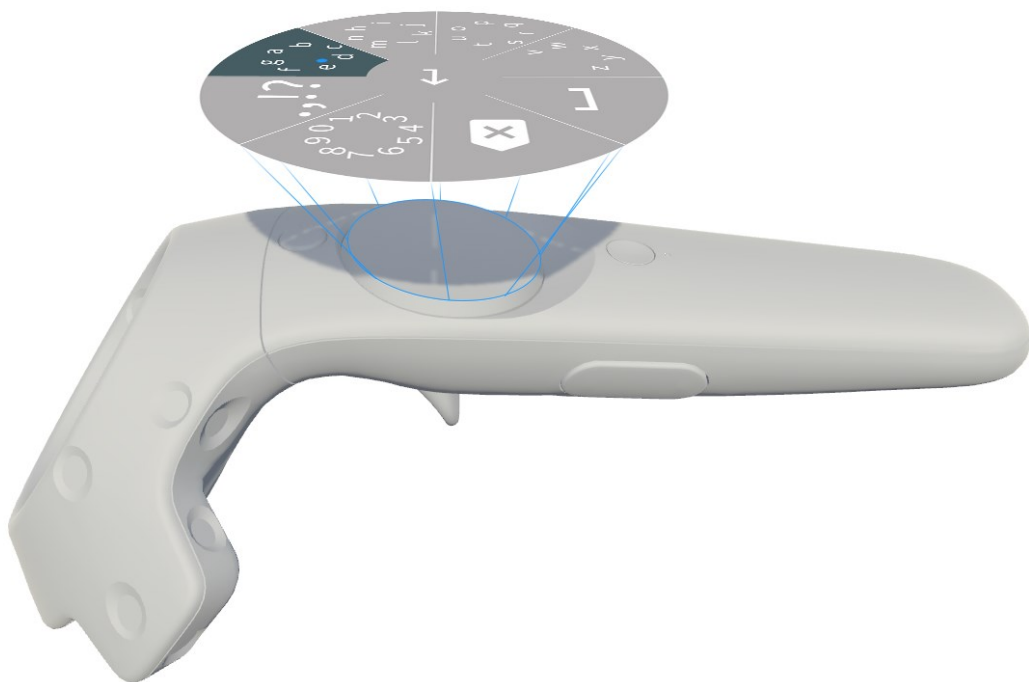


VR Keyboard

Bachelorarbeit

Samuel Bittmann, 2019



Betreuer: Markus Zank

Experte: Diego Schmidlin

Bachelorarbeit an der Hochschule Luzern – Informatik

Titel: VR Keyboard

Studentin / Student 1: Samuel Bittmann

Studentin / Student 2:

Studiengang: BSc Informatik

Abschlussjahr: 2019

Betreuungsperson: Markus Zank

Expertin / Experte: Diego Schmidlin

Codierung / Klassifizierung der Arbeit:

- ☐ **A: Einsicht (Normalfall)**
- ☐ **B: Rücksprache** (Dauer: Jahr / Jahre)
- ☐ **C: Sperre** (Dauer: Jahr / Jahre)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich/wir die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt haben, alle verwendeten Quellen, Literatur und andere Hilfsmittel angegeben haben, wörtlich oder inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht haben, das Vertraulichkeitsinteresse des Auftraggebers wahren und die Urheberrechtsbestimmungen der Fachhochschule Zentralschweiz (siehe Markblatt «Studentische Arbeiten» auf MyCampus) respektieren werden.

Ort / Datum, Unterschrift _____

Abgabe der Arbeit auf der Portfolio Datenbank:

Bestätigungsvisum Student/in

Ich bestätige, dass ich die Bachelorarbeit korrekt gemäss Merkblatt auf der Portfolio Datenbank abgelegt habe. Die Verantwortlichkeit sowie die Berechtigungen habe ich abgegeben, so dass ich keine Änderungen mehr vornehmen kann oder weitere Dateien hochladen kann.

Ort / Datum, Unterschrift _____

Verdankung

Ich danke meinem Betreuer, Markus Zank, für die grossartige Unterstützung während der ganzen Arbeit. Ausserdem möchte ich mich bei meinem Experten, Diego Schmidlin, für das nützliche Feedback nach der Zwischenpräsentation bedanken. Weiter gilt mein Dank meinen Angehörigen, Freunden und Bekannten, die sich bereitwillig für die Nutzertests und die Studie zur Verfügung gestellt und mich emotional unterstützt haben. Ausserdem danke ich allen Kommilitoninnen und Kommilitonen, die an der Nutzerstudie teilgenommen, sowie den anderen Studierenden im VR-Lab, die bei Fragen zur Hard- und Software stets bereitwillig weitergeholfen haben. Der Hochschule Luzern danke ich für die Zurverfügungstellung des VR-Labs, welches über die notwendige technische Ausstattung verfügte.

Eingangsvisum (durch das Sekretariat auszufüllen):

Rotkreuz, den _____ Visum: _____

Hinweis: Die Bachelorarbeit wurde von keinem Dozierenden nachbearbeitet. Veröffentlichungen (auch auszugsweise) sind ohne das Einverständnis der Studiengangleitung der Hochschule Luzern – Informatik nicht erlaubt.

Copyright © 2019 Hochschule Luzern – Informatik

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Arbeit darf ohne die schriftliche Genehmigung der Studiengangleitung der Hochschule Luzern – Informatik in irgendeiner Form reproduziert oder in eine von Maschinen verwendete Sprache übertragen werden.

I Abstract

Wann immer möglich wird die Eingabe von Text in VR- und AR-Anwendungen vermieden. Allerdings gibt es Situationen, in denen es keine Alternative zur Texteingabe gibt, beispielsweise für die Eingabe von Dateinamen oder Passwörtern. In dieser Arbeit wurde ein Kriterienkatalog ausgearbeitet, mit welchem sich Eingabemöglichkeiten für Text in VR bewerten lassen. Anschliessend wurde aufbauend auf einer bestehenden Arbeit eine neue Eingabemethode namens SektorInput entworfen. Ursprünglich wurden Prototypen für vier unterschiedliche Eingabevarianten entwickelt, welche mithilfe von Nutzerstests überprüft und weiterentwickelt wurden. Ein finaler Prototyp wurde schliesslich in einer Nutzerstudie anhand des Kriterienkatalogs evaluiert und mit der in VR weit verbreiteten Laserpointer-Tastatur verglichen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die eigene Methode bei der Eingabe von deutschen Sätzen mit durchschnittlich 4.77 Wörtern pro Minute signifikant langsamer als die Laserpointer-Tastatur ist, mit welcher im Schnitt 11.61 Wörter pro Minute eingegeben wurden. Und dies bei einer etwa identischen Fehlerrate. Bei der Eingabe von zufälligen Zeichenfolgen, welche die Eingabe von Kennwörtern und ähnlichen Texten simuliert, wurde hingegen kein signifikanter Unterschied in der Eingabegeschwindigkeit festgestellt. Allerdings war in diesem Fall die Fehlerrate bei der eigenen Methode signifikant tiefer, nämlich 3% gegenüber 14% bei der Laserpointer-Tastatur. Hinzu kommt, dass SektorInput alle Zeichen der Schweizer QWERTZ-Tastatur unterstützt, wohingegen mit der getesteten Laserpointer-Tastatur nur eine Untermenge der Zeichen eingegeben werden kann. Aus diesen Gründen scheint die eigene Methode für die Eingabe von zufälligen Zeichenfolgen besser geeignet zu sein.

II Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung	1
2	Stand der Forschung	3
3	Ideen und Konzepte	8
3.1	Anwendungsfall	8
3.2	Vorgehen	8
3.3	Lösungsidee 1	8
3.4	Lösungsidee 2	9
3.5	Auswahl	9
4	Methodik und Übersicht	11
5	Realisierung	12
5.1	Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Eingabemethoden	12
5.2	Messung der Falscheingaben	13
5.3	Erarbeitung des Kriterienkatalogs	15
5.4	Verwendete Hard- und Software	15
5.5	Erste Iteration der Tastatur	16
5.6	Nutzertest 1	19
5.7	Weiterentwicklung der Prototypen	22
5.8	Nutzertest 2	25
5.9	Nutzerstudie	26
6	Resultate	29
7	Diskussion	32
8	Ausblick	33
9	Anhänge	34
	Anhang A Kriterienkatalog	34
	Anhang B Beobachtungen und Aussagen aus dem Nutzertest 1	36
	Anhang C Resultate Fragebogen Nutzertest 1	39
	Anhang D Resultate Fragebogen Nutzertest 2	43
	Anhang E Zeichen auf der Schweizer QWERTZ-Tastatur und die relativen Häufigkeiten	46
	Anhang F Bigramm-Wahrscheinlichkeiten	47
	Anhang G Messresultate der Nutzerstudie	49
	Anhang H Auswertung des User Experience Questionnaires	50
10	Verzeichnisse	52
10.1	Abbildungsverzeichnis	52
10.2	Tabellenverzeichnis	52
11	Literaturverzeichnis	53

1 Problemstellung

Am 1. August 2012 startete die damals noch unbekannte Firma Oculus eine Crowdfunding-Kampagne auf der Webseite Kickstarter und versprach, Videospiele dreidimensional erlebbar zu machen [1]. Die Kampagne war ein voller Erfolg. Als sie nach einem Monat endete, war das gesetzte Finanzierungsziel von 250'000 \$ fast neunfach übertroffen worden. 9'522 Personen haben die Entwicklung des ersten Entwicklerkits der Oculus Rift unterstützt und dadurch gezeigt, wie gross das Interesse an der virtuellen Welt ist. Dabei war die Technologie zu diesem Zeitpunkt gar nicht mehr neu. Bereits in den 70er- und 80er-Jahren wurden VR-Systeme eingesetzt, damals aber meistens in Simulatoren für Luftfahrt, das Militär oder im medizinischen Umfeld [2]. Später, in den 90er-Jahren, wurden erste Systeme für Videospiele entwickelt (siehe Abbildung 1). Jedoch konnten sich diese Geräte nie durchsetzen.



Abbildung 1: VirtualBoy, ein Virtual Reality System zu Unterhaltungszwecken, welches 1995 auf den Markt kam [3].

Die von Oculus initiierte, neue Welle von VR scheint bislang hingegen anzudauern. Die eingesetzte Technik wird laufend verbessert und mit HTC und Sony sind 2016 weitere Konkurrenten in den Markt eingedrungen, welche mithelfen, die Innovation voranzutreiben [4, 5]. Und nicht nur die Gaming-Industrie, sondern auch andere Bereiche haben ein Interesse an Virtual und Augmented Reality gefunden. Auf ihrer Webseite stellt die HP Development Company drei geschäftliche Anwendungsbereiche vor, welche sie mit ihrer eigenen VR-Lösung abdecken möchten [6]. Angedacht sind Sicherheitsschulungen, die virtuell ohne Risiken durchgeführt werden können, das Entwerfen von neuen Produkten, sowie Anwendungen im Gesundheitswesen. Etwas konkreter waren Microsoft und Cirque du Soleil, als sie 2017 ankündigten zusammenzuarbeiten, um die Entwicklung von neuen Bühnenbildern zu vereinfachen (siehe Abbildung 2) [7]. Bühnendesigner sollen mithilfe von Microsofts HoloLens, einer AR-Brille, neue Konzepte digital ausprobieren können, bevor sie gebaut werden.

Mit der steigenden Relevanz von immersiven 3D-Welten werden auch laufend neue Bedienkonzepte entwickelt, welche für die virtuelle Umgebung angepasst sind und sich besser eignen als in 2D etablierte Standards. Insbesondere bei der Eingabe von Text hat sich gezeigt, dass sich eine gewöhnliche Desktop-Tastatur nicht für den Einsatz in virtuellen Umgebungen eignet. Nutzer und Nutzerinnen von AR- und VR-Anwendungen sitzen nur selten an einem Schreibtisch. Und selbst wenn verhindert das Tragen des Headsets die Sicht auf die Tastatur, was die Lokalisierung von Tasten, respektive der ganzen Tastatur, erschwert. Dieser Umstand führt dazu, dass die Texteingabe in den meisten Anwendungen, sowohl in Spielen wie auch in professioneller Software, vermieden wird. Manchmal lässt sich die Texteingabe jedoch nicht umgehen. Zum Beispiel wenn ein Suchbegriff, ein Dateiname oder ein Kennwort eingegeben werden soll. Gerade mit dem Aufkommen von stand-alone Headsets, also VR-Headsets, die keinen separaten Computer mehr benötigen, wird es immer wichtiger, Text eingeben zu können, da zur Einrichtung und Verwaltung des Systems nicht mehr auf einen Bildschirm und eine Schreibtischtastatur zurückgegriffen werden kann. Als Ersatz haben die

Softwarehersteller virtuelle Tastaturen im QWERTZ-Layout entwickelt, welche mithilfe eines Laserstrahls bedient werden können. Diese Art von Tastatur wird im Folgenden als Laserpointer-Tastatur bezeichnet. Trotz der gerade in VR grossen Verbreitung dieser Eingabeart ist die Bedienung langsam und ungewohnt. Hinzu kommt, dass viele der bislang eingesetzten Tastaturen nur über einen Teil der Sonderzeichen, welche auf einer normalen QWERTZ- oder QWERTY-Tastatur zu finden sind, verfügen. Dies macht die Tastaturen je nach Art des einzugebenden Texts unbrauchbar.



Abbildung 2: Gemeinsame Präsentation von Microsoft und Cirque du Soleil an der Build-Konferenz 2017. Beide Firmen geben bekannt, dass sie zusammenarbeiten, um mithilfe der HoloLens die Bühnengestaltung zu vereinfachen [8].

Diese Arbeit hatte zum Ziel, Erkenntnisse über weitere mögliche Ansätze zu sammeln und dadurch die Texteingabe in VR zu vereinfachen. Dazu sollte ein Kriterienkatalog für den Vergleich von bestehenden und neuen Texteingabemöglichkeiten verfasst, Unterschiedliche Prototypen neuer Texteingabemethoden erstellt und diese anhand des Kriterienkatalogs evaluiert werden. Die zu erarbeitende Methode sollte die zur Verfügung stehende Hardware besser nutzen und die Geschwindigkeitslücke zu herkömmlichen, physischen Tastaturen weiter schliessen. Das Eingeben von Text sollte in der virtuellen Umgebung einfach und ohne grossen Lernaufwand möglich sein.

2 Stand der Forschung

Es wurden bereits verschiedenste Lösungsansätze untersucht, um die Eingabe von Text in immersiven virtuellen Realitäten (VR) und Augmentierten Realitäten (AR) zu verbessern. Dabei gibt es signifikante Unterschiede in der erzielbaren Leistung, gemessen in Wörtern pro Minute (WPM), der Fehlerrate, dem dafür notwendigen Lernaufwand und der Anforderung in Bezug auf zusätzliche Hardware.

Die zurzeit am meisten verbreitete Eingabemethode für Text stellt eine Standard-QWERTZ- oder QWERTY-Tastatur dar. Werden solche Tastaturen in VR-Anwendungen verwendet, ergeben sich Probleme aus dem Umstand, dass Anwender oder Anwenderinnen die Tastatur nicht sehen können. Beherrscht die Anwenderin oder der Anwender das blinde Tastaturschreiben, das heisst, sie oder er findet die gewünschten Tasten, ohne auf die Tastatur schauen zu müssen, werden auch in VR ähnliche Leistungen wie in Verbindung mit einem normalen Monitor erzielt, wie eine Nutzerstudie gezeigt hat [9]. Allerdings ist festgestellt worden, dass die Fehlerrate üblicherweise höher und die Tippgeschwindigkeit tiefer ist, wenn ein Head Mounted Display getragen wird. Die Probleme treten dann auf, wenn die Tastatur nach dem Ausführen einer anderen Tätigkeit in der virtuellen Realität oder eine nicht häufig verwendete Taste lokalisiert werden muss. Die Autoren konnten sowohl die Geschwindigkeit als auch die Fehlerrate verbessern, indem sie das virtuelle Bild mit einem Echtzeit-Video-Bild der Tastatur und ihrer Hände überlagerten. Ein anderer Ansatz setzt auf die Visualisierung der gedrückten Tasten auf einem virtuellen Keyboard und automatisierter Fehlerkorrektur der Eingabe [10]. Diese Untersuchung hat gezeigt, dass die virtuelle Anzeige zu einer deutlich geringeren Fehlerrate und einer leicht besseren Eingaberate führen kann. Die anschliessende maschinelle Fehlerkorrektur verbessert die Fehlerrate nochmals erheblich.

Aufgrund ihrer Grösse eignen sich Desktop-Tastaturen allerdings hauptsächlich für den Gebrauch am Schreibtisch. Für mobilere Einsatzgebiete, zum Beispiel zur Steuerung eines Fernsehers oder zur Anwendung in einem virtuellen Umfeld, in welchem sich die Nutzerinnen und Nutzer frei bewegen können, wird hingegen meist nach Eingabegeräten mit kleinerem Profil gesucht. Dies kann durch die Reduktion der Anzahl Tasten erreicht werden. Sogenannte Chording-Tastaturen, wie beispielsweise Twiddler (siehe Abbildung 3) [11], erlauben die Eingabe von Text, indem mehrere Tasten gleichzeitig gedrückt werden, um ein einzelnes Zeichen zu wählen. Eine von den Autoren durchgeführte Studie zeigt, dass Anwender und Anwenderinnen von Twiddler nach einer Trainingszeit von rund sechseinhalb Stunden eine durchschnittliche Eingaberate von 19.8 Wörtern pro Minute erreichen. Eine Metaanalyse von Arif und Stuerzlinger [12] hat ebenfalls die Eingabegeschwindigkeit von Twiddler untersucht und ist zu einem durchschnittlichen Resultat von 31.75 WPM gelangt. Verglichen mit einer herkömmlichen QWERTY-Tastatur, für welche in derselben Metaanalyse eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 75.85 WPM erhoben worden ist, ist die Eingabe mit Twiddler aber immer noch bedeutend langsamer. Ausserdem zeigt die Untersuchung von Twiddler, dass die Methode einen hohen Lernaufwand und damit eine längere Einstiegsphase benötigt [11].



Abbildung 3: Twiddler 3, die neueste Version der Chording-Tastatur [13].

Statt Tasten haben Sridhar et al. für ihren Prototypen Fingergesten eingesetzt, welche von einem Sensor erfasst werden [14]. Durch das Anwinkeln oder Ausstrecken von einzelnen Fingern können verschiedene Gesten gebildet werden. Die von den Autoren durchgeführte Nutzerstudie hat einen durchschnittlichen Wert von 22.25 WPM aufgezeigt. Diese Geschwindigkeit ist nochmals etwas langsamer als diejenige von Twiddler und damit noch weiter von der Geschwindigkeit der Schreibtisch Tastaturen entfernt. Ausserdem haben die Autoren eingeräumt, dass der Lernaufwand für die verschiedenen Gesten eine erhebliche Hürde für die grossflächige Verbreitung einer solchen Methode darstellt.

Andere Ansätze versuchen, das QWERTY-Layout auf neue Eingabegeräte zu übertragen. Das Pinch-Keyboard besteht aus einem Paar Handschuhe, welches die Berührung zwischen Daumen und anderen Fingern registriert [15]. Das Berühren von Daumen und einem anderen Finger ist gleichbedeutend mit einem Tastenanschlag mit eben jenem Finger auf einem Standard-Keyboard. Ein Tiefensensor überwacht zudem die Position der Hände, damit der Anwender oder die Anwenderin zwischen den Tastenreihen wechseln kann. Die Untersuchung hat jedoch gezeigt, dass zumindest die anfänglichen Schreibgeschwindigkeiten mit durchschnittlich 12 bis 15 Wörtern pro Minute eher tief sind. Ausserdem wird auch für diese Eingabemethode spezielle Hardware benötigt. Im Jahr 2005, und somit vier Jahre später, veröffentlichten Kuester et al. eine Arbeit, in welcher sie ihren Ansatz namens «KITTY» vorstellten [16]. KITTY, zu sehen in Abbildung 4, weist grosse Ähnlichkeiten zum Pinch-Keyboard auf. Auch hier trägt die Benutzerin oder der Benutzer einen Handschuh, der feststellt, wenn sich zwei Finger berühren. Allerdings verzichtet diese Methode auf den Einsatz eines Tiefensensors. Stattdessen gibt es pro Finger mehrere Stellen, an welchen eine Berührung mit einem anderen Finger festgestellt werden kann, wodurch sich mehr Kombinationen ergeben. In einer Nutzerstudie mit Anfängerinnen und Anfängern in dieser Art der Texteingabe lag die durchschnittlich erzielte Geschwindigkeit bei 13 Tastenanschlägen pro Minute. Da pro Zeichen immer genau ein Tastenanschlag benötigt wird, kann diese Metrik in Wörter pro Minute umgerechnet werden, indem durch eine Standard-Wortlänge von fünf Zeichen geteilt wird (Details siehe Kapitel 5.1). Dies ergibt einen Wert von 2.6 WPM. Eine nochmals andere Variante dieses Ansatzes stellt DigiTap [17] dar, was anstelle der Handschuhe auf ein Armband setzt, welches die Position der Finger ermitteln kann. Zwar wurde diese Methode nicht einer formellen Nutzerstudie unterzogen, aber die Autoren geben an, nach einigen Stunden Training etwa zehn Wörter pro Minute erreicht zu haben. Damit scheinen weder KITTY noch DigiTap vielversprechender zu sein als das Pinch-Keyboard, was die Tipp- oder die Lern-Geschwindigkeit angeht.

McCaul und Sutherland haben eine Variante vorgeschlagen, wo ebenfalls ein Datenhandschuh getragen wird [18]. Jedem Finger werden mehrere Buchstaben zugewiesen. Um einen Text einzugeben, werden nacheinander die zu den Buchstaben gehörenden Finger angewinkelt. Ein Algorithmus ermittelt daraufhin alle Wörter, welche von diesen Fingern hätten eingegeben werden können und zeigt die wahrscheinlichsten dem Nutzer zur Auswahl an. Die Vorschläge können jeweils laufend und nicht erst nach der Eingabe des ganzen Wortes ausgewählt werden. Die Arbeit erwähnt einen kleinen, informellen Test, welcher eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 9 WPM für Personen ohne Training und 17 WPM nach einer zwölfminütigen Übungsphase ergeben hat. ATK [19], von Yi et al. entwickelt, ermittelt ebenfalls die Fingerpositionen, aber anstatt dass der Anwender oder die Anwenderin zwei Finger aneinander pressen oder anwinkeln muss, kann er oder sie auf einer imaginären Computer-Tastatur in der Luft schreiben. Mithilfe eines Fehlermodells werden Fehler bei der Erkennung des momentan tippenden Fingers korrigiert. In einer Studie wurden bei erstmaliger Verwendung durchschnittlich 23 WPM, und im vierten und letzten Test-Block 29.2 WPM gemessen.

Die von Lu et al. entworfene Methode Blind Type [20] setzt auf ein Touchpad zur Eingabe. Die Nutzerin oder der Nutzer tippt mit seinem Daumen auf eine Stelle des Touchpads, welche mit einer Taste auf einer virtuellen QWERTY-Tastatur korrespondiert. Das Ziel war es, die richtige Position auf dem Touchpad nur aufgrund des motorischen Gedächtnisses des Daumens zu treffen, ohne dabei hinsehen zu müssen. Eine Nutzerstudie ermittelte eine Geschwindigkeit von 17-23 Wörtern pro Minute.



Abbildung 4: Der Datenhandschuh von Kitty mit mehreren Kontaktstellen an jedem Finger [16].

Auch das Headset von VR-Systemen selbst wurde schon für die Eingabe verwendet. Yu et al. [21] haben hierzu drei Methoden entworfen und untersucht. Alle drei Ansätze verwenden eine Repräsentation einer Tastatur, die vor dem Benutzer schwebt, und einen Cursor, welchen der Benutzer oder die Benutzerin mithilfe von Kopfbewegungen über die Tastatur bewegen kann. Bei TapType bewegt die Anwenderin oder der Anwender den Cursor auf den Buchstaben, den er eingeben möchte, und bestätigt mit einem Button seine Auswahl. DwellType verzichtet auf den Button und erfordert stattdessen, den Cursor eine gewisse Zeit auf einem Zeichen verweilen zu lassen. Die dritte Methode, GestureType, eignet sich lediglich zur Eingabe von Wörtern, die im Wörterbuch gefunden werden können. Sie ist dem Prinzip der Word-level Gesture Keyboards nachempfunden, welche auch auf Smartphones eingesetzt werden. Der Anwender oder die Anwenderin positioniert den Cursor mithilfe von Kopfbewegungen auf den ersten Buchstaben des Wortes, drückt und hält eine Taste auf dem Controller und bewegt anschliessend den Cursor über alle Buchstaben des Wortes. Ein Algorithmus ermittelt dann, welche Wörter auf die Eingabe zutreffen können und wählt das wahrscheinlichste aus. Die Nutzerstudie zu GestureType hat eine durchschnittliche Eingabegeschwindigkeit von 24.37 Wörtern pro Minute nach acht Sitzungen ergeben.

Gewisse Eingabemethoden verzichten komplett die Verwendung des des QWERTY-Layouts. Eine dieser Methoden stammt von Yu et al. und heisst PizzaText [22], welche zwei Analogsticks und einen

Button und damit Hardware nutzt, die in vielen Privathaushalten bereits vorhanden ist. Das Alphabet wird bei dieser Eingabemethode in Vierergruppen aufgeteilt, die wiederum einem der sieben Sektoren eines Kreises zugeteilt werden. Die Nutzerin oder der Nutzer wählt zuerst mit dem ersten Analogstick einen der Sektoren und danach mit dem zweiten einen der darin befindlichen Buchstaben (siehe Abbildung 5). Die in einer Nutzerstudie erzielte Eingabegeschwindigkeit liegt bei einem Durchschnittswert von 12.26 Wörtern pro Minute. Es hat sich gezeigt, dass die Geschwindigkeit der Teilnehmenden bereits nach drei bis fünf Sitzungen begonnen hat, sich einzupendeln, was auf eine schnelle Erlernbarkeit der Methode schliessen lässt. Die von den Autoren vorgestellte Lösung beinhaltet jedoch nur Grossbuchstaben und Möglichkeiten für die Eingabe von Kleinbuchstaben und Sonderzeichen werden lediglich im Ausblick des Berichts erwähnt.

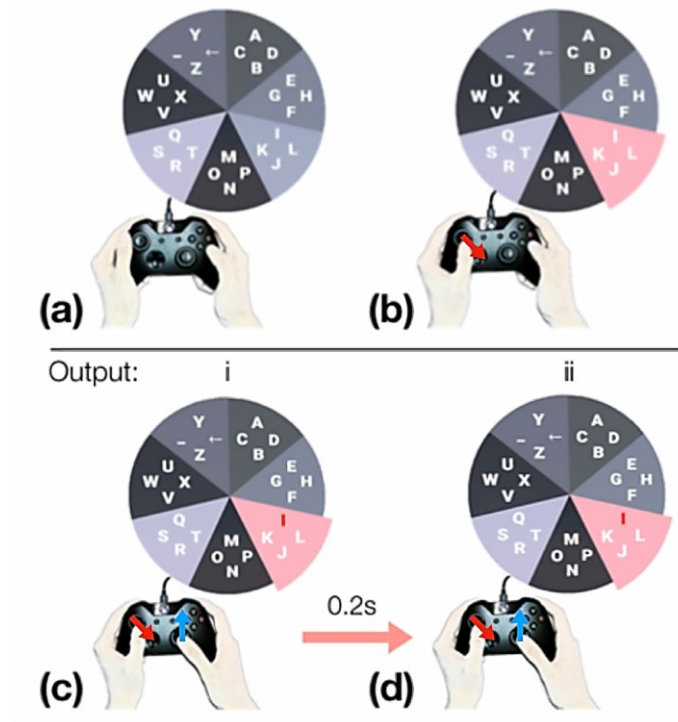


Abbildung 5: Bei der Eingabemethode «PizzaText» wählt der Anwender erst mit einem der beiden Analogsticks einen Sektor (b) und dann mit dem anderen ein darin befindliches Zeichen aus (c). Durch Verweilen auf demselben Zeichen kann dieses erneut eingegeben werden (d) [22].

Es gibt auch zahlreiche Ansätze, die überhaupt keine Tastatur einsetzen und stattdessen Methoden aus der analogen Kommunikation nutzen. Bereits 1998 haben Poupyrev, Tomokazu und Weghorst [23] einen Ansatz namens «Virtual Notepad» vorgestellt, um in einer virtuellen Umgebung mithilfe eines berührungsempfindlichen Tablets und einem Stift handschriftliche Notizen machen zu können. Die Positionen und Rotationen des Tablets und des Stifts werden dabei von einem Sensor überwacht und auf die virtuelle Repräsentation übertragen. Allerdings ist die Lösung für das handschriftliche Annotieren von virtuellen Seiten gedacht und unterstützt keine Texterkennung der Notizen. Lediglich gewisse Gesten werden erkannt, um zwischen Seiten des virtuellen Notizblocks zu wechseln und Eingaben zu korrigieren. Aber auch die Eingabe mithilfe von Handschrifterkennung in VR-Umgebungen wurde bereits untersucht. Connect the Dots [24] vereinfacht die Erkennung der Eingabe, indem dem Anwender neun in einem drei mal drei Raster angeordnete Punkte zur Verfügung gestellt werden, welche er mithilfe eines Stiftes zu einem Symbol verbinden kann. Die Symbole sind jeweils eine Repräsentation der zugehörigen Buchstaben und Zahlen. Die Autoren haben zwar keine formelle Nutzerstudie durchgeführt, jedoch haben sie ihre Methode mit einer virtuellen Tastatur verglichen. Obwohl die Testpersonen mit der virtuellen Tastatur schneller gewesen sind, als mit Connect the Dots, argumentieren die Erfinder, dass ihre Methode auch Vorteile bietet, was die Grösse der Eingabefläche und die Anzahl der damit abdeckbaren Zeichen betrifft.

Auch Spracheingabe wurde in Zusammenhang mit virtuellen Realitäten untersucht. Sowohl SpeeG2 [25] als auch SWIFTER [26] setzen auf eine sprachbasierte Texteingabe, die durch Gesten zu Fehlerkorrektur unterstützt wird. Beide Varianten zeigen mit 21.04 Wörtern pro Minute für SpeeG2, respektive 23.6 Wörter pro Minute für SWIFTER eine relativ hohe Geschwindigkeit auf. In den Studien zu beiden Ansätzen werden nur Sätze aus dem normalen Sprachgebrauch verwendet. Zufällige Zeichenfolgen, wie sie beispielsweise bei Kennwörtern auftreten, oder Wörter, die nicht im Wörterbuch der jeweiligen Zielsprache vorkommen, wurden gänzlich ausser Acht gelassen.

Wie sich gezeigt hat, wurde bereits in viele unterschiedliche Richtungen geforscht, um das Problem der einfachen und schnellen Eingabe von Text in VR zu lösen. Dennoch besteht nach wie vor ein grosses Potential, wenn man die in der realen Welt mit einer Schreibtischtastatur erzielbaren Geschwindigkeiten betrachtet. Auch die steile Lernkurve einiger der Methoden und die Tatsache, dass teilweise zusätzliche Hardware benötigt wird, zeigen, dass es sich lohnt, weiterzuforschen.

3 Ideen und Konzepte

3.1 Anwendungsfall

In dieser Arbeit wurde nach einer Eingabemethode mit einem möglichst grossen praktischen Nutzen gesucht. Die Texteingabe wird in VR für die Erfassung von Notizen in produktiven Applikationen, beispielsweise, um eine Architekturzeichnung zu kommentieren, oder für die Eingabe von Kennwörtern der Nutzeraccounts und WLAN-Zugängen benötigt. Aus diesem Grund ist es für die Relevanz einer Methode wichtig, dass sie nicht nur alle Gross- und Kleinbuchstaben, sondern auch die am häufigsten verwendeten Sonderzeichen unterstützt. Des Weiteren sollte die Eingabemethode ohne grossen Lernaufwand verwendbar sein, weil Texteingaben in VR selten vorkommen. Um die Praktikabilität der Methode hoch zu halten, wurde eine Lösung für bestehende Hardware gesucht. Zwei der am weitesten verbreiteten Head Mounted Displays sind die Oculus Rift und die HTC Vive. Beide Systeme sind PC-gebunden und erlauben so, im Gegensatz zu Sonys Playstation VR, einen Einsatz sowohl zu Unterhaltungs- als auch zu professionellen Zwecken. Bei der Ausarbeitung der Lösungsvorschläge wurde darauf geachtet, dass sie alleinig mit der standardmässig mitgelieferten Hardware einer der beiden Systeme verwendet werden können und keine zusätzlichen Geräte angeschafft werden müssen.

3.2 Vorgehen

Als Ausgangspunkt für die Lösungsfindung wurden die bestehenden Arbeiten zu diesem Thema, welche in Kapitel 2 beschrieben sind, verwendet. Tabelle 1 (S. 10) zeigt eine Zusammenfassung der Methoden. In der ersten Spalte ist jeweils der Name der Methode, oder falls kein Name vorhanden ist, die Autoren und das Jahr, in welchem die Ergebnisse publiziert wurden, aufgeführt. In der zweiten Spalte stehen die in Nutzerstudien ermittelten Tippgeschwindigkeiten. Werte, welche durch einen Bindestrich getrennt sind, stehen für Messungen vor und nach einer bestimmten Trainingsphase. Die letzte Spalte gibt an, ob die jeweilige Methode entweder auf die HTC Vive oder die Oculus Rift übertragbar wäre, ohne zusätzliche Hardware zu verwenden. Wie man sieht, fallen die meisten Ansätze weg, weil sie auf spezialisierte Hardware setzen. Für zwei der verbleibenden drei Methoden, GestureType und PizzaText, wurde je ein Vorschlag für eine Erweiterung ausgearbeitet. BlindType weist zwar eine vielversprechende Geschwindigkeit aus, aber es wurde keine Weiterentwicklungsmöglichkeit in genügendem Umfang für diese Arbeit gefunden. Zudem würde diese Methode nur mit der HTC Vive funktionieren und könnte auch nicht mit Anpassungen auf die Oculus Rift übertragen werden.

3.3 Lösungsidee 1

Die in [21] vorgestellte und untersuchte Eingabemethode namens GestureType schien aufgrund der eher hohen Schreibgeschwindigkeit von ca. 25 Wörtern pro Minute und der Tatsache, dass die Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Studie angegeben haben, die Methode sei einfach zu erlernen und der Ermüdungseffekt halte sich in Grenzen, sehr vielversprechend zu sein. Gerade für bekannte Wörter zeigte der Algorithmus zur Erkennung des einzugebenden Wortes gute Ergebnisse. Allerdings kann dieser Ansatz nicht auf zufällige oder nicht bekannte Zeichenfolgen angewendet werden. Zu diesem Zweck sollte mit dem ersten Prototyp untersucht werden, ob eine alternative Eingabemethode für «GestureType» angeboten werden kann, welche speziell für die Eingabe beliebiger Zeichenfolgen ausgelegt ist. Der Anwender oder die Anwenderin soll dabei den Cursor von Zeichen zu Zeichen steuern und auf den gewünschten Zeichen für einen kurzen Moment ruhen. Daraufhin werden ihm oder ihr, wie bei der on Screen Tastatur moderner Samsung Fernseher [27, p. 34], die wahrscheinlichsten, nächsten Buchstaben angezeigt (siehe Abbildung 6). Diese Vorschläge kann er oder sie gleich wie alle anderen Zeichen auswählen. Möchte man hingegen ein anderes Zeichen von der vollen Tastatur wählen, respektive das letzte Zeichen ein zweites Mal eingeben, so wählt man das leere Feld (in der Abbildung rechts neben dem «C»).



Abbildung 6: Kombination von GestureType und einer Vorhersage für das nächste Zeichen (Skizze).

3.4 Lösungsidee 2

Die PizzaText-Methode hat sich ebenfalls als leicht erlernbar erwiesen [22]. Mithilfe eines Prototyps soll geklärt werden, welchen Einfluss die Erweiterung um Gross- und Kleinschreibung, sowie Zahlen und Sonderzeichen, auf die Eingabegeschwindigkeit und Präzision haben. Ausserdem soll abgeklärt werden, ob sich die Eingabemethode problemlos vom Xbox Controller auf den HTC Vive Controller übertragen lässt. Zudem ist angedacht, eine Zeichenvorhersage einzubauen, welche den Benutzerinnen und Benutzern Vorschläge für das nächste Zeichen anzeigt.

3.5 Auswahl

Ursprünglich war vorgesehen, beide Lösungsvarianten zu verfolgen. Allerdings wurde bei genauerer Betrachtung der ersten Lösungsidee schnell klar, dass eine Zeichenvorhersage für unbekannte Zeichenfolgen keinen wirklichen Nutzen bringen würde, eben weil diese ja unbekannt sind. Würde man hingegen bei diesem Vorschlag die Zeichenvorhersage weglassen, wäre man bei einem Ansatz angelangt, der identisch mit der von Yu et al. entworfenen Dwell-Methode gewesen wäre [21]. Die PizzaText-Methode schien hingegen weitaus mehr Potential für Erweiterungen zu haben. Zum einen wegen der geringen Zeichenanzahl, die bisher unterstützt wurde, und zum anderen, weil erwartet wurde, dass die Adaption der Eingabe für die Touchpads des HTC Vive Controllers neue Möglichkeiten schaffen würde. Aus diesen Gründen wurde entschieden, nur den PizzaText-Ansatz weiter zu verfolgen und dafür mehrere Eingabevarianten zu entwerfen. Und wegen des vermuteten Potentials wurde die HTC Vive als Hardware-Plattform gewählt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der in vorherigen Arbeiten untersuchten Texteingabemethoden.

Methode	WPM	Zusätzliche HW benötigt
GestureType	19.04-24.73 [21]	Nein
BlindType	17-23 [20]	Nein (Vive)
PizzaText	8.59-15.85 [22]	Nein
Ten-finger Touch Typing in Air	29.2 [19]	Ja
ATK	23-29.2 [19]	Ja
Sridhar et al., 2015	22.25 [14]	Ja
Multi-finger Gestures	22 [14]	Ja
SpeeG2	21.04 [25]	Ja
SWIFTER	21-23.6 [26]	Ja
Twiddler	19.8-31.75 [11]	Ja
VISAR	17.75 [28]	Ja
Pinch Keyboard	12-15 [15]	Ja
McCaul und Sutherland, 2004	9-17 [18]	Ja
KITTY	2.6 (13 KSPM [16])	Ja
Virtual Notepad	-	Ja
Connect the Dots	-	Ja

4 Methodik und Übersicht

Als erstes wurde der Kriterienkatalog für die Bewertung von VR-Eingabemethoden ausgearbeitet. Dazu wurden sämtliche während der Recherchearbeit gelesenen Arbeiten, welche eine Texteingabemethode untersuchen, analysiert und die verwendeten Messkriterien zusammengetragen. Anschliessend wurde daraus eine Auswahl für den Katalog getroffen.

Aufbauend auf der in Kapitel 3.5 gewählten Lösungsvariante wurde als nächstes ein erstes Design für eine VR-Tastatur entworfen. Dazu wurden insgesamt vier Bedienarten ausgearbeitet und als Prototypen entwickelt. Weil die Prototypen lediglich für die Nutzertests und die Studie erstellt wurden und weil nicht angedacht war, dass sie darüber hinaus noch verwendet werden sollen, wurde auf eine Dokumentation und das Testen des Codes verzichtet. Jedoch wurde auf eine einigermaßen hohe Anpassbarkeit geachtet, um schnell und einfach Änderungen an den Prototypen vornehmen zu können.

In einem anschliessenden Nutzertest wurden die vier Varianten miteinander verglichen. Dabei kam es rein auf die subjektive Einschätzung der Teilnehmer an. Auf das Sammeln von quantitativen Messdaten wurde zu diesem Zeitpunkt bewusst verzichtet. Einerseits wegen der geringen Aussagekraft aufgrund der niedrigen Teilnehmerzahl, andererseits um die Flexibilität beizubehalten, während den Tests Änderungen im Ablauf vornehmen zu können, um so den Fokus spontan auf relevante Bereiche zu legen, wenn die geplante Zeit nicht ausreichen würde.

Die gesammelten Eindrücke wurden dann verwendet, um zwei weitere, verbesserte Varianten auszuarbeiten. Gleichzeitig wurde die Möglichkeit untersucht, dem Anwender oder der Anwenderin nach jeder Eingabe eine Auswahl möglicher Folgebuchstaben vorzuschlagen, um die Anzahl der benötigten Interaktionen pro Wort zu reduzieren und somit die Schreibgeschwindigkeit zu erhöhen. In einem zweiten Nutzertest wurden die zwei neuen Varianten sowie die Zeichenvorhersage getestet. Auch hier wurden aus denselben Gründen wie beim ersten Nutzertest lediglich qualitative Aussagen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer erhoben.

Schlussendlich wurde ein finaler Prototyp erstellt und in einer umfangreicheren Nutzerstudie mit der im VR-Umfeld am weitesten verbreiteten Tastatur verglichen. Im Gegensatz zu den beiden Nutzertests lag der Fokus der Studie auf quantitativen Ergebnissen, erfasst sowohl durch objektive Messungen als auch durch subjektive Bewertungen, die mithilfe eines standardisierten Fragebogens eingeholt wurden. Bei der Auswertung der Resultate wurde ein t-Test eingesetzt, um die Signifikanz der gemessenen Unterschiede abzuklären. Weil die Teilnehmer jeweils beide Methoden testeten, wurde ein gepaarter t-Test gewählt. Zudem wurde der Test in der zweiseitigen Variante durchgeführt, da sowohl bessere als auch schlechtere Ergebnisse ermittelt werden sollten. Sofern die durch den Test ermittelte Wahrscheinlichkeit einer Übereinstimmung der beiden Stichprobenmengen bei 5% oder darunter lag, wurde der Unterschied als signifikant angesehen.

Das genaue Vorgehen zur Erarbeitung des Kriterienkatalogs ist in den Kapiteln 5.1 bis 5.3 (S. 12 ff.) beschrieben. Der erstellte Kriterienkatalog befindet sich in Anhang A. Kapitel 5.4 (S. 15 f.) enthält Angaben zur verwendeten Hard- und Software. In den Kapiteln 5.5 bis 5.8 (S. 16 ff.) finden sich alle Details zur iterativen Entwicklung der Prototypen und den Nutzertests. Das Vorgehen bei der Nutzerstudie wird in Kapitel 5.9 (S. 26 ff.) genauer erläutert. Die Resultate sind in Kapitel 6 (S. 29 ff.) dargelegt und werden in Kapitel 7 (S. 32) diskutiert. Zuletzt folgt noch ein Ausblick in Kapitel 8 (S. 33).

5 Realisierung

5.1 Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Eingabemethoden

In wissenschaftlichen Arbeiten zu Texteingaben werden unterschiedliche Methoden verwendet, um die Leistungsfähigkeit von Eingabemethoden zu bestimmen. Dabei kann man grundsätzlich zwischen quantitativen und qualitativen Ansätzen unterscheiden. Um für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Nutzerstudie die geeignetsten Methoden auszuwählen, wurden alle wissenschaftlichen Texte, welche im Zuge der Recherche entdeckt und für diesen Text verwendet worden waren, auf ihre Methodik hin analysiert. Dies half, trotz fehlender Kenntnisse Metriken zu wählen, welche zum einen aussagekräftig und zum anderen möglichst gut mit anderen Studien vergleichbar sind. Insgesamt wurden 23 bestehende Arbeiten untersucht. Drei davon verwendeten weder eine quantitative Messung noch eine standardisierte Methode zur Erhebung qualitativer Werte. Somit blieben noch 20 Arbeiten für die Analyse.

Die meisten Nutzerstudien, welche die Leistungsfähigkeit der untersuchten Eingabemethode quantitativ auswerteten, massen die Anzahl der Wörter, welche im Schnitt pro Minute eingegeben werden können. Dieses Mass wird im Englischen «Words per Minute» (WPM) genannt. Damit Messungen mit unterschiedlich langen Sätzen und Wörtern gemacht werden können, wird die Wortlänge, inklusive Sonderzeichen und Leerschlägen, auf fünf Zeichen gemittelt. Es gibt jedoch zwei leicht unterschiedliche Berechnungen. Eine der beiden Formen sieht wie folgt aus:

$$WPM = \frac{|T|}{s} \times 60 \times \frac{1}{5}$$

Dabei steht $|T|$ für die Länge des eingegebenen Textes und s für die Dauer zwischen der Eingabe des ersten und des letzten Zeichens in Sekunden. Der Faktor 60 dient zur Umrechnung in Wörter pro Minute statt Sekunde und der Bruch $\frac{1}{5}$ zur Mittelung aller Wörter auf fünf Zeichen. Die oben gezeigte Form wurde insgesamt in sechs der untersuchten Studien verwendet [10, 21, 22, 25, 26, 29]. Da allerdings die Zeit, welche der Anwender benötigt, um das erste Zeichen einzugeben, nicht in die Messung mit einfließt, wird in manchen Fällen von der Länge des eingegebenen Textes eins abgezogen:

$$WPM = \frac{|T| - 1}{s} \times 60 \times \frac{1}{5}$$

Diese Variante wurde in zwei der untersuchten Arbeiten verwendet [28, 30]. Die meisten Arbeiten [9, 11, 14, 15, 18, 20, 31, 32, 33] wiesen jedoch nicht genau aus, welche Methode sie für die Berechnung verwendet hatten.

Zwei der untersuchten Studien [24, 34] massen statt der Wörter die Anzahl der Zeichen pro Minute (Characters per Minute, CPM), resp. pro Sekunde:

$$CPM = \frac{|T|}{s} \times 60$$

$|T|$ stellt dabei wiederum die Länge des eingegebenen Textes und s die Dauer zwischen der Eingabe des ersten und des letzten Zeichens in Sekunden dar. Dieses Mass kann in die erste Variante von WPM umgerechnet werden, indem durch fünf geteilt wird.

Eine weitere Arbeit nutzte die Metrik «Keystrokes per Minute» (auf Deutsch «Tastenanschläge pro Minute») [16]. Weil je nach Eingabemethode und eingegebenem Zeichen unterschiedlich viele Tastenanschläge benötigt werden, ist dieses Mass nicht mit den vorherigen (WPM und CPM) kompatibel.

Gewisse Untersuchungen setzten zusätzlich auch auf eine qualitative Bewertung. Dabei verwendeten einige Autorinnen und Autoren einen eigens erstellten Fragebogen, manche setzten aber auch standardisierte Umfragen ein, welche die Antworten quantifizierbar machen. Am häufigsten wurde der NASA Task Load Index (NASA-TLX) [35] eingesetzt. Die Testpersonen geben dabei mithilfe sechs

Werteskalen mit je 21 Abstufungen an, wie anstrengend die verrichtete Arbeit war. Von den untersuchten Studien haben fünf den NASA-TLX verwendet [9, 20, 22, 30, 31].

Das User Experience Questionnaire (UEQ) [36] verzichtet indes auf eine Auswertung der Anstrengung und untersucht stattdessen die Effizienz, die Verständlichkeit, die Verlässlichkeit, die Stimulationswirkung und die Neuartigkeit. Zu jeder der fünf Kategorien gibt es je vier Werteskalen mit sieben Abstufungen, welche die Teilnehmer und Teilnehmerinnen ausfüllen. Dieser Ansatz kam in zwei der untersuchten Studien vor [26, 30].

Die System Usability Scale [37] ist eine weitere Variante eines Fragebogens zur Bestimmung der Bedienbarkeit und wird von [26] und [28] verwendet.

Gewisse Arbeiten setzten auch auf VR-spezifische Fragebögen. [30] setzte den Slater-Usch Steel Questionnaire (SUS) ein, jedoch fehlen hierzu Quellenangaben. Zudem verwendete [30] den Motion Sickness Assessment Questionnaire (MSAQ) [38], welcher Fragen zur Motion Sickness (zu Deutsch etwa «Bewegungskrankheit») enthält.

5.2 Messung der Falscheingaben

Bei den Metriken zur Bestimmung der Fehlerraten ist die Diversität wesentlich grösser als bei der Leistungsfähigkeit (siehe Kapitel 5.1). Der einfachste Ansatz wurde in [34] verfolgt. Darin wurden alle gemachten Falscheingaben mitgezählt. Die überwiegende Mehrheit der untersuchten Arbeiten setzte jedoch auf relative Metriken, welche dadurch auch vergleichbar mit anderen Forschungsergebnissen sind. In [29] wurde gemäss Beschreibung die Anzahl der getätigten Falscheingaben durch die Textlänge geteilt.

Wie Soukoreff und MacKenzie in einer Publikation beschreiben, kann es jedoch teilweise schwierig sein, eine sinnvolle Fehleranzahl zu ermitteln [39]. Vergleicht man den einzugebenden und den tatsächlich eingegebenen Text zeichenweise, kommt es zu Folgefehlern, wenn zu Beginn der Zeichenkette ein Zeichen ausgelassen wurde. Lautet der erwartete Eingabetext beispielsweise «abcde», aber der Anwender hat «acde» eingetippt, stimmen vier Positionen der beiden Texte nicht mehr überein. Dennoch könnte der eingegebene Text mit nur einer einzigen Einfügeoperation korrigiert werden. Gleiches gilt für fälschlicherweise zu viel eingegebene Zeichen. Gibt ein Anwender statt «abcde» «abxcde» ein, ergibt ein paarweiser Vergleich der Zeichen in beiden Zeichenketten wiederum eine Fehlerzahl von vier Zeichen, obwohl eine einzige Löschoption die Eingabe korrigieren würde. Aus diesem Grund haben MacKenzie und Sokoreff 2002 eine neue Metrik vorgeschlagen, welche mit der Minimum String Distance (MSD) arbeitet [39]:

$$\frac{100 \times MSD(P, T)}{\max(|P|, |T|)}$$

$|P|$ Steht dabei für die Länge des präsentierten (presented) und $|T|$ für die Länge des tatsächlich eingegebenen (transcribed) Textes. MSD ist die Funktion zur Feststellung der Minimum String Distance, auch als minimale Levenshtein-Distanz bekannt, welche angibt, wie viele Zeichen im Minimum eingefügt, gelöscht oder ausgetauscht werden müssen, um P zu T umzuformen. Zwei der untersuchten Arbeiten verwendeten diesen Ansatz in ihren Auswertungen [30, 33]. In vier weiteren Dokumenten kommt eine leicht abgewandelte Version der Metrik vor [10, 25, 28, 31]:

$$\frac{100 \times MSD(P, T)}{|P|}$$

Anstatt im Divisor die Länge des präsentierten und des eingegebenen Textes zu berücksichtigen, wird bei dieser Variante nur die des präsentierten Textes verwendet. Vergleicht man die beiden Berechnungsvarianten, stellt man fest, dass bei der zweiten Variante fehlende und zuviel eingegebene Zeichen unterschiedlich bewertet werden. Wie man von Tabelle 2 ablesen kann, ergibt die Metrik eine Fehlerrate von 400%, wenn statt «a» «abcde» eingegeben, aber nur 80%, wenn statt «abcde» «a» getippt wird. Werden im Divisor P und T berücksichtigt, ist der Fehler in beiden Fällen konsistent bei 80%.

Tabelle 2: Vergleich der Varianten der MSD-Fehlermetrik.

P	T	MSD	$\frac{100\% \times MSD(P,T)}{ P }$	$\frac{100\% \times MSD(P,T)}{\max(P , T)}$
abcde	abcde	0	0%	0
abcde	abcdx	1	20%	20%
abcde	awxyz	4	80%	80%
a	abcde	4	400%	80%
abcde	a	4	80%	80%

Beide Varianten weisen allerdings noch ein anderes Problem auf, wie Soukoreff und MacKenzie 2003 selbst eingeräumt haben [40]. Es werden nämlich nur Fehler berücksichtigt, welche vom Anwender nicht korrigiert worden sind. Um auch korrigierte Fehler in die Auswertung miteinschliessen zu können, haben die beiden Autoren eine neue Metrik, die Total Error Rate, vorgeschlagen:

$$Total\ ER = \frac{INF + IF}{C + INF + IF} \times 100\%$$

INF steht für Incorrect Not Fixed, also die unkorrigierten Fehler, und wird mithilfe der Minimum String Distance (MSD) Funktion berechnet:

$$INF = MSD(P, T)$$

IF steht für Incorrect Fixed, also die korrigierten Fehler. Dieser Wert wird bestimmt, indem die Tastenanschläge, welche für Korrekturen verantwortlich sind, mitgezählt werden. Und schliesslich gibt es noch die Menge der korrekt eingegebenen Zeichen *C*. Diese Anzahl kann wie folgt ermittelt werden:

$$C = \max(|P|, |T|) - MSD(P, T)$$

Nicht nur bezieht die Total Error Rate Metrik sowohl korrigierte als auch nicht korrigierte Fehler mit ein. Aus den verwendeten Werten kann man zudem die Rate der korrigierten (CER) und der nicht korrigierten Fehler (NCER) ableiten:

$$CER = Total\ ER - NCER = \frac{IF}{C + INF + IF} \times 100\%$$

$$NCER = Total\ ER - CER = \frac{INF}{C + INF + IF} \times 100\%$$

Drei der untersuchten Arbeiten verwendeten die hier beschriebene Total Error Rate [9, 11, 22]. In [32] wird ebenfalls eine Total Error Rate erwähnt, aufgrund einer fehlenden Beschreibung und eines fehlenden Verweises kann jedoch nicht mit Bestimmtheit festgestellt werden, ob damit dieselbe Metrik gemeint ist. [26] und [9] verwendeten zudem die oben aufgeführte Not Corrected Error Rate (NCER). [20], [21] und [32] verwendeten ebenfalls eine Uncorrected Error Rate sowie eine Corrected Error Rate, allerdings fehlen auch hier Beschreibungen und Verweise, oder die Verweise passen nicht zum Inhalt des Textes.

In einem Fall war es gänzlich unklar ist, welche Fehler-Metrik verwendet wurde, da die Metrikwerte lediglich mit «Genauigkeit» beschriftet worden waren [16].

5.3 Erarbeitung des Kriterienkatalogs

Die in Kapitel 5.1 und 5.2 erfolgte Analyse diverser Studien hat gezeigt, dass die Metrik Words per Minute (WPM) am weitesten verbreitet und somit auch am nützlichsten ist, wenn die Ergebnisse mit anderen Studien verglichen werden sollen. Die Formel sorgt des Weiteren dafür, dass in den Testsätzen unterschiedlich lange Wörter verwendet werden können, ohne dadurch das Ergebnis zu beeinflussen. Bei den Fehlermetriken scheint die Total Error Rate, respektive deren Bestandteile Corrected Error Rate und Not Corrected Error Rate, am stabilsten und umfangreichsten zu sein. Möglicherweise ist sie nicht die am häufigsten verwendete Metrik, aber aufgrund der grossen Vielzahl an verwendeter Metriken ist ein direkter Vergleich in vielen Fällen sowieso nicht möglich.

Arif und Stuerzlinger [12] haben ebenfalls verschiedene Experimente zu Texteingabemethoden analysiert und sind zu einem identischen Ergebnis gekommen. Auch sie haben bemerkt, dass WPM für die Feststellung der Leistungsfähigkeit am meisten verwendet wird und dass die Total Error Rate die zum Zeitpunkt des Berichts (2009) aussagekräftigste der zurzeit vorhandener Fehlermetriken gewesen ist. Es konnten auch in neueren Arbeiten keine weiteren Fehlermetriken gefunden werden. Aus diesen Gründen wurden für den Kriterienkatalog WPM und Total Error Rate verwendet.

Um auch die subjektiven Eindrücke der Anwender zu erfassen, wurde zudem beschlossen, einen der bereits vorhandenen Fragebögen zu verwenden. Die Verwendung eines geprüften Fragebogens statt eines eigenen sorgt dafür, dass die Umfrageresultate ebenfalls verlässlich und vergleichbar sind. Insgesamt schien das User Experience Questionnaire am vielfältigsten zu sein.

Der ausgearbeitete Kriterienkatalog befindet sich in Anhang A.

5.4 Verwendete Hard- und Software

Für die Entwicklung und das Testen der Prototypen wurde von der Hochschule Luzern ein Set bestehend aus einer HTC Vive Pro sowie zwei HTC Vive Controllern zur Verfügung gestellt. Das Head Mounted Display (HMD) verfügt mit 1440 * 1600 Pixeln pro Auge [41] über eine höhere Auflösung als die herkömmliche HTC Vive und die Oculus Rift. Die Controller und das HMD werden fortlaufend im dreidimensionalen Raum geortet und können so zur Bewegungssteuerung eingesetzt werden. Wie in Abbildung 7 zu sehen, beherbergen die Controller auf der Vorderseite ein rundes Touchpad, welches nicht nur Berührungen, sondern auch Klicks registriert, sowie zwei Knöpfe. Auf den Seiten befindet sich je ein Grip-Button, um das Zusammendrücken der Hand festzustellen und auf der Rückseite ist ein Abzug (Trigger) angebracht.



Abbildung 7: Der HTC Vive Controller. Abbildung von der HTC Corporation [42].

Das Tracking (Ortung im dreidimensionalen Raum) erfolgt über in den Geräten eingelassene Infrarotsensoren im Zusammenspiel mit zwei externen Infrarotsendern, welche von HTC Lighthouse genannt werden.

Softwareseitig wurden die Grafik-Engine Unity und für die Skripte die Programmiersprache C# eingesetzt. Unity ermöglicht es zusammen mit der Erweiterung für SteamVR, VR-Hardware schnell, einfach und ohne grosse Vorkenntnisse einzubinden und zu nutzen. Das SteamVR-Plugin stellt hierzu zum einen vorgefertigte Assets und zum anderen die OpenVR API für die Interaktion mit Benutzerscripts zur Verfügung. Die Wahl der eingesetzten Software wurde durch die bestehenden Vorkenntnisse des Autors mit Unity und C# unterstützt, auf welchen aufgebaut und wodurch der Aufwand für die Erstellung der Prototypen reduziert werden konnte.

5.5 Erste Iteration der Tastatur

Als erstes wurden das Design und das grundlegende Bedienkonzept und anschliessend verschiedene Bedienvarianten von SektorInput entworfen. Wie bei PizzaText wurde für die Tastaturanzeige eine Scheibe verwendet, die in mehrere Sektoren unterteilt ist. Die Tastatur enthält drei Ebenen: Eine Übersicht, eine Unteransicht, sowie eine Variantenauswahl für gewisse Buchstaben (siehe Abbildung 8). Den meisten Sektoren der Übersicht sind mehrere Zeichen zugewiesen. Wählt der Anwender oder die Anwenderin einen solchen Sektor aus, öffnet sich eine Unteransicht, auf welcher nun eines dieser Zeichen zur Eingabe gewählt werden kann. Von dort aus kann auch auf die Variantenauswahl zugegriffen werden, wo sich Umlaute und Akzente befinden. Die Leertaste ist direkt von der Übersicht aus bedienbar, weil diese potenziell nach jedem Wort, und somit häufig, verwendet wird. Die Löschtaste ist ebenfalls direkt auf der Übersicht platziert, damit auch mehrere Zeichen schnell korrigiert werden können.

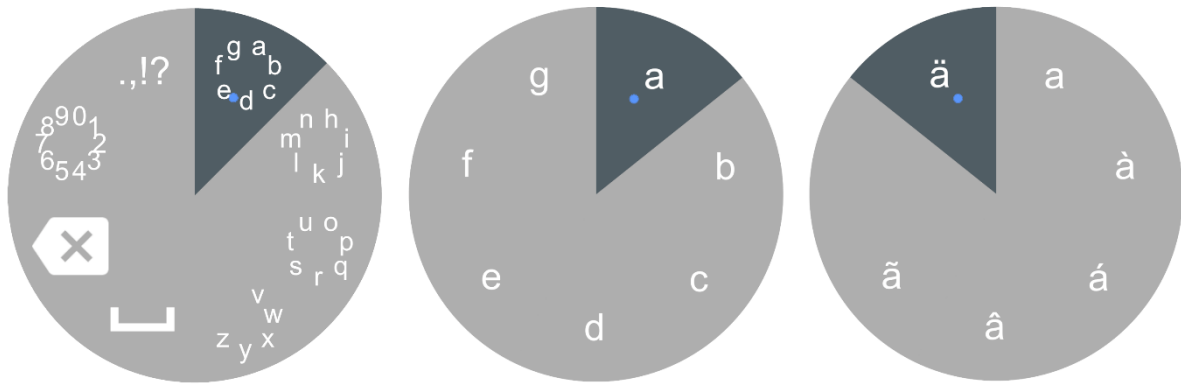


Abbildung 8: Das erste Keyboard-Design mit der Übersicht (links), Unterauswahl (Mitte) und Variantenauswahl (rechts).

Es kann zwischen Gross- und Kleinschreibung gewechselt werden, indem der Abzug (Trigger) auf der Rückseite des Controllers gedrückt wird (siehe Abbildung 7). Die Unterauswahl für Sonderzeichen, welche auf der Übersicht über den mit «.,!?» markierten Sektor aufrufbar ist, zeigt gleichzeitig sieben Zeichen. Um zwischen allen Sonderzeichen durchzuschalten, wird ebenfalls der Abzug verwendet. Die scheibenförmige Tastatur entspricht dem runden Touchpad (siehe Abbildung 7), wobei die Tastatur zur besseren Lesbarkeit etwas grösser als massstabsgetreu angezeigt wird. Der Ort der Berührung wird auf der Tastatur durch einen hellblauen Punkt markiert, wie auf Abbildung 8 zu sehen ist. SektorInput lässt sich mit der linken oder der rechten Hand bedienen. Anwenderinnen und Anwender können den Controller in ihre bevorzugte Hand nehmen. Die Controller der HTC Vive sind symmetrisch aufgebaut und sind deshalb für beide Hände geeignet.

Die hier erwähnten Bedienelemente sind für alle der ausgearbeiteten Bedienmethoden gleich. Die Methoden unterscheiden sich allerdings darin, wie zwischen Übersicht, Unterauswahl und Variantenauswahl gewechselt und wie ein Zeichen eingegeben werden kann. In einem ersten Schritt wurden vier Varianten ausgearbeitet, welche im Folgenden beschrieben sind.

TOUCH: Der Anwender oder die Anwenderin wählt bereits mit der ersten Berührung des Touchpads einen der Sektoren auf der Übersicht. Dies bedeutet, dass er oder sie den richtigen Sektor auf Anhieb treffen muss. Handelt es sich beim gewählten Sektor um eine Zeichengruppe, öffnet sich daraufhin die Unterauswahl. Nun kann der Daumen über das Touchpad bewegt und eines der angezeigten Zeichen zur Eingabe gewählt werden. Das Zeichen wird eingegeben, sobald die Anwenderin oder der Anwender das Touchpad loslässt. Um die Variantenauswahl zu öffnen, wird auf dem entsprechenden Zeichen eine kurze Zeit verweilt (siehe Abbildung 9, Mitte). Nach einer erfolgten Eingabe springt die Anzeige automatisch wieder zurück zur Übersicht.

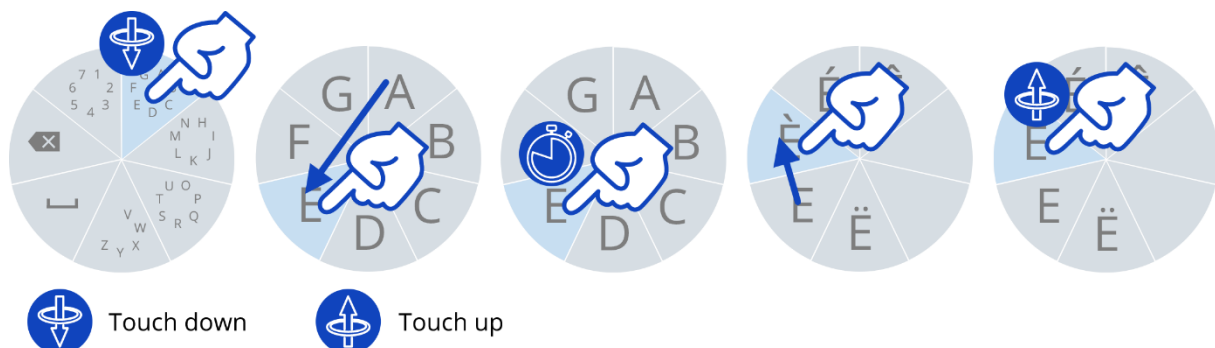


Abbildung 9: Skizzenhafte Darstellung der Funktionsweise von TOUCH.

CLICK HOLD CLICK: Bei dieser Methode wird auf der Übersicht ein Sektor gewählt, indem an der gewünschten Stelle geklickt wird (siehe Abbildung 10). Bei gedrücktem Touchpad kann danach in der Unteransicht eines der Zeichen gewählt werden, welches beim Loslassen des Klicks eingegeben wird.

Wie bei TOUCH wird auch hier in die Variantenansicht geschaltet, indem eine gewisse Zeit auf einem Buchstaben verharret wird. Die Ansicht wechselt auch hier nach erfolgter Eingabe wieder automatisch zurück zur Übersicht. CLICK HOLD weist jedoch zwei wesentliche Unterschiede zur ersten Methode auf: Der Daumen muss zur Eingabe nicht vollständig vom Touchpad gehoben und bei der Auswahl des Sektors auf der Übersicht muss die richtige Stelle nicht auf Anhieb getroffen werden.

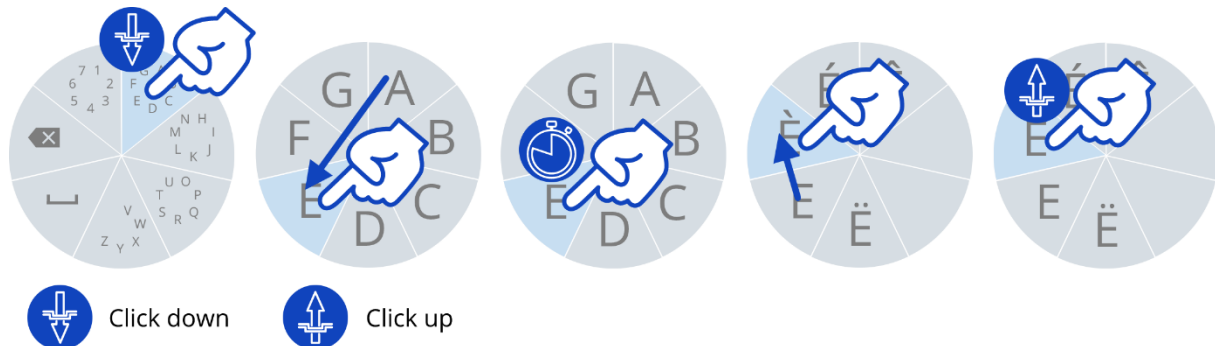


Abbildung 10: Skizzenhafte Darstellung der Funktionsweise von CLICK HOLD.

CLICK CLICK: Ein erstes Klicken auf einen der Sektoren auf der Übersichtsseite schaltet, sofern es sich dabei nicht um die Leer- oder die Löschtaste handelt, in die Unterauswahl (siehe Abbildung 11). Ein zweiter Klick auf eines der Zeichen der Unterauswahl führt dann zur Eingabe. Hält man diesen zweiten Klick gedrückt, erscheint die Variantenauswahl und beim Loslassen des Klicks wird die gewählte Variante eingegeben. Lässt man zu irgendeinem Zeitpunkt das Touchpad komplett los, wird zur Übersicht zurückgewechselt. Somit kann die Eingabe jederzeit abgebrochen werden, was bei den übrigen Methoden nicht möglich ist. Nach der Eingabe eines Zeichens bleibt man auf der jeweiligen Unterauswahl, es wird also nicht automatisch in die Übersicht zurückgeschaltet.

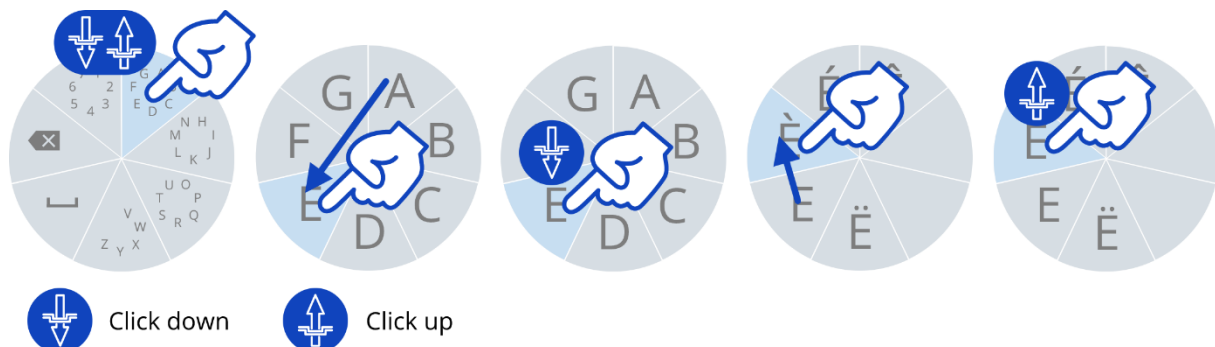


Abbildung 11: Skizzenhafte Darstellung der Funktionsweise von CLICK CLICK.

CLICK RELEASE CLICK: Diese Methode lässt sich ähnlich wie CLICK CLICK bedienen: Durch Klicken wird zuerst die Unteransicht geöffnet und danach das gewünschte Zeichen selektiert. Jedoch kann der Daumen jederzeit komplett vom Touchpad genommen werden, ohne dass die Eingabe dadurch abgebrochen wird (siehe Abbildung 12, Abbildung ganz links). Die Auswahl von Buchstabenvarianten funktioniert ebenfalls durch gedrückt halten des Touchpads. Die Ansicht wechselt von selbst zurück zur Übersicht, nachdem ein Zeichen eingegeben wurde.

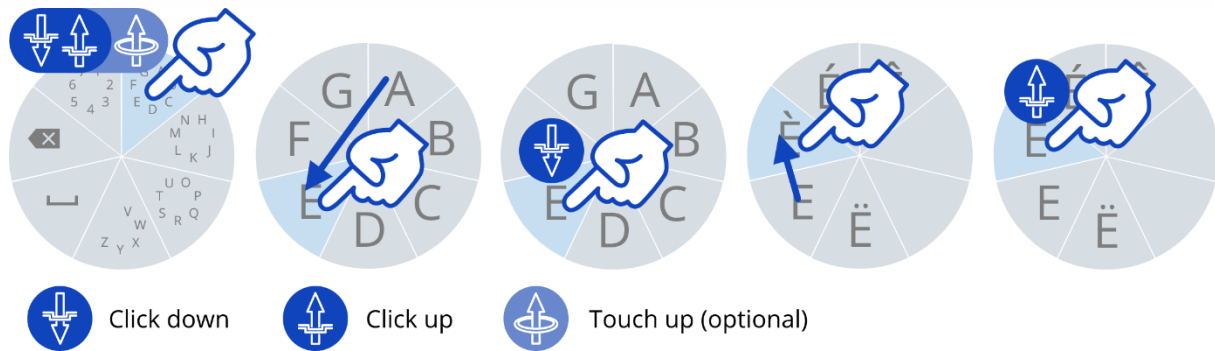


Abbildung 12: Skizzenhafte Darstellung der Funktionsweise von CLICK RELEASE CLICK.

Trotz der erwähnten Nachteile wurde die TOUCH-Variante als Prototyp ausgearbeitet, weil die in Kapitel 2 vorgestellte Eingabemethode «Blind Type», welche das blinde Tippen auf einer berührungsempfindlichen Oberfläche einsetzt, in der Untersuchung der Erfinder gute Ergebnisse gezeigt hat [20]. Bei genügend grosser Treffgenauigkeit wurde vermutet, dass diese Methode die schnellsten Resultate erzielen würde. CLICK HOLD stellt dazu eine Alternative dar, welche von Anwendern und Anwenderinnen keine besondere Genauigkeit bei der Platzierung des Daumens auf dem Touchpad verlangt. Dafür wurde vermutet, dass das Klicken und gedrückt halten die Eingabe verlangsamt. Bei CLICK CLICK wurde der grosse Vorteil bei der Möglichkeit gesehen, dass die Unterauswahl nicht nach jeder erfolgten Zeicheneingabe verlassen werden muss. Sofern sich der nächste Buchstabe auf derselben Unterauswahl befindet, könnte dies zu einem grossen Geschwindigkeitsanstieg führen. Ausserdem können Eingaben abgebrochen werden, falls aus Versehen die falsche Unterauswahl geöffnet wurde und es muss keine Falscheingabe gemacht und gleich wieder korrigiert werden. CLICK RELEASE CLICK war als Alternative zu CLICK CLICK gedacht. Gerade ungeübten Nutzern sollte diese Variante mehr Sicherheit verschaffen, da das Touchpad jederzeit vollständig losgelassen werden kann, ohne dass die Eingabe dadurch abgebrochen wird.

5.6 Nutzertest 1

Nach der Erstellung der ersten Prototypen wurde ein Nutzertest durchgeführt, um die ausgearbeiteten Varianten von SektorInput miteinander zu vergleichen und Potenziale sowie Schwächen aufzudecken. Der erste Test zielte darauf ab, folgende Fragenstellungen zu beantworten:

1. Welches ist die beliebteste Eingabemethode und warum?
2. Welche der vier Eingabemethoden ist für einen ungeübten Anwender am schnellsten?
3. Welche Eingabemethoden weisen insgesamt eine hohe Fehlerquote auf und bieten dementsprechend ein mögliches Verbesserungspotential?
4. Welche der beiden Display-Positionen ist am angenehmsten?
5. Könnte es sinnvoll sein, den Inhalt des Textfeldes direkt über dem Controller nochmals anzuzeigen, um die Anzahl der Kopfbewegungen zu reduzieren und die Eingabezeit zu verkürzen?
6. Wie sehr stört es, dass bei drei von vier Methoden die Eingabe nicht abgebrochen werden kann, sobald eine Unterauswahl der Zeichen gewählt wurde?
7. Braucht es ein zusätzliches Feedback, sobald ein Zeichen im Textfeld eingegeben wurde?

Für den ersten der beiden Nutzertests wurden vier Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus dem Bekanntenkreis des Autors eingeladen, um die vier erarbeiteten Eingabe-Varianten, TOUCH, CLICK HOLD CLICK, CLICK CLICK und CLICK RELEASE CLICK, zu testen. Alle Teilnehmenden gaben an, zuvor schon einmal ein VR-System ausprobiert zu haben, doch niemand verwendete ein solches regelmässig. Zuerst wurden die Probanden und Probandinnen mit dem HTC Vive Pro Headset und den beiden HTC Vive Controllern vertraut gemacht. Danach wurden ihnen die vier Eingabemethoden,

welche zum Test standen, erklärt. Dann wurden sie gebeten, je Eingabemethode vier deutsche Sätze einzugeben, während sie das Head Mounted Display (HMD) trugen. Als Grundlage für die einzugebenden Sätze wurde das Releasekorpus des Dortmunder Chat Korpus [43] verwendet. Daraus wurden insgesamt zwanzig Sätze ausgewählt. Dabei wurde die Rechtschreibung korrigiert, da befürchtet wurde, die Teilnehmer könnten die Fehler zu leicht überlesen, was dann zu zusätzlichen und für die Untersuchung nicht relevanten Fehleingaben führen würde. Zudem wurden Satzzeichen eingefügt, um eine praxisnahe Ausgangslage zu schaffen. Derselbe Satz wurde im ganzen Test pro Teilnehmerin und Teilnehmer nur einmal verwendet, um einen Lerneffekt auszuschliessen und keine unnötige Monotonie aufkommen zu lassen. Alle Teilnehmer und Teilnehmerinnen sollten alle der zwanzig Sätze eingeben, allerdings wurde die Zuordnung der Sätze zu den Eingabemethoden randomisiert. Alle Teilnehmenden mussten also die Sätze mit einer jeweilig anderen Eingabemethode eingeben. Es wurde darauf geachtet, dass die summierte Zeichenanzahl für alle Eingabemethoden gleich hoch war. Anschliessend wurde den Teilnehmern und Teilnehmerinnen aufgetragen, vier zufällige Zeichenfolgen von je fünf Zeichen einzugeben. Dabei konnte jedes Zeichen vorkommen, welches auf einer Schweizer QWERTZ-Tastatur zu finden ist. Damit wurde die Eingabe von Kennwörtern, abgekürzten Dateinamen und ähnlichen Texten simuliert. Die Zeichenfolgen wurden vorgängig generiert und waren für alle der Teilnehmenden gleich. Zusammen ergab das acht Zeichenfolgen, welche die Versuchspersonen pro Eingabemethode abtippen sollten. Der einzugebende Text wurde jeweils im virtuellen, dreidimensionalen Raum in einer Text-Box direkt über dem Eingabefeld angezeigt (siehe Abbildung 13). Den Probanden wurde aufgetragen, die Sätze so schnell und fehlerfrei wie möglich einzugeben. Dabei wurde die Reihenfolge der Eingabemethode bewusst pro Proband unterschiedlich festgelegt, um mögliche Einflüsse auf die Bewertung auszugleichen. Wie sich jedoch während der Tests herausstellte, dauerte es für ungeübte Anwenderinnen und Anwender zu lange, die Texte einzugeben. Um die geplante Maximaldauer von einer Stunde pro Teilnehmerin und Teilnehmer nicht zu überschreiten, wurde spontan entschieden, die Anzahl der einzugebenden Texte auf die Hälfte zu reduzieren. Dadurch ging zwar die Ausgeglichenheit der Textlängen pro Methode verloren, doch dies war nicht schlimm, weil in dem Nutzertest lediglich die subjektive Einschätzung der Kandidaten und Kandidatinnen eingeholt werden sollte.



Abbildung 13: Der Versuchsaufbau für den ersten Nutzertest.

Danach wurde mit der zuletzt getesteten Eingabemethode eine alternative Displayposition getestet. Der Hälfte der Teilnehmer und Teilnehmerinnen wurde das Display zuerst direkt über dem Touchpad und danach weiter oben über dem Controller angezeigt (siehe Abbildung 14), bei der anderen Hälfte

wurde die Reihenfolge umgekehrt. Abschliessend wurden die Teilnehmenden zu ihrem Erlebnis nach einem vorgängig ausgearbeiteten Fragekatalog befragt.

Weitere Sorgfalt wurde der Tatsache beigemessen, dass die getesteten Eingabemethoden alle sehr ähnlich zueinander waren. Es bestand deshalb die Sorge, dass das Erlernen der vorherigen Methode bei der nächsten zu zusätzlichen Fehlbedienungen führen kann. Durch die Randomisierung der Reihenfolge, in welcher die Teilnehmerinnen und Teilnehmer die Methoden ausprobierten, und den Einbau von kurzen Pausen zwischen den Eingabemethoden wurde versucht, diesem Effekt entgegenzuwirken. Diese Pausen wurden dazu genutzt, um zusätzliches Feedback zu sammeln.

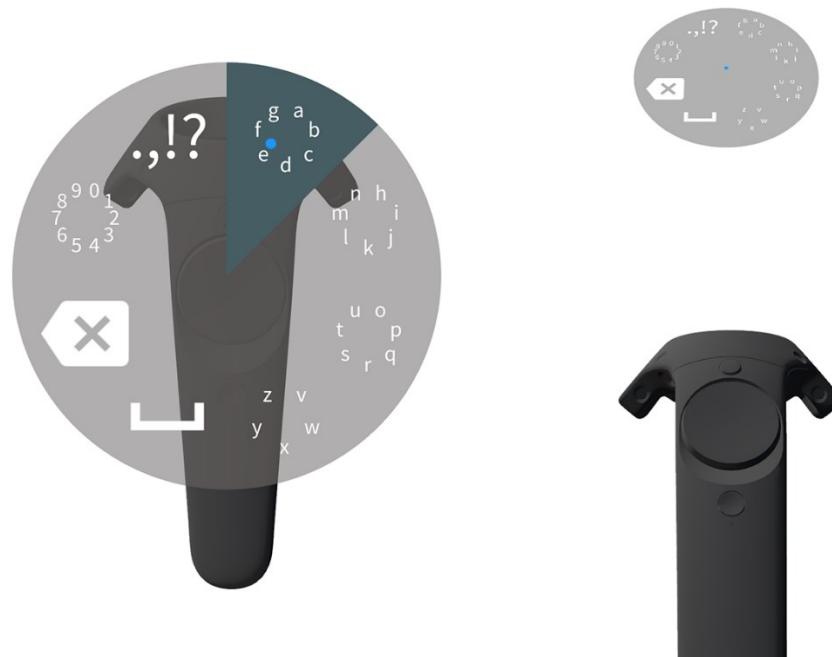


Abbildung 14: Die beiden untersuchten Displaypositionen. Links die Position direkt über dem Touchpad und rechts die etwas nach vorne versetzte Position.

Die obenstehenden Fragestellungen konnten insgesamt alle beantwortet werden. Die nachfolgende Auflistung zeigt für jede Fragestellung die entsprechende Auswertung der Antworten der Versuchsteilnehmerinnen und -Teilnehmer. Eine detaillierte Zusammenstellung der einzelnen Antworten kann in Anhang C gefunden werden.

(1) Die Tabelle 3 zeigt, wie die Methoden von den Versuchspersonen relativ zueinander eingestuft worden sind. Dabei ist jeweils eine tiefere Platzierung besser. Daraus wird ersichtlich, dass die Methode CLICK RELEASE CLICK durchschnittlich am besten bewertet worden ist. Aus dieser Auswertung geht ausserdem hervor, dass der Abstand zur nächsten Methode, CLICK CLICK, relativ gross ist. Allerdings zeigt sich auch, dass CLICK RELEASE CLICK trotz der guten Durchschnittsbewertung nur von einem Teilnehmer oder einer Teilnehmerin als Favorit gewählt wurde. Dies lässt darauf schliessen, dass die Methode zwar solide ist, andere Varianten allerdings noch gewisse Vorteile bergen, welche hier nicht vorhanden sind. Das geht auch aus den Rückmeldungen hervor, welche im Anhang B aufgeführt sind. CLICK RELEASE CLICK scheint sich angenehm und stressfrei bedienen zu lassen. Jedoch wird bemängelt, dass die Eingabe nicht abgebrochen werden kann und dass nach jeder Eingabe in die Übersicht zurück gewechselt wird, was die Eingabe von Zeichen in derselben Zeichengruppe erschwert.

Tabelle 3: Platzierung der Eingabemethoden durch die Teilnehmer des ersten Nutzertests. Tiefere Zahlenwerte stehen für eine bessere Platzierung.

Methode	TN 1	TN 2	TN 3	TN 4	Avg
TOUCH	3	3	4	4	3.5
CLICK HOLD	1	4	2	3	2.5
CLICK CLICK	4	1	3	1	2.25
CLICK RELEASE CLICK	2	2	1	2	1.75

(2) Während aufgrund der geringen Anzahl der Teilnehmer und der eingegebenen Texte auf eine Auswertung der quantitativen Messdaten verzichtet wurde, weisen die Antworten der Fragebögen darauf hin, dass CLICK RELEASE CLICK als die schnellste Eingabemethode wahrgenommen wurde. Drei von vier Teilnehmer und Teilnehmerinnen haben diese Methode als die schnellste genannt.

(3) Auch bei der Frage nach der fehleranfälligsten Methode scheinen sich die Teilnehmer und Teilnehmerinnen mehrheitlich einig zu sein. Drei von vier haben TOUCH als diejenige Methode genannt, die ihrer Meinung nach am fehleranfälligsten ist. In den Rückmeldungen aus Anhang B erwähnten auch alle Probandinnen und Probanden, dass das Treffen des ersten Sektors sehr schwierig sei, da zu diesem Zeitpunkt die Position des Daumens in der virtuellen Umgebung noch nicht sichtbar ist.

(4) und (5) Wie schnell der Blick von der Tastaturanzeige auf das Eingabefeld gewechselt werden kann scheint relevanter zu sein als die Frage nach der Position der Tastaturanzeige. Alle vier Teilnehmerinnen und Teilnehmer gaben im Fragebogen an, dass es angenehmer wäre, wenn die beiden Elemente näher beieinander wären. Sie könnten sich vorstellen, dass das Anzeigen des Eingabefelds direkt über dem Controller gut funktionieren könnte.

(6) Alle Teilnehmenden gaben an, dass es angenehm war, Eingaben abbrechen zu können, resp. dass es störte, wenn dies nicht möglich war.

(7) Ein zusätzliches Feedback bei der Eingabe eines Zeichens wurde von keinem der vier Teilnehmer und Teilnehmerinnen gewünscht.

Ausserdem hat sich deutlich gezeigt, dass das automatische Umschalten in die Variantenauswahl nach einem Verharren auf einem der Sektoren, wie dies bei TOUCH und CLICK HOLD eingesetzt wird, bei den Anwenderinnen und Anwendern nicht gut ankommt. Die Versuchsteilnehmerinnen und -Teilnehmer haben angegeben, dass dies zu einem hohen Stresslevel führen kann, weil man schnell entscheiden muss, ob man den Finger auf dem Sektor belassen oder doch einen anderen auswählen will.

5.7 Weiterentwicklung der Prototypen

Wie sich gezeigt hat, ist es für Benutzer und Benutzerinnen wichtig, Eingaben abbrechen zu können, wenn sie aus Versehen eine falsche Unterauswahl geöffnet haben. Zu diesem Zweck wurde das Tastatur-Layout erweitert und auf der Unter- und der Variantenauswahl in der Mitte ein Zurück-Button eingebaut (siehe Abbildung 15). Auf der Übersicht wurde, ebenfalls in der Mitte, eine Eingabetaste hinzugefügt. Dies war relevant für die Nutzerstudie, damit auch fehlerhafte Texte eingegeben und somit die Fehlerraten korrekt ermittelt werden konnten.

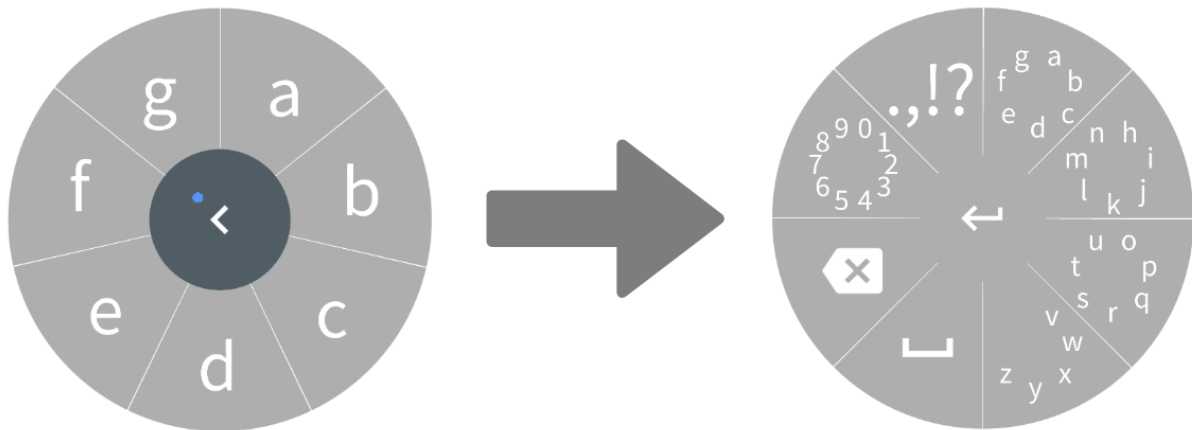


Abbildung 15: Erweiterung des Designs um einen Zurück-Button.

Obwohl TOUCH eine hohe Fehlerquote aufweist, was auf ein grosses Verbesserungspotential zurückführen könnte, scheint es unwahrscheinlich zu sein, dass der erwähnte, hohe Stressfaktor signifikant reduziert werden könnte. Aufgrund der Ergebnisse des ersten Nutzertests wurde entschieden, die Vorteile von CLICK RELEASE CLICK und CLICK CLICK zu kombinieren, daraus zwei weitere Eingabemethoden zu erarbeiten und die anderen beiden Ansätze nicht weiter zu verfolgen. Die beiden neuen Varianten sind im Folgenden beschrieben.

CLICK RELEASE CLICK V2: Aufbauend auf der ersten Version von CLICK RELEASE CLICK wurde dieser Methode die Möglichkeit hinzugefügt, dasselbe Zeichen mehrmals hintereinander eingeben zu können, ohne jedes Mal zur Übersicht zurückkehren zu müssen. Dazu wurde eine kurze Verzögerung eingebaut, bevor die Ansicht automatisch zur Übersicht zurück wechselt, während der die gleiche Taste beliebig oft erneut gedrückt werden kann. Damit sollte die Anzahl der Aktionen reduziert und die Eingabegeschwindigkeit erhöht werden.

CLICK STAY: In den Rückmeldungen der Test-Teilnehmer wurde mehrfach deutlich, dass das Gefühl von Kontrolle für die Anwender und Anwenderinnen wichtig ist. Bei CLICK STAY wählt der Benutzer oder die Benutzerin, wie bei CLICK RELEASE CLICK, durch Klicken Sektoren aus, um in die Unteransicht zu wechseln und Zeichen einzugeben. Buchstabenvarianten werden ebenfalls durch gedrückt halten ausgewählt. Doch im Unterschied zu CLICK RELEASE CLICK wechselt die Anzeige nicht selbstständig zurück zur Übersicht. Dies geht nur manuell durch das Betätigen der Zurück-Taste.

Gleichzeitig wurde eine Zeichenvorhersage entwickelt, welche dazu dienen sollte, die Eingabezeit für deutsche Sätze zu reduzieren. Aufgrund des zuletzt eingegebenen Zeichens (Ursprungsbuchstabe) wurden der Benutzerin oder dem Benutzer die wahrscheinlichsten Folgebuchstaben (Buchstabenvorschläge) vorgeschlagen. Die relativen Folgewahrscheinlichkeiten wurden aufgrund des deutschen Wikipedia-Korpus der Universität Leipzig aus dem Jahr 2016 mit insgesamt einer Million Sätzen [44] berechnet (siehe Anhang F). Ursprünglich wurde die Auswertung für alle Zeichen, welche im Layout der Schweizer QWERTZ-Tastatur enthalten sind, durchgeführt, weil auch SektorInput alle diese Zeichen unterstützen soll. Allerdings sind erwartungsgemäss 19 der 20 am häufigsten aufgetretenen Zeichen Buchstaben (siehe Anhang E). Und die 20 häufigsten Zeichen machen wiederum etwa 86% aller Zeichen in den untersuchten Texten aus. Aus diesem Grund wurde entschieden, für die Zeichenvorhersage nur Buchstaben zu verwenden, um den auf der Tastatur verfügbaren Platz besser auszunutzen und die Bedienung zu erleichtern. Die Abbildung 16 zeigt die kumulierten Wahrscheinlichkeiten für die Buchstaben. Jede Linie repräsentiert einen der 26 möglichen Ursprungsbuchstaben. Dabei wurden Gross- und Kleinbuchstaben zusammengefasst, da es die Tastatur von SektorInput erlaubt, jederzeit zwischen Gross- und Kleinschreibung hin und her zu schalten. Gegeben n der wahrscheinlichsten Folgebuchstaben (x -Achse), gibt der Ausschlag auf der y -Achse die kumulierte Wahrscheinlichkeit an, mit welcher sich der tatsächliche Folgebuchstabe unter dieser Zeichenauswahl befindet. Zeigt man die fünf wahrscheinlichsten Vorschläge für den nächsten

Buchstaben an, liegt die Wahrscheinlichkeit, dass sich das gewünschte, nächste Zeichen darunter befindet, für alle Ursprungsbuchstaben bei über 50%.

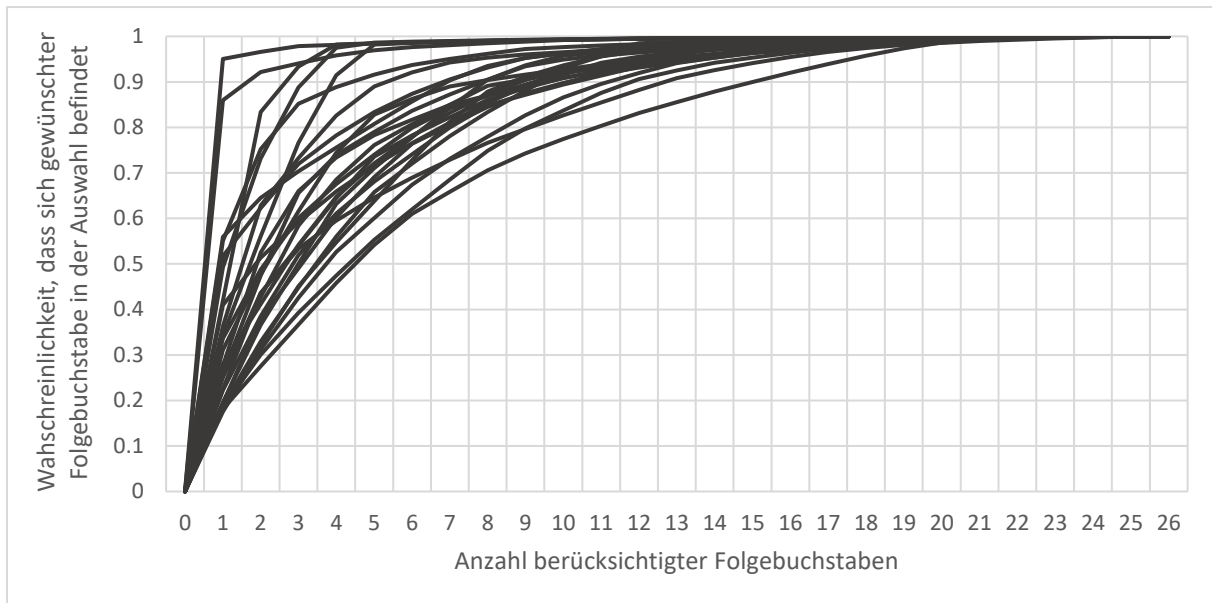


Abbildung 16: Kumulierte Wahrscheinlichkeiten der Folgebuchstaben. Die x-Achse enthält die Anzahl der kumulierten Folgebuchstaben, auf der y-Achse ist der zugehörige Wahrscheinlichkeitswert abzulesen. Jede Linie steht für einen Ursprungsbuchstaben.

Das in Abbildung 15 gezeigte Layout der Tastatur wurde erneut erweitert, um die Buchstabenvorschläge einzubauen. Der mittlere Bereich wurde ebenfalls in Sektoren unterteilt, welche die fünf Vorschläge und die Eingabetaste enthalten. Die Löschtaste wurde in die Mitte verschoben. Dies, weil die Vermutung nahestand, dass es für Anwender und Anwenderinnen einfacher und angenehmer ist, wenn die Sektorenzahl des inneren und des äusseren Bereichs identisch sind. Die Layoutvariante mit den Buchstabenvorschlägen wird in Abbildung 17 gezeigt. Zur Befürchtung, dynamische Tasten mit laufend wechselnden Buchstaben könnten die Eingabegeschwindigkeit reduzieren, weil das Layout dadurch für Benutzerinnen und Benutzer nicht mehr komplett erlernbar ist, konnten keine wissenschaftlichen Untersuchungen gefunden werden.



Abbildung 17: Tastaturlayout mit Buchstabenvorschlägen (hervorgehoben).

Auch die Probleme mit der Position des Eingabefelds und der schlecht lesbaren Zeichen auf der Tastatur wurden angegangen. Die Schriftgrösse wurde etwas erhöht und oberhalb der runden

Tastaturanzeige wurde der aktuelle Inhalt des Eingabefelds dupliziert angezeigt (siehe Abbildung 18), damit der Blick nicht so häufig zwischen Eingabefeld und Controller gewechselt werden muss.

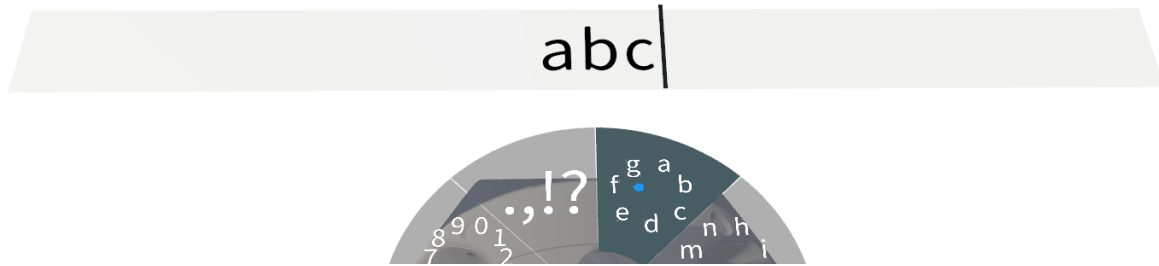


Abbildung 18: Anzeige des eingegebenen Textes direkt über dem Controller.

5.8 Nutzertest 2

In der zweiten Nutzerstudie wurde untersucht, welche der beiden neuen Eingabemethoden angenehmer zu bedienen ist und eine höhere Geschwindigkeit aufweist. Ausserdem sollte geklärt werden, ob die Vorhersage des nächsten Zeichens die Eingabe erleichtert. Es sollten folgende Fragestellungen beantwortet werden:

1. Welche der zwei vorgestellten Eingabemethoden wird von den Anwenderinnen und Anwendern bevorzugt und warum?
2. Mit welcher Methode können Texte schneller eingegeben werden?
3. Bei welcher Methode wird weniger Stress, resp. mehr Sicherheit empfunden?
4. Verbessert oder verschlechtert die Zeichenvorhersage die Eingabegeschwindigkeit?

Um diese Fragen zu beantworten, wurden erneut drei Personen zu einem Nutzertest eingeladen. Damit die Tests möglichst schnell und einfach ablaufen konnten, wurde versucht, dieselben Teilnehmer und Teilnehmerinnen wie für den ersten Test zu rekrutieren. Von den vier ursprünglichen Teilnehmenden war es zwei Personen möglich, nochmals zu kommen. Zudem wurde eine weitere Person eingeladen, welche am ersten Test nicht teilgenommen hatte.

Der Ablauf der Tests blieb gegenüber dem ersten Nutzertest grösstenteils unverändert. Mit beiden getesteten Eingabemethoden mussten die Teilnehmer und Teilnehmerinnen zwei deutsche Sätze und zwei zufällige Zeichenfolgen eingeben. Es wurden dieselben Texte wie für den ersten Nutzertest verwendet. Obwohl zwei der drei Versuchspersonen schon an dem ersten Test teilgenommen hatten, bestand keine Vermutung, die Bekanntheit der Sätze könnte den Versuch beeinflussen, da zwischen dem ersten und dem zweiten Test drei Wochen lagen. Zuerst wurden beide Methoden ohne Zeichenvorhersage getestet. Danach durften die Probanden und Probandinnen ihre bevorzugte Methode wählen, womit dann ein weiterer Test inklusive Vorhersage gemacht wurde.

Die geringe Teilnehmerzahl lieferte keine sehr aussagekräftigen Antworten auf die gestellten Fragen. Aus Zeitgründen konnten nicht noch weitere Personen rekrutiert werden. Im Einzelnen wurden die obengenannten Fragestellungen wie folgt beantwortet:

- (1) Eine der drei Testpersonen bevorzugte CLICK STAY zwei CLICK RELEASE CLICK V2. Als Grund, welcher für CLICK RELEASE CLICK V2 spricht, wurde insbesondere die geringere Anzahl an Aktionen genannt, welche bei dieser Methode vorgenommen werden müssen, um eine gewünschte Zeichenfolge einzugeben.
- (2) Zwei von drei Teilnehmenden kam die Eingabemethode CLICK RELEASE CLICK V2 schneller als CLICK STAY vor, wenn auch in einem Fall nur knapp.
- (3) Auch die Frage nach der Methode, welche dem Anwender oder der Anwenderin die grösste Sicherheit vermittelt, konnte nicht eindeutig beantwortet werden. Zwei von drei Personen nannten CLICK STAY.

(4) Keiner der drei Teilnehmerinnen und Teilnehmer sah einen grossen Vorteil in der Zeichenvorhersage. Dennoch gaben zwei Personen an, die Variante mit Vorhersage zu bevorzugen, weil sie, trotz lediglich geringer Vorteile, gegenüber der Variante ohne Vorhersage keine Nachteile habe. Der dritte Teilnehmer gab hingegen als Antwort, die Vorhersage würde ablenken und die Suche nach den gewünschten Zeichen auf der Tastatur dadurch verlangsamen.

Aufgrund der grossen Vielfalt innerhalb der Antworten der Nutzertestteilnehmerinnen und -Teilnehmer wurde aufgrund der Einschätzung des Autors entschieden und als finale Methode für die anschliessende Nutzerstudie CLICK RELEASE CLICK V2 gewählt. Für die Studie wurde ausserdem die Zeichenvorhersage weggelassen, da selbst die Teilnehmer, welche die Variante mit Vorhersage bevorzugten, die Qualität der Vorschläge bemängelten.

5.9 Nutzerstudie

Der finale Prototyp von SektorInput wurde mithilfe einer Nutzerstudie mit der zurzeit am weitesten verbreiteten Methode zur Eingabe von Text in VR, der Laserpointer-Tastatur, verglichen. Bei der Laserpointer-Tastatur handelt es sich um eine virtuell angezeigte QWERTZ-Tastatur, welche mit aus den Controllern schiessender Laserstrahlen bedient werden kann (siehe Abbildung 19). Der Anwender oder die Anwenderin zielt damit auf die gewünschte Taste und bestätigt die Eingabe durch das Drücken einer der Knöpfe oder dem Trigger, welche im Controller verbaut sind.



Abbildung 19: Die Laserpointer-Tastatur von SteamVR.

Der Code der Prototyp-Anwendung wurde erweitert, um die Implementation der Laserpointer-Tastatur von SteamVR anzeigen zu können. Die API von OpenVR [45] bietet hierzu eine Möglichkeit, die Tastatur als Overlay zu öffnen und im dreidimensionalen Raum zu platzieren. Für die Anwender und Anwenderinnen ist nicht ersichtlich, dass es sich dabei um ein Overlay handelt. Über eine weitere API-Methode wurden dann die benötigten Tastatur-Events abgefangen und an das interne System, welches für die Steuerung des Testablaufs verantwortlich ist, weitergeleitet.

In der Studie wurden folgende Hypothesen geprüft:

- (H1) CLICK RELEASE CLICK V2 funktioniert signifikant besser als die Laserpointer-Tastatur bei der Eingabe von deutschen Sätzen.
- (H2) CLICK RELEASE CLICK V2 funktioniert nicht schlechter als die PizzaText-Tastatur bei der Eingabe von deutschen Sätzen.
- (H3) CLICK RELEASE CLICK V2 funktioniert nicht schlechter als die Laserpointer-Tastatur bei der Eingabe von zufälligen Zeichenfolgen.

Insgesamt haben sich zehn Studierende vom Campus der Hochschule Luzern für die Studie angemeldet. Zudem wurden drei weitere Personen aus dem Angehörigen- und Bekanntenkreis des Autors zur Studie eingeladen, wovon noch niemand mit der Arbeit vertraut war. Aufgrund der eher

geringen Teilnehmerzahl wurde ein Within-Subject Design gewählt, bei welchem alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer nacheinander beide Methoden testeten. Um auszuschliessen, dass ein Lerneffekt die Resultate der jeweils an zweiter Stelle getesteten Methode beeinflusst, wurde die Reihenfolge der Methoden, wie schon bei den Nutzertests, randomisiert, sodass 50% mit der einen und 50% mit der anderen Methode begannen. Die einzugebenden Texte wurden in zwei Gruppen, eine für die erste Methode und eine für die zweite, aufgeteilt. Auch hier wurde sichergestellt, dass nicht immer dieselbe Methode mit denselben Sätzen getestet wurde, um einen Einfluss der gewählten Texte auf die Ergebnisse für die Methoden auszuschliessen. Insgesamt ergaben sich somit $2 \times 2 = 4$ mögliche Kombinationen aus Methodenreihenfolge und Textgruppenzuweisung. Aus diesem Grund wurde nach Eingang der Anmeldungen für die Studie eine Teilnehmerzahl gewählt, die möglichst gross, aber durch vier teilbar ist. Somit war sichergestellt, dass jede Kombination gleich häufig getestet wurde und die Resultate miteinander vergleichbar waren.

Um später die Auswertung gemäss dem erarbeiteten Kriterienkatalog (siehe Anhang A) vornehmen zu können, wurden zu jeder Eingabe Statistiken aufgezeichnet und nach jeder der beiden Methoden das User Experience Questionnaire (UEQ) verteilt. Die Logging-Komponente, welche für die Aufzeichnung der Messdaten verantwortlich war, wurde bereits während den beiden Nutzertests eingesetzt, um deren Verlässlichkeit zu testen. Insgesamt hat sich das Logging-System als sehr zuverlässig herausgestellt, jedoch konnten vor der Studie noch zwei Fehler gefunden und behoben werden. Zum einen wurden anfänglich einige der Metriken nicht richtig berechnet. Dies hätte dazu geführt, dass sämtliche Messdaten unbrauchbar gewesen wären, zumal auch nicht genügend Daten aufgezeichnet wurden, um die Berechnung zu wiederholen. Die Berechnung wurde angepasst und neben den vorberechneten Metriken wurden noch weitere Werte aufgezeichnet, welche das spätere Nachrechnen erlaubt hätten. Zum andern überschrieb die erste Version der Logging-Komponente das Logfile, falls für dasselbe Experiment und denselben Teilnehmer oder dieselbe Teilnehmerin ein zweiter Testlauf durchgeführt wurde, beispielsweise weil die Anwendung aufgrund eines Fehlers neugestartet werden musste. Die finale Version überschreibt keine Dateien mehr.

Für die Studie wurden dieselben Sätze verwendet, die auch schon bei den beiden Nutzertests zum Einsatz kamen. Diese hatten sich bislang bewährt und da zur Studie strikt keine der bisherigen Testteilnehmerinnen und -Teilnehmer zugelassen wurden, waren sie den Probanden und Probandinnen gänzlich unbekannt. Es mussten allerdings neue Zufallszeichenfolgen generiert werden, da die eingesetzte Laserpointer-Tastatur von SteamVR nur über eine Untermenge des von SektorInput unterstützten Zeichensatzes verfügt. Dies trifft nicht für alle Laserpointer-Tastaturen zu. Diejenige von Oculus unterstützt beispielsweise alle Zeichen einer vollwertigen Tastatur. Allerdings kann diese nur in Verbindung mit VR-Geräten von Oculus verwendet werden, was den Einsatz für die Nutzerstudie ausgeschlossen hat. Wie schon bei den Nutzertests wurde darauf geachtet, dass die Summe aller Zeichen für beide Eingabemethoden jeweils identisch war.

Nach einer kurzen Begrüssung und dem Unterschreiben der Einverständniserklärung wurden die Versuchspersonen mit der HTC Vive Pro und der virtuellen Realität vertraut gemacht. Danach wurden sie gebeten, nacheinander die beiden Eingabemethoden zu testen. Zu jeder Eingabemethode gab es zuerst zwei Übungszeichenfolgen, welche die Teilnehmerinnen und Teilnehmer abtippeten. Dazu wurden noch keine Leistungsdaten aufgezeichnet. Den Teilnehmerinnen und Teilnehmern wurde parallel dazu die jeweilige Eingabemethode erklärt und sie hatten die Möglichkeit, Fragen zur Bedienung zu stellen. Danach wurden die teilnehmenden Personen gebeten, die folgenden vier Eingabeaufforderungen so akkurat und schnell wie möglich abzuschreiben, wobei die erste Priorität auf Korrektheit und die zweite Priorität auf Geschwindigkeit liegen sollte. Während der Testphase wurden keine Fragen mehr beantwortet und auch keine Hinweise mehr gegeben. Direkt im Anschluss an jede Methode füllten die Teilnehmer und Teilnehmerinnen dann den Fragebogen aus.

Ursprünglich wurde den Probanden und Probandinnen in den Anweisungen zum Experiment das Nutzen der Wortvorschläge, welche die Laserpointer-Tastatur von SteamVR anbietet, erlaubt. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass dies von der Logging-Komponente nicht korrekt behandelt werden konnte. Wird nämlich einer der Wortvorschläge ausgewählt, nachdem bereits Buchstaben eingegeben worden sind, sendet die Tastatur zuerst Löschrzeichen, um diese wieder zu löschen, und danach

aufeinanderfolgend alle Buchstaben des gewählten Wortes. Dies führte zu einer Verfälschung der aufgezeichneten Fehlerstatistik. Das Verhalten wurde bereits bei der ersten Person, welche die Wortvorschläge verwendet hatte, festgestellt. Die weiteren Teilnehmerinnen und Teilnehmern wurden angewiesen, sie sollen die Vorschläge komplett ignorieren. Der betroffene Datensatz wurde in der Auswertung nicht berücksichtigt und stattdessen wurde das Experiment in der gleichen Konfiguration mit einer weiteren, dreizehnten Versuchsperson wiederholt.

6 Resultate

Die Resultate für die beiden getesteten Text-Arten, deutsche Sätze und zufällige Zeichenfolgen, wurden separat ausgewertet, um die Leistungsfähigkeit je Anwendungsfall bestimmen zu können. Bei den Sätzen war die Laserpointer-Tastatur der CLICK RELEASE CLICK V2 Methode klar überlegen. Sie erzielte mit einem Durchschnittswert von etwa 11.61 Wörtern pro Minute nicht ganz doppelt so hohe Geschwindigkeitswerte wie die eigens entwickelte Methode (siehe Abbildung 20). Ein gepaarter, zweiseitiger t-Test ergab eine hohe Signifikanz der Unterschiede ($p < 0.01$). Hingegen wiesen die Werte bei den zufälligen Zeichenfolgen keine signifikanten Unterschiede auf ($p = 0.82$). Berechnet man den Mittelwert für die Sätze und die zufälligen Zeichenfolgen, kommt man auf einen Wert von 7.74 WPM für den Laserpointer-Ansatz und 4.38 WPM für CLICK RELEASE CLICK V2.

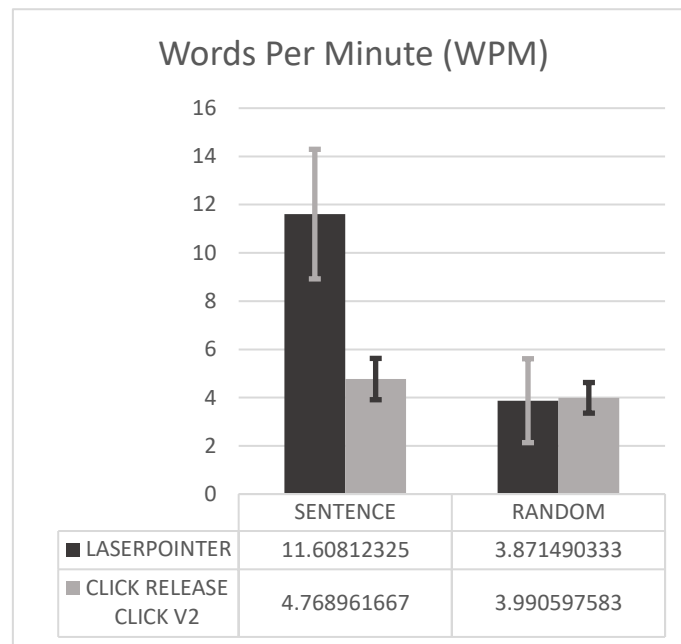


Abbildung 20: Words Per Minute Resultate der Nutzerstudie. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an.

Bei der Fehlerrate gab es keine signifikanten Unterschiede bei den Sätzen ($p = 0.21$), aber bei den zufälligen Zeichenfolgen hat die Click Release Click V2 Methode mit durchschnittlich etwa 3.33% gegenüber 13.63% für die Laserpointer-Methode deutlich besser abgeschnitten ($p = 0.03$). Wie man allerdings an den Fehlerbalken in Abbildung 21 ablesen kann, gab es bei der Laserpointer-Tastatur eine grosse Streuung in den Messwerten.

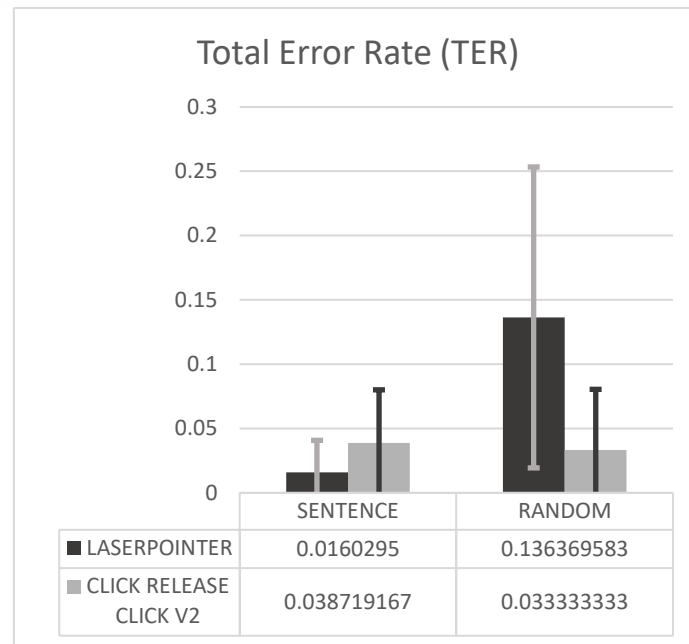


Abbildung 21: Die in der Studie gemessenen Fehlerraten. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an.

Schlüsselt man die Fehlerraten in die nicht korrigierten und korrigierten Fehler (NCER und CER) auf, was in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt ist, wird klar, dass es lediglich bei den korrigierten Fehlern im Falle der zufälligen Zeichenfolgen einen nennenswerten Unterschied ($p = 0.01$) gibt. Bei den deutschen Sätzen gab es weder bei NCER noch bei CER ($p = 0.18$ und $p = 0.42$) eindeutige Unterschiede und auch bei der NCER-Metrik für zufällige Zeichenfolge gab es keine deutliche Differenz ($p = 0.91$).

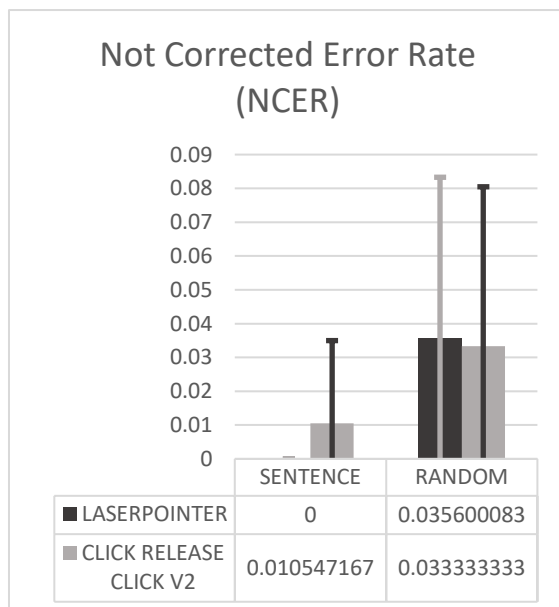


Abbildung 22: Fehlerrate für nicht korrigierte Fehler. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an.

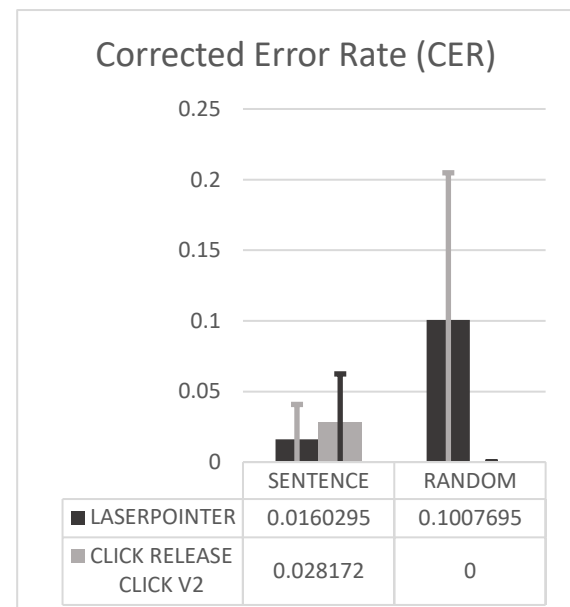


Abbildung 23: Fehlerrate für korrigierte Fehler. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an

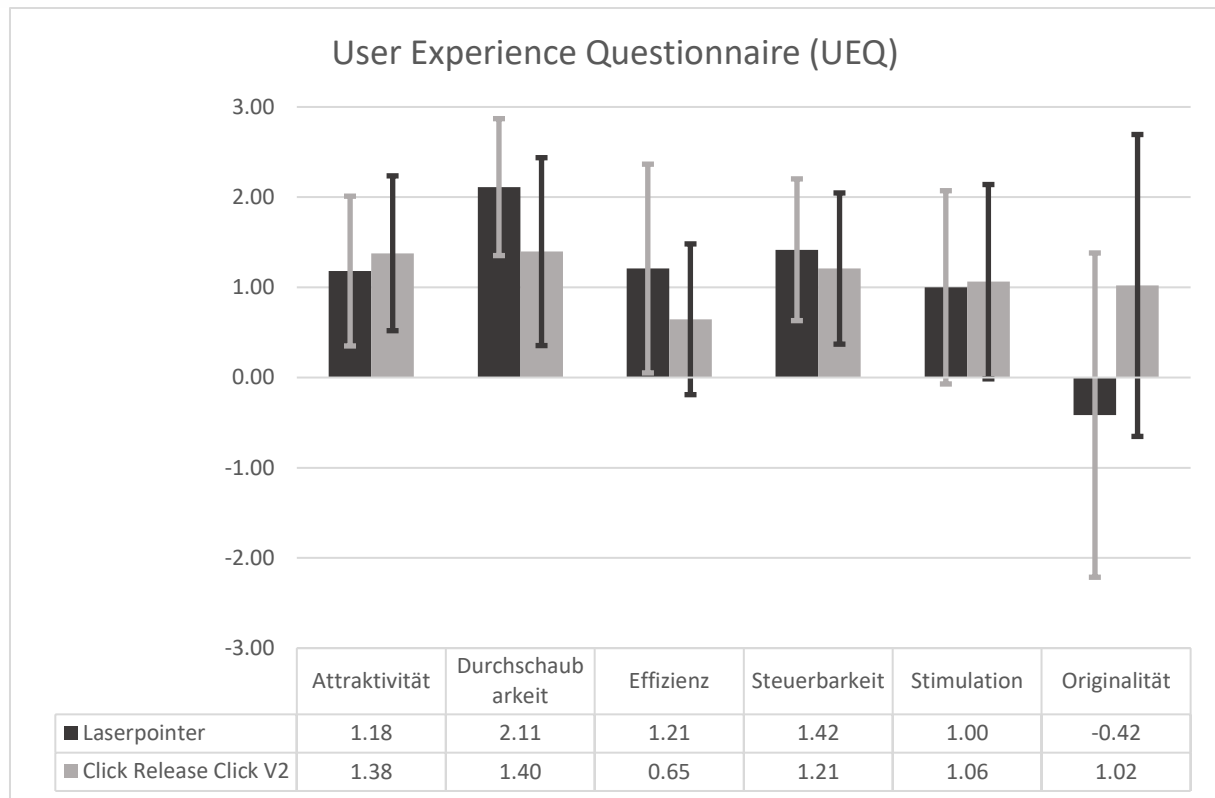


Abbildung 24: Die subjektiven Einschätzungen der Studienteilnehmern zu den beiden Eingabemethoden. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an.

Das User Experience Questionnaire, welchen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer während der Nutzerstudie ausgefüllt hatten, wurde mithilfe des von den Autoren zur Verfügung gestellten Excel-Tools ausgewertet [46]. Dieses Tool führt bereits einen t-Test durch, der für diese Studie aufgrund der Art und Weise, wie die Daten erhoben wurden, leicht umkonfiguriert wurde, um dem t-Test, welcher für die WPM- und Fehlerraten-Metriken verwendet wurde, zu entsprechen. Abbildung 24 zeigt die berechneten durchschnittlichen Einschätzungen der Versuchspersonen zu den beiden getesteten Eingabemethoden. Die Skala geht von minus drei bis plus drei. Positive Werte entsprechen einer positiven Einschätzung in dem jeweiligen Punkt, negative Werte weisen auf eine negative Bewertung hin. Beide getesteten Methoden wurden in fünf der sechs Kategorien grundsätzlich positiv bewertet. Die Unterschiede in diesen Kategorien sind allerdings nicht statistisch relevant, wie der t-Test gezeigt hat (Attraktivität $p = 0.48$, Durchschaubarkeit $p = 0.07$, Effizienz $p = 0.06$, Steuerbarkeit $p = 0.32$ und Stimulation $p = 0.84$). Allein der Unterschied im Wert «Originalität» ist signifikant ($p = 0.04$) und zeigt, dass CLICK RELEASE CLICK V2 in diesem Punkt besser bewertet wurde als die Laserpointer-Tastatur.

Eine detaillierte, pro Teilnehmer und Teilnehmerin aufgeschlüsselte Zusammenstellung der Mess- und der Umfrageresultate befindet sich in Anhang G und Anhang H.

7 Diskussion

Es hat sich gezeigt, dass der erarbeitete Prototyp die Erwartungen bezüglich der Geschwindigkeit nicht erfüllen kann. Ungeübte Nutzer und Nutzerinnen scheinen mit der für den Vergleich gewählten und weit verbreiteten Laserpointer-Methode deutlich schneller zu sein als mit SektorInput, wobei kein signifikanter Unterschied bei der Fehlerrate festgestellt worden ist. Dies bedeutet, dass (H1) nicht bestätigt werden konnte. Auch (H2) muss aufgrund der gesammelten Resultate verworfen werden, weil die mit SektorInput durchschnittlich erzielte Geschwindigkeit von 4.76 WPM für Sätze deutlich tiefer ist als die von Yu et al. gemessene Geschwindigkeit von 8.84 WPM für PizzaText, welche Novizen bei ihrer ersten Test-Sitzung erreicht haben [22]. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte der massiv erweiterte Zeichensatz bieten. Während PizzaText nur Grossbuchstaben enthält, können mit SektorInput alle Zeichen der Schweizer QWERTZ-Tastatur eingegeben werden. Dadurch wird es jedoch aufwändiger, ein Zeichen zu finden und gewisse Zeichen, wie beispielsweise Umlaute und Sonderzeichen, welche nicht auf der ersten Sonderzeichen-Ansicht zu finden sind, benötigten wesentlich mehr Aktionen zur Eingabe. Ausserdem wird SektorInput mit nur einer Hand bedient, was ebenfalls einen negativen Effekt auf die Geschwindigkeit haben könnte. (H3) kann hingegen als erfüllt betrachtet werden. Zwischen den Geschwindigkeiten der Laserpointer-Tastatur und SektorInput in Bezug auf zufällige Zeichenfolgen sind keine signifikanten Unterschiede festgestellt worden und dies, obwohl SektorInput mehr Zeichen unterstützt. Und die Fehlerrate weist sogar signifikante Unterschiede zugunsten der eigenen Methode auf.

Allerdings waren die meisten Unterschiede in den Mess- und Umfrageergebnissen nicht signifikant. Dies könnte an der geringen Teilnehmerzahl liegen. Auch bei dem zweiten Nutzertest war die Teilnehmerzahl zu gering, um aussagekräftige Schlüsse ziehen zu können.

Die Anforderung, einen Kriterienkatalog auszuarbeiten, ist erfüllt worden. Die Auswahl gängiger Metriken für die Bewertung von Eingabemethoden und der Einsatz eines bestehenden und geprüften Fragebogens für die subjektive Einschätzung der Testpersonen hat dazu geführt, dass die in der Studie gesammelten Daten vergleichbar und relevant sind. Und durch das frühzeitige Testen der Logging-Komponente haben gravierende Fehler verhindert werden können, welche zu unbrauchbaren Daten geführt hätten.

Des Weiteren hat es sich bewährt, auch bei der Entwicklung eines Prototyps auf die Code-Qualität zu achten. Dies hat es ermöglicht, während der inkrementellen Entwicklung und Verbesserung der Eingabemethoden schnell Änderungen vorzunehmen.

Aus den Nutzertests und der Studie ergeben sich ausserdem weitere Erkenntnisse. Für die subjektive Bewertung einer Methode spielte Stress eine wichtige Rolle. Das automatische Umschalten in die Variantenauswahl, nachdem Anwenderinnen und Anwendern eine gewisse Zeit auf einem Zeichen verharren haben, ist bei den meisten Teilnehmerinnen und Teilnehmern des ersten Nutzertests überhaupt nicht gut angekommen. Und auch mögliche Fehlerquellen, wie das unbeabsichtigte Abbrechen einer Eingabe, wenn beispielsweise der Daumen vom Touchpad gehoben wird, ist als unangenehm empfunden worden. Es scheint wichtig zu sein, den Nutzern und Nutzerinnen ein Gefühl von Kontrolle zu vermitteln.

Ein weiteres Problem hat in der zu niedrigen Auflösung des Displays bestanden. Obwohl für sämtliche Tests die HTC Vive Pro verwendet worden ist, die mit 1440 * 1600 Pixeln pro Auge (siehe Kapitel 5.4) die höchste Auflösung des gesamten Sortiments von HTC und Oculus aufweist, hat es immer wieder Rückmeldungen gegeben, weil die Probanden Schwierigkeiten gehabt haben, Texte zu lesen. Erschwerend kommt hinzu, dass bereits ein leichtes Verrutschen des Headsets zu einer erheblichen Einbusse in der Sehschärfe führt.

8 Ausblick

Der gewählte Anwendungsfall bezieht sich auf die Verwendung durch Personen, welche keine oder nur wenig Erfahrung mit der Texteingabe in VR haben. Trotzdem wäre es interessant, zu untersuchen, wie sich die Eingabegeschwindigkeit und die Fehlerrate mit zunehmender Übung verändern. Möglicherweise bietet eine der hier erarbeiteten Varianten bei häufigerem oder längerem Gebrauch einen Vorteil gegenüber der Laserpointer-Tastatur.

Weiter könnte versucht werden, eine höhere Eingabegeschwindigkeit zu erzielen, indem beide Controller verwendet werden. Dazu müsste sicherlich die Anzeige ein wenig angepasst werden.

Ausgereifere Zeichen- oder gar Wortvorschläge könnten ebenfalls einen erheblichen Effekt auf die Eingabegeschwindigkeit haben. Gemäss den Rückmeldungen, welche im zweiten Nutzertest gesammelt worden sind, hat die Zeichenvorhersage nicht gut abgeschnitten, weil die Relevanz zu tief gewesen und der Suchaufwand für den nächsten Buchstaben durch die Anzeige der Vorschläge grösser geworden ist. Es gilt zu testen, ob der Einsatz einer Wortvorhersage basierend auf den bereits eingegebenen Buchstaben die Relevanz der Vorschläge verbessern würde, wie einer der Teilnehmer vorgeschlagen hat. Und alternative Positionen für die Anzeige der vorgeschlagenen Buchstaben könnten möglicherweise den Aufwand reduzieren, um einen bestimmten Buchstaben zu finden.

Das Wechseln von der Übersicht auf die Unterauswahl und wieder zurück zur Übersicht geht jeweils mit einem erheblichen Zeitverlust einher. Aus diesem Grund könnte es von Vorteil sein, die Idee eines Nutzertest-Teilnehmers, die Zeichen nicht nach ihrer Position im Alphabet, sondern anhand der Häufigkeit der Bigramme zu gruppieren, weiter zu verfolgen. Dadurch müsste eventuell nicht so oft die Unterauswahl gewechselt werden.

Und zuletzt sollte weiter versucht werden, die Lesbarkeit der Tastaturanzeige zu erhöhen. Insbesondere falls die Methode für günstigere HMDs verwendet werden soll, welche über eine geringere Auflösung verfügen.

9 Anhänge

Anhang A Kriterienkatalog

Dieser Kriterienkatalog dient zur Untersuchung und zum Vergleich von Texteingabemethoden. Es werden zwischen objektiven Messkriterien und subjektiven Einschätzungen der Anwender unterschieden.

Geschwindigkeit (Messkriterium)

Die Geschwindigkeit wird in Wörter pro Minute (WPM) ausgedrückt und anhand folgender Formel berechnet:

$$WPM = \frac{|T|}{s} \times 60 \times \frac{1}{5}$$

$|T|$ = Anzahl der eingegebenen Zeichen

s = Dauer zwischen dem ersten und letzten eingegebenen Zeichen

Messungen sind unabhängig der Längen der verwendeten Worte miteinander vergleichbar.

Fehlerrate (Messkriterium)

Für die Fehlerrate werden drei zusammenhängende Metriken verwendet: Die Total Error Rate (TER) sowie ihre beiden Komponenten, die Corrected Error Rate (CER) und die Not Corrected Error Rate (NCER).

Die TER gibt an, wie viele der gemachten Eingaben fehlerhaft waren und berechnet sich folgendermassen:

$$TER = \frac{INF + IF}{C + INF + IF} \times 100\%$$

INF = Incorrect Not Fixed, Anzahl nicht korrigierter Fehler

IF = Incorrect Fixed, Anzahl korrigierter Fehler

C = Correct, Anzahl korrekt eingegebener Zeichen

Die Anzahl der nicht korrigierter Fehler (INF) entspricht der Minimum String Distance, auch als Levensthein-Distanz bekannt, zwischen dem einzugebenden und dem tatsächlich eingegebenen Text. Die Minimum String Distance gibt dabei die Mindestanzahl an Zeichen an, welche gelöscht, hinzugefügt oder ausgetauscht werden müssen, um aus dem tatsächlich eingegebenen Text den einzugebenden Text zu machen.

Die Anzahl der inkorrekt eingegebenen, aber korrigierten Zeichen (IF) kann durch das Mitzählen aller Korrektur-Inputs bestimmt werden

Und schliesslich kann mit folgender Formel bestimmt werden, wie viele der Zeichen korrekt eingegeben worden sind:

$$\max(|P|, |T|) - INF$$

$|P|$ = Länge des einzugebenden Textes

$|T|$ = Länge des tatsächlich eingegebenen Textes

Die TER kann in ihre Komponenten aufgeschlüsselt werden, um genauere Aussagen zur Art und zu den möglichen Ursachen der Fehler zu treffen:

$$CER = Total\ ER - NCER = \frac{IF}{C + INF + IF} \times 100\%$$

$$NCER = Total\ ER - CER = \frac{INF}{C + INF + IF} \times 100\%$$

Subjektive Einschätzung

Für die subjektive Einschätzung der Eingabemethode kommt das User Experience Questionnaire (UEQ) von Laugwitz, Schrepp und Held (2008, *Construction and evaluation of a user experience questionnaire*) zum Einsatz. Dieser Fragebogen, welcher von den Studienteilnehmerinnen und -Teilnehmern direkt nach der Verwendung der Texteingabemethode ausgefüllt werden soll, umfasst 28 Fragen und ermittelt so eine Einschätzung in den folgenden fünf Kategorien:

- Effizienz
- Verständlichkeit
- Verlässlichkeit
- Stimulation
- Neuheit

Der Fragebogen, eine detaillierte Anleitung zur Verwendung, sowie ein Excel-Tool für die anschliessende Auswertung können von <https://www.ueq-online.org/> heruntergeladen werden.

Anhang B Beobachtungen und Aussagen aus dem Nutzertest 1

Methode Touch

Beobachtungen:

- Die Testperson hat den Controller mit einer Hand wie ein Smartphone gehalten und die Zeichen mit dem Zeigefinger der anderen Hand eingegeben (1 Teilnehmer)
- Es gab immer wieder Fehleingaben, weil die Zeit, die der Benutzer über Charaktergruppe oder einem Zeichen mit Variationen harren muss, bis die Anzeige auf die Unterauswahl schaltet, zu kurz war (1 Teilnehmer)

Aussagen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer:

- Es ist schwierig, den gewünschten Sektor auf Anhieb zu treffen, weil man in der virtuellen Umgebung den Finger nicht sehen kann / Es wäre praktisch, wenn man die Hand sehen könnte (4 Teilnehmer)
- Das Eingeben ist sehr stressig, weil schnell Fehler passieren / weil man versehentlich einen Sektor auswählt, wenn man zu lange darauf bleibt (2 Teilnehmer)
- Im oberen Bereich war das Auswählen des ersten Sektors einfacher als im unteren Bereich (1 Teilnehmer)
- Das Löschen von Zeichen und das Umschalten zwischen Klein- und Grossschreibung ging sehr gut (1 Teilnehmer)
- Es gab schnell einen Lerneffekt (1 Teilnehmer)
- Das Finden der Zeichen auf der Tastatur war schwierig, evtl. weil das Alphabet linear angeordnet war, was man im Alltag nicht so oft antrifft (1 Teilnehmer)
- Es war angenehm, Eingaben durch blosses Berühren und nicht durch Klicken machen zu können (1 Teilnehmer)
- Es war schwierig, den Finger über das Touchpad zu bewegen, ohne den Finger anzuheben (1 Teilnehmer)
- Evtl. wäre es hilfreich, in der Mitte des Touchpads einen Bereich zu platzieren, wo der Anwender seinen Finger initial platzieren kann, damit der erste Sektor besser getroffen werden kann (1 Teilnehmer)
- Es war lästig, auf das Umschalten von Charaktervarianten warten zu müssen (1 Teilnehmer)

Methode Click Hold

Beobachtungen:

- Die Testperson hat immer wieder falsche Eingaben gemacht, weil sie zu hastig versucht hat, ein Zeichen auszuwählen, möglicherweise weil sie durch die automatische Umschaltung auf eine Unterauswahl für Charaktervarianten zu gestresst war (1 Teilnehmer)
- Es zeigen sich schnell Lernresultate, z.B. ist das Umschalten zwischen klein- und Grossschreibung kein Problem (1 Teilnehmer)

Aussagen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer:

- Im Vergleich zu Touch macht diese Eingabemethode mehr das, was man will (1 Teilnehmer)
- War weniger gestresst wie bei Touch, weil man mehr Zeit hat, um einen Sektor zu wählen (1 Teilnehmer)

- Das Umschalten zwischen den Charaktervarianten ging gut (2 Teilnehmer)
- Es ist mühsam, den Finger während dem gedrückt halten über das Touchpad zu bewegen / Es passieren Fehler bei Bewegen während gedrückt halten, evtl. weil man zu wenig fest drückt (2 Teilnehmer)
- Das Umschalten zwischen den verschiedenen Sonderzeichen-Scheiben ging gut (1 Teilnehmer)
- Besser wie Touch, weil man die Fingerposition schon vor der Auswahl des ersten Sektors sieht (1 Teilnehmer)
- Es war stressig, wenn das Zeichen, auf welchem der Finger direkt nach dem Umschalten in die Unterauswahl einer Charaktergruppe, ein Buchstabe mit Varianten war, weil dann sofort der Timer für die nächste Umschaltung startete (1 Teilnehmer)
- Mache mit dem Finger auf dem Touchpad immer Kreisbewegungen, um zum gewünschten Sektor zu gelangen, obwohl man auch einer direkten Linie folgen könnte (1 Teilnehmer)

Methode Click Click

Beobachtungen:

- Testperson hat bei dieser Methode Gross-/Kleinschreibung jeweils vor der Zeichenwahl gemacht und nicht erst nach der Auswahl der Charaktergruppe. Wenn dies vergessen hatte, hat sie die Eingabe nochmals abgebrochen und von vorne begonnen. Dieselbe Person hat dies bei anderen Methoden auch schon anders gemacht. (1 Teilnehmer)
- Testperson lernt schnell, dass mehrere Zeichen derselben Scheibe schnell nacheinander eingegeben werden können, ohne dass die aktuelle Charakter-Scheibe verlassen werden muss (1 Teilnehmer)

Aussagen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer:

- Es ist cool / hilfreich, dass mehrere Zeichen derselben Gruppe oder Wiederholungen desselben Zeichens schnell nacheinander eingegeben werden können (3 Teilnehmer)
- Es ist schwierig, sich die Bedienung zu merken (1 Teilnehmer)
- Die Methode war angenehm zu bedienen (1 Teilnehmer)
- Hatte zu Beginn Mühe mit dem Umschalten der Sonderzeichen-Scheiben
- Dass der Finger nach dem ersten Klick auf dem Touchpad bleiben muss und auch ein kurzes, unabsichtliches Anheben die Eingabe abbricht ist sehr mühsam, insbesondere wenn gleichzeitig noch der Trigger gedrückt werden muss, um die Gross-/Kleinschreibung oder die Sonderzeichenauswahl umzuschalten (1 Teilnehmer)
- Es ist unangenehm, immer wieder den Finger vom Touchpad heben zu müssen (1 Teilnehmer)

Methode Click Release Click

Aussagen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer:

- Die Eingabemethode lässt sich sehr angenehm bedienen (1 Teilnehmer)
- War während der Eingabe nicht gestresst (1 Teilnehmer)
- Die Eingabemethode macht das, was man will (1 Teilnehmer)
- Die Eingabemethode ist schnell (1 Teilnehmer)
- Viel angenehmer als Click Hold

- Es ist super, dass man das Touchpad während der Eingabe den Finger nie von dem Touchpad heben muss (1 Teilnehmer)
- Es gibt Sicherheit, dass man den Finger jederzeit vom Touchpad heben kann (1 Teilnehmer)
- Es ist mühsam, dass man eine Eingabe nicht abbrechen kann, wenn man versehentlich eine falsche Zeichengruppe gewählt hat (2 Teilnehmer)
- Es ist hilfreich, dass man jederzeit sieht, wo sich sein Finger befindet, solange man das Touchpad berührt (1 Teilnehmer)
- Es stört, dass sich das Auswahlpattern für die Auswahl von Charaktervarianten plötzlich ändert (klicken und halten) (1 Teilnehmer)
- Es kann passieren, dass man abrutscht (aus Versehen loslässt), wenn man eine Charaktervariante auswählen möchte, da man das Touchpad gedrückt halten muss, während man mit dem Finger den Sektor wechselt (1 Teilnehmer)

Eingabemethode-unabhängige Anmerkungen

- Der Kontrast der Anzeige ist zu niedrig und monoton (grau) (1 Teilnehmer)
- Die Eingabemethoden haben eine Ähnlichkeit zu Smartphone-Tastaturen bezüglich der Sonderzeichen (1 Teilnehmer)
- Die Schrift lässt sich teilweise schlecht lesen / Zeichen können manchmal nicht gut erkannt werden (1 Teilnehmer)
- Es ist schwierig, die Buchstaben der Gruppen auf der Übersicht zu erfassen, resp. zu finden (1 Teilnehmer)
- Die Leer- und Zurücktasten sind intuitiv genau an der richtigen Stelle. Vielleicht, weil man die Anzeige automatisch wie eine Uhr liest? (1 Teilnehmer)
- Es wäre praktisch, den Cursor im Eingabefeld nach links und nach rechts zu bewegen, damit man Korrekturen vornehmen kann, ohne alles nachfolgenden Zeichen zu löschen (1 Teilnehmer)
- Es ist mühsam, ständig zwischen dem Eingabefeld und der Tastaturanzeige hin und her schauen zu müssen. Es wäre besser, wenn die Tastaturanzeige fix neben dem Eingabefeld platziert wäre. (1 Teilnehmer)
- Dachte zuerst, die natürliche Ordnung der Buchstaben des Alphabets würden das Finden von Zeichen erschweren, was aber nicht der Fall war, da man auf der Übersicht immer alle Buchstaben sieht. (1 Teilnehmer)

Anhang C Resultate Fragebogen Nutzertest 1

Die Befragungen wurden mündlich durchgeführt. Die Antworten der Teilnehmerinnen und Teilnehmer wurden paraphrasiert niedergeschrieben.

Teilnehmer/-in 1

Bitte sortieren Sie die Eingabemethoden von 1 – hat mir am besten gefallen – bis 4 – hat mir am wenigsten gut gefallen:

1. Click Hold
2. Click Release Click
3. Touch
4. Click Click

Warum hat Ihnen 1 am besten gefallen?

Die Eingabemethode macht das, was ich will. Es kommt kein Stress wegen Zeitdruck auf. Die Methode fühlt sich am bekanntesten und natürlichsten an, die Lernkurve ist nicht so steil.

Welche der vier Methoden kam ihnen am schnellsten vor?

Click Hold oder Click Release Click

Bei welcher Methode glauben Sie am wenigsten Fehler gemacht zu haben?

Click Release Click

Bei welcher Methode glauben Sie am meisten Fehler gemacht zu haben?

Touch

Welche Display-Position bevorzugen Sie? Und Warum?

-

Wie fanden Sie es, dass die Anzeige der Zeichenauswahl an den Controller gebunden war?

Das war gut, weil das Prinzip von anderen VR-Tastaturen schon bekannt ist. Allerdings wird keine Verbindung zwischen der Tastatur und dem Eingabefeld hergestellt, es ist somit wie bei einem klassischen Computer, wo der Anwender etwas auf der Tastatur eintippt und auf dem Bildschirm Zeichen erscheinen. Eventuell könnte man mit den Möglichkeiten von VR einen näheren Bezug zwischen den beiden Elementen schaffen.

Gibt es weitere Anmerkungen?

Das Blickfeld des HMD ist zu klein. Es könnte demnach sinnvoll sein, den Inhalt des Eingabefelds dupliziert auf dem Controller anzuzeigen. Ausserdem wäre es gut, man könnte bei allen Eingabemethoden Falscheingaben abbrechen. Das Feedback, dass ein Zeichen eingegeben wurde, war aber ok.

Teilnehmer/-in 2

Bitte sortieren Sie die Eingabemethoden von 1 – hat mir am besten gefallen – bis 4 – hat mir am wenigsten gut gefallen:

1. Click Click
2. Click Release Click (etwa gleich wie 3)
3. Touch (etwa gleich wie 2)
4. Click Hold

Warum hat Ihnen 1 am besten gefallen?

Weil man schnell mehrere Zeichen hintereinander eingeben kann, wenn sie sich in derselben Zeichengruppe befinden.

Welche der vier Methoden kam ihnen am schnellsten vor?

Click Release Click

Bei welcher Methode glauben Sie am wenigsten Fehler gemacht zu haben?

Click Release Click

Bei welcher Methode glauben Sie am meisten Fehler gemacht zu haben?

Click Click

Welche Display-Position bevorzugen Sie? Und Warum?

Oben, weil man da den Kopf nicht so sehr hin und her bewegen muss, um den Blick von der Tastatur auf das Eingabefeld, oder umgekehrt, zu wechseln.

Wie fanden Sie es, dass die Anzeige der Zeichenauswahl an den Controller gebunden war?

Ist gut, nicht speziell aufgefallen.

Gibt es weitere Anmerkungen?

Es ist zwar nicht negativ aufgefallen, aber es wäre eventuell gut, man könnte die Eingabe jederzeit abbrechen. Das Feedback für die Zeicheneingabe war gut.

Teilnehmer/-in 3

Bitte sortieren Sie die Eingabemethoden von 1 – hat mir am besten gefallen – bis 4 – hat mir am wenigsten gut gefallen:

1. Click Release Click
2. Click Hold
3. Click Click
4. Touch

Warum hat Ihnen 1 am besten gefallen?

Wegen dem «Relax-Faktor», diese Methode hat sich insgesamt am wenigsten stressig angefühlt, weil jederzeit losgelassen werden kann, ohne dass dadurch die Eingabe abgebrochen wird.

Welche der vier Methoden kam ihnen am schnellsten vor?

Click Click oder Click Release Click. Insbesondere hilft bei Click Click, dass man eine Falscheingabe abbrechen kann.

Bei welcher Methode glauben Sie am wenigsten Fehler gemacht zu haben?

Click Click

Bei welcher Methode glauben Sie am meisten Fehler gemacht zu haben?

Touch

Welche Display-Position bevorzugen Sie? Und Warum?

Ich dachte zuerst, oben wäre besser, weil so die Tastatur und das Eingabefeld gleichzeitig gesehen werden können. Allerdings sind die beiden Elemente unterschiedlich weit weg und somit nicht auf derselben Fokusebene. Aus diesem Grund waren beide Positionen etwa gleich gut.

Wie fanden Sie es, dass die Anzeige der Zeichenauswahl an den Controller gebunden war?

Es wäre besser, die Tastatur wäre fix an das Eingabefeld gebunden. Möglicherweise wäre es sogar noch besser, wenn das Eingabefeld ebenfalls an den Controller gebunden wäre.

Gibt es weitere Anmerkungen?

Das Feedback, wann ein Zeichen eingegeben wurde, war kein Problem.

Teilnehmer/-in 4

Bitte sortieren Sie die Eingabemethoden von 1 – hat mir am besten gefallen – bis 4 – hat mir am wenigsten gut gefallen:

1. Click Click
2. Click Release Click
3. Click Hold
4. Touch

Warum hat Ihnen 1 am besten gefallen?

Man kann Eingaben abbrechen.

Welche der vier Methoden kam ihnen am schnellsten vor?

Click Click

Bei welcher Methode glauben Sie am wenigsten Fehler gemacht zu haben?

Click Click

Bei welcher Methode glauben Sie am meisten Fehler gemacht zu haben?

Touch

Welche Display-Position bevorzugen Sie? Und Warum?

Zumindest für die Touch-Methode ist es besser, wenn sich die Anzeige direkt über dem Touchpad befindet.

Wie fanden Sie es, dass die Anzeige der Zeichenauswahl an den Controller gebunden war?

Es ist gut, weil man so besser einschätzen kann, an welcher Stelle der Daumen das Touchpad berührt. Dafür ist es so schwieriger, die Tastatur und das Eingabefeld gleichzeitig im Blick zu behalten.

Gibt es weitere Anmerkungen?

Es könnte einfacher sein, wenn zusätzlich auch der aktuelle Inhalt vom Eingabefeld beim Controller angezeigt wird. Ein zusätzliches Feedback, wenn ein Zeichen eingegeben wurde, wurde nicht vermisst. Es wäre höchstens bei Touch sinnvoll, da alle anderen Methoden schon ein Feedback in der Form des Klickens beinhalten.

Anhang D Resultate Fragebogen Nutzertest 2

Die Befragungen wurden mündlich durchgeführt. Die Antworten der Teilnehmerinnen und Teilnehmer wurden paraphrasiert niedergeschrieben.

Teilnehmer/-in 2 (1. Teilnehmer des zweiten Nutzertests)

Welche der beiden vorgestellten Eingabemethoden hat Ihnen besser gefallen und warum?

Click Release Click V2, weil man weniger arbeiten muss, um einen Text einzugeben, da die Tastatur automatisch auf die Übersicht zurückschaltet, nachdem ein Zeichen eingegeben wurde.

Welche der beiden Eingabemethoden hat Ihnen bei der Benützung mehr Sicherheit vermittelt, resp. wo haben Sie weniger befürchtet, Fehleingaben zu machen?

Bei Click Stay

Welche der beiden Methoden kam Ihnen schneller vor?

Click Release Click V2, weil automatisch in die Übersicht zurück gewechselt wird.

Was hat Ihnen an der Zeichenvorhersage gefallen?

Die Vorhersage hat zum Teil funktioniert, d.h. es wurden manchmal Buchstaben vorgeschlagen, die auch verwendet werden konnten. Dies ermöglichte dann eine schnellere Auswahl des nächsten Zeichens.

Was hat Ihnen an der Zeichenvorhersage nicht gefallen, resp. was könnte noch verbessert werden?

Es gab Situationen, in denen das gewünschte Wort aufgrund der bereits eingegebenen Buchstaben klar zu sein schien, wo der nächste Buchstabe aber trotzdem nicht vorgeschlagen wurde.

Glauben Sie, dass Sie mithilfe der Zeichenvorhersage bei der Texteingabe schneller waren?

Ja, teilweise schon. Andererseits glaube ich nicht, dass ich deswegen je langsamer war.

Bevorzugen Sie die Eingabe mit oder ohne Zeichenvorhersage?

Mit, aber es geht auch ohne. Der Vorteil dadurch ist nicht gross.

Gibt es weitere Anmerkungen?

Der Nachteil von Click Release Click V2 gegenüber von Click Stay ist, dass Zeichen, welche sich in derselben Untergruppe befinden, nicht direkt und schnell hintereinander eingegeben werden können, weil die Anzeige dazwischen immer in die Übersicht zurückschaltet. Allerdings waren beide Methoden um Vieles angenehmer als die im ersten Nutzertest getesteten Methoden. Ausserdem war es hilfreich, dass der eingegebene Text beim zweiten Nutzertest nochmals direkt über der Tastatur angezeigt wurde.

Teilnehmer/-in 3 (2. Teilnehmer/-in des zweiten Nutzertests)

Welche der beiden vorgestellten Eingabemethoden hat Ihnen besser gefallen und warum?

Click Stay, weil man häufiger die Unterauswahl nicht verlassen musste, da sich das nächste Zeichen in derselben Gruppe befand. Ausserdem machte diese Methode nichts selbstständig, wie beispielsweise in die Übersicht zurückschalten.

Welche der beiden Eingabemethoden hat Ihnen bei der Benützung mehr Sicherheit vermittelt, resp. wo haben Sie weniger befürchtet, Fehleingaben zu machen?

Bei Click Stay

Welche der beiden Methoden kam Ihnen schneller vor?

Click Release Click V2, allerdings nur knapp. Jedenfalls fühlt sich diese Methode hektischer an.

Was hat Ihnen an der Zeichenvorhersage gefallen?

Man ist bei der Texteingabe ein wenig schneller. Ausserdem durch die Vorhersage höchstens Vorteile und keine Nachteile.

Was hat Ihnen an der Zeichenvorhersage nicht gefallen, resp. was könnte noch verbessert werden?

Oft wurden die falschen Zeichen vorhergesagt. Und zumindest bei Click Stay wäre es von Vorteil gewesen, wenn die Vorhersagen auch auf der Unteransicht angezeigt worden wären.

Glauben Sie, dass Sie mithilfe der Zeichenvorhersage bei der Texteingabe schneller waren?

Ja, grundsätzlich schon. Ich war auf jeden Fall nicht langsamer.

Bevorzugen Sie die Eingabe mit oder ohne Zeichenvorhersage?

Mit, weil die Vorhersage nur Vorteile und keine Nachteile bringt. Die in diesem Design andere Position der Enter- und der Lösch Taste hat auch nicht gestört. Ausserdem wurde durch die Möglichkeit, einen Buchstaben über die Vorhersage direkt statt über das Untermenü einzugeben, jeweils ein kleines Belohnungsgefühl ausgelöst.

Gibt es weitere Anmerkungen?

Gerade bei Click Stay wäre statt der alphabetischen eine Gruppierung besser, welche die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass das nächste, einzugebende Zeichen sich auf derselben Unterauswahl befindet. Die alphabetische Sortierung und Gruppierung haben nicht geholfen, um Buchstaben schneller zu finden. Die eingebaute, zweite Anzeige des eingegebenen Textes direkt über der Tastatur hat ebenfalls nicht wirklich geholfen und ich habe sie die meiste Zeit ignoriert, wahrscheinlich, weil ich sowieso immer wieder auf den Vorlagetext schauen musste. Ausserdem finde ich immer noch, dass die Art und Weise, wie ein Buchstabenakzent (z.B. ä, à, usw.) eingegeben werden muss, einen Bruch im Bedienkonzept darstellt, der stört.

Teilnehmer/-in 5 (3. Teilnehmer/-in des zweiten Nutzertests)

Welche der beiden vorgestellten Eingabemethoden hat Ihnen besser gefallen und warum?

Click Release Click V2, weil man weniger Aktionen für die Eingabe benötigt. Es ist ausserdem gut, dass trotzdem mehrere gleiche Zeichen schnell hintereinander eingegeben werden können, da in der deutschen Sprache häufig Doppelkonsonanten vorkommen. Zudem erscheint diese Methode weniger fehleranfällig zu sein.

Welche der beiden Eingabemethoden hat Ihnen bei der Benützung mehr Sicherheit vermittelt, resp. wo haben Sie weniger befürchtet, Fehleingaben zu machen?

Click Release Click V2, weil weniger notwendige Aktionen zu weniger Fehlerrisiko führen.

Welche der beiden Methoden kam Ihnen schneller vor?

Click Stay, weil bei Click Release Click V2 die maximale Eingabegeschwindigkeit durch das Timeout begrenzt, der abgewartet werden muss, bis auf die Übersicht zurückgeschaltet wird. Gerade mit zunehmender Übung könnte man durch dieses Timeout immer mehr eingeschränkt werden.

Was hat Ihnen an der Zeichenvorhersage gefallen?

Man benötigt weniger Aktionen / Aufwand, um einen Text einzugeben. Die Position für die Zeichenvorschläge in der Mitte der Tastatur ist gut gewählt, da man sie schnell erreichen kann. Ausserdem war es interessant von einem technischen Standpunkt her.

Was hat Ihnen an der Zeichenvorhersage nicht gefallen, resp. was könnte noch verbessert werden?

Der Aufwand, um ein Zeichen zu suchen, war höher, weil sich nun jeder Buchstabe an bis zu zwei Positionen befinden kann. Dies führt zu einem geringeren Sicherheitsgefühl und hindert das Erlernen der Eingabemethode. Ich habe deshalb oft die Vorschläge komplett ignoriert.

Glauben Sie, dass Sie mithilfe der Zeichenvorhersage bei der Texteingabe schneller waren?

Nein, sondern langsamer.

Bevorzugen Sie die Eingabe mit oder ohne Zeichenvorhersage?

Ohne. Dadurch ist der Ort für jedes Zeichen fix. Die Vorschläge lenken eher ab. Allerdings könnte es hilfreicher sein, wenn statt einzelnen Buchstaben ganze Wörter vorgeschlagen werden würden.

Gibt es weitere Anmerkungen?

Den Trigger für das Umschalten zwischen Klein- und Grossschreibung zu nutzen ist intuitiv. Die beiden Methoden sind für kurze Texte sehr angenehm zu benützen. Das haptische Feedback beim Sektorwechsel ist gut. Des Weiteren gab es ein Fehlerpotential durch die Reihenfolge der getesteten Methoden. Um bei Click Stay schnell zu sein, drückt man häufig direkt nach der Eingabe eines Zeichens in der Mitte auf den Zurück-Sektor. Ist man sich diesen Ablauf gewohnt, kann es vorkommen, dass man bei Click Release Click V2 ausversehen die Eingabetaste, welche sich auf der selben Position befindet, drückt, nachdem die Tastatur auf die Übersicht zurückgeschaltet hat.

Anhang E Zeichen auf der Schweizer QWERTZ-Tastatur und die relativen Häufigkeiten

Zeichen	Rel. Häufigkeit
e	0.150767
n	0.088223
i	0.073191
r	0.072161
t	0.057206
s	0.052773
a	0.051424
d	0.043087
u	0.036533
h	0.036234
l	0.033656
o	0.025374
g	0.024865
c	0.024146
m	0.022043
b	0.015931
f	0.01351
.	0.012121
w	0.011395
k	0.010416
z	0.010053
v	0.007138
S	0.007078
p	0.007026
,	0.006745
l	0.005386
ü	0.005358
D	0.005221
ä	0.005027
A	0.004855
B	0.004504
0	0.003727
M	0.003706
E	0.003363
G	0.003248
K	0.003184
9	0.003099
F	0.003001
P	0.002777
2	0.002633
-	0.00258
H	0.002475
W	0.00246
ö	0.002445
R	0.002423
T	0.002403
L	0.002301
V	0.002252
I	0.002232
N	0.002011
J	0.001934

Zeichen	Rel. Häufigkeit
8	0.001675
y	0.001662
5	0.001455
Z	0.001429
3	0.001428
C	0.001399
(	0.001382
)	0.001349
4	0.001324
7	0.001259
6	0.00125
O	0.001157
U	0.001095
j	0.000969
x	0.000598
:	0.000596
/	0.00025
*	0.000227
;	0.00019
q	0.000178
Ü	0.000163
"	0.000155
Q	0.000144
é	0.000126
Ö	0.000106
Y	0.000094
%	0.000077
Ä	0.00007
X	0.000067
'	0.00006
á	0.000053
í	0.000037
&	0.000036
ó	0.00003
°	0.000022
!	0.00002
è	0.00002
?	0.000017
ç	0.000012
+	0.00001
ý	0.000009
É	0.000009
§	0.000009
â	0.000008
à	0.000007
ú	0.000007
ã	0.000006
ñ	0.000006
ô	0.000006
\$	0.000006
ë	0.000005
€	0.000004

Zeichen	Rel. Häufigkeit
ê	0.000004
Á	0.000002
'	0.000002
î	0.000002
ï	0.000002
£	0.000002
ò	0.000001
Ú	0.000001
ø	0.000001
>	0.000001
Í	0.000001
ì	0.000001
Î	0.000001
<	0.000001
û	0.000001
Ó	0.000001
~	0.000001
ù	0.000001
`	0
@	0
ÿ	0
À	0
È	0
Ñ	0
Ê	0
Ö	0
¢	0
¬	0
Ê	0
“	0
Ï	0
Ô	0
#	0
=	0
[	0
\	0
]	0
^	0
_	0
{	0
	0
}	0
!	0
Â	0
Ã	0
Ì	0
Ò	0
Û	0
Ü	0
Ý	0

Anhang F Bigramm-Wahrscheinlichkeiten

Diese Tabelle zeigt die berechneten Wahrscheinlichkeiten, dass auf den Buchstaben in der Zeile der Buchstabe in der jeweiligen Spalte folgt.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s
a	0.0056	0.0395	0.0484	0.0216	0.0024	0.0237	0.0297	0.0468	0.0126	0.0008	0.0109	0.1141	0.0572	0.1753	0.0006	0.0111	0.0003	0.1010	0.0732
b	0.1053	0.0045	0.0012	0.0017	0.5175	0.0024	0.0107	0.0046	0.0968	0.0018	0.0014	0.0404	0.0012	0.0051	0.0315	0.0004	0.0000	0.0630	0.0263
c	0.0176	0.0002	0.0015	0.0011	0.0109	0.0002	0.0002	0.8597	0.0073	0.0000	0.0616	0.0043	0.0013	0.0003	0.0194	0.0002	0.0003	0.0035	0.0011
d	0.1000	0.0022	0.0007	0.0022	0.5513	0.0016	0.0024	0.0027	0.2006	0.0004	0.0014	0.0109	0.0023	0.0040	0.0271	0.0008	0.0000	0.0214	0.0105
e	0.0044	0.0185	0.0099	0.0165	0.0039	0.0086	0.0211	0.0198	0.1353	0.0002	0.0069	0.0491	0.0321	0.2479	0.0027	0.0040	0.0002	0.2768	0.0737
f	0.1279	0.0071	0.0023	0.0013	0.1878	0.0838	0.0245	0.0047	0.0914	0.0006	0.0029	0.0664	0.0041	0.0110	0.0900	0.0014	0.0000	0.0962	0.0202
g	0.0582	0.0028	0.0002	0.0016	0.5595	0.0019	0.0048	0.0058	0.0524	0.0007	0.0090	0.0464	0.0029	0.0105	0.0173	0.0010	0.0000	0.0858	0.0519
h	0.1300	0.0041	0.0003	0.0031	0.2804	0.0030	0.0033	0.0014	0.0735	0.0005	0.0045	0.0598	0.0272	0.0515	0.0407	0.0007	0.0001	0.1311	0.0249
i	0.0105	0.0069	0.0911	0.0122	0.2102	0.0094	0.0468	0.0130	0.0022	0.0004	0.0134	0.0387	0.0396	0.2250	0.0254	0.0035	0.0003	0.0227	0.1047
j	0.4927	0.0003	0.0005	0.0008	0.2394	0.0002	0.0007	0.0016	0.0114	0.0002	0.0015	0.0004	0.0011	0.0011	0.0874	0.0006	0.0000	0.0010	0.0017
k	0.1701	0.0028	0.0003	0.0009	0.1957	0.0048	0.0060	0.0055	0.0612	0.0004	0.0052	0.0656	0.0144	0.0094	0.1347	0.0022	0.0001	0.0789	0.0296
l	0.1116	0.0224	0.0055	0.0307	0.1941	0.0113	0.0203	0.0036	0.1851	0.0006	0.0098	0.1113	0.0134	0.0104	0.0407	0.0041	0.0001	0.0041	0.0730
m	0.1812	0.0327	0.0017	0.0025	0.2588	0.0061	0.0074	0.0015	0.2154	0.0002	0.0027	0.0077	0.0840	0.0035	0.0504	0.0357	0.0001	0.0019	0.0210
n	0.0703	0.0098	0.0057	0.2223	0.1625	0.0139	0.1346	0.0088	0.0587	0.0006	0.0194	0.0074	0.0034	0.0488	0.0231	0.0018	0.0002	0.0047	0.0604
o	0.0037	0.0303	0.0436	0.0391	0.0033	0.0276	0.0278	0.0304	0.0042	0.0028	0.0135	0.0971	0.0618	0.2533	0.0076	0.0258	0.0002	0.1831	0.0508
p	0.1193	0.0007	0.0012	0.0029	0.1409	0.0607	0.0006	0.0446	0.1118	0.0002	0.0010	0.0623	0.0011	0.0008	0.0976	0.0531	0.0000	0.1883	0.0178
q	0.0155	0.0009	0.0005	0.0008	0.0017	0.0008	0.0001	0.0006	0.0127	0.0001	0.0002	0.0029	0.0013	0.0003	0.0015	0.0005	0.0009	0.0011	0.0026
r	0.0917	0.0282	0.0240	0.0835	0.1817	0.0192	0.0319	0.0205	0.0933	0.0006	0.0285	0.0231	0.0209	0.0373	0.0487	0.0057	0.0003	0.0180	0.0686
s	0.0411	0.0103	0.1766	0.0035	0.1564	0.0045	0.0141	0.0091	0.1014	0.0006	0.0096	0.0080	0.0068	0.0019	0.0459	0.0431	0.0003	0.0048	0.0760
t	0.0787	0.0048	0.0014	0.0023	0.4094	0.0047	0.0087	0.0255	0.1040	0.0004	0.0040	0.0256	0.0056	0.0034	0.0369	0.0027	0.0002	0.0675	0.0569
u	0.0112	0.0121	0.0434	0.0149	0.0268	0.0745	0.0245	0.0048	0.0047	0.0003	0.0074	0.0249	0.0647	0.3366	0.0010	0.0146	0.0001	0.1508	0.1137
v	0.0488	0.0006	0.0004	0.0015	0.4148	0.0008	0.0024	0.0002	0.0998	0.0001	0.0004	0.0010	0.0003	0.0005	0.4191	0.0010	0.0000	0.0018	0.0019
w	0.2058	0.0004	0.0003	0.0005	0.3424	0.0003	0.0004	0.0017	0.2183	0.0022	0.0006	0.0010	0.0010	0.0022	0.0671	0.0002	0.0000	0.0015	0.0035
x	0.0840	0.0057	0.0073	0.0022	0.1384	0.0093	0.0012	0.0072	0.3111	0.0006	0.0115	0.0053	0.0050	0.0017	0.0271	0.1284	0.0004	0.0012	0.0052
y	0.0668	0.0163	0.0388	0.0298	0.0818	0.0034	0.0105	0.0030	0.0090	0.0014	0.0196	0.0630	0.1156	0.0784	0.0657	0.0919	0.0002	0.0496	0.1850
z	0.0308	0.0073	0.0005	0.0023	0.2647	0.0032	0.0045	0.0027	0.1045	0.0003	0.0031	0.0101	0.0026	0.0016	0.0218	0.0022	0.0001	0.0014	0.0045

VR Keyboard - Anhänge

	t	u	v	w	x	y	z
a	0.0743	0.1362	0.0045	0.0017	0.0017	0.0035	0.0035
b	0.0207	0.0508	0.0004	0.0048	0.0000	0.0024	0.0051
c	0.0033	0.0041	0.0001	0.0001	0.0000	0.0011	0.0006
d	0.0134	0.0369	0.0009	0.0042	0.0000	0.0014	0.0006
e	0.0340	0.0165	0.0024	0.0071	0.0027	0.0011	0.0045
f	0.1352	0.0330	0.0009	0.0032	0.0000	0.0003	0.0038
g	0.0491	0.0319	0.0006	0.0014	0.0000	0.0024	0.0019
h	0.1059	0.0309	0.0007	0.0168	0.0000	0.0033	0.0024
i	0.1048	0.0033	0.0094	0.0005	0.0007	0.0001	0.0053
j	0.0006	0.1558	0.0005	0.0002	0.0000	0.0002	0.0001
k	0.1310	0.0677	0.0017	0.0043	0.0000	0.0032	0.0042
l	0.0891	0.0398	0.0041	0.0032	0.0000	0.0051	0.0067
m	0.0315	0.0465	0.0008	0.0025	0.0001	0.0031	0.0012
n	0.0911	0.0199	0.0029	0.0056	0.0001	0.0014	0.0224
o	0.0372	0.0152	0.0114	0.0178	0.0021	0.0021	0.0081
p	0.0466	0.0419	0.0005	0.0004	0.0002	0.0024	0.0032
q	0.0015	0.9506	0.0022	0.0006	0.0001	0.0002	0.0001
r	0.0913	0.0468	0.0041	0.0131	0.0002	0.0025	0.0162
s	0.2507	0.0145	0.0037	0.0070	0.0000	0.0051	0.0050
t	0.0492	0.0435	0.0022	0.0138	0.0000	0.0042	0.0449
u	0.0587	0.0008	0.0023	0.0016	0.0009	0.0003	0.0045
v	0.0005	0.0020	0.0004	0.0004	0.0000	0.0011	0.0001
w	0.0005	0.1482	0.0001	0.0008	0.0000	0.0008	0.0000
x	0.1663	0.0346	0.0106	0.0028	0.0138	0.0124	0.0067
y	0.0393	0.0114	0.0033	0.0060	0.0012	0.0019	0.0069
z	0.0640	0.3634	0.0015	0.0937	0.0000	0.0043	0.0048

Anhang G Messresultate der Nutzerstudie**Verwendete Messresultate**

	CLICK RELEASE CLICK V2								LASERPOINTER							
	Sentence				Random				Sentence				Random			
	WPM	TER	CER	NCER	WPM	TER	CER	NCER	WPM	TER	CER	NCER	WPM	TER	CER	NCER
TN 1	4.8995	0.0000	0.0000	0.0000	4.0443	0.0000	0.0000	0.0000	14.0529	0.0000	0.0000	0.0000	2.3318	0.3611	0.3056	0.0556
TN 2	5.7465	0.0526	0.0526	0.0000	5.3976	0.1000	0.0000	0.1000	14.7508	0.0217	0.0217	0.0000	5.6723	0.0000	0.0000	0.0000
TN 3	3.2233	0.0893	0.0893	0.0000	3.8523	0.1000	0.0000	0.1000	8.0658	0.0000	0.0000	0.0000	2.6018	0.0833	0.0833	0.0000
TN 13 (ersetzt TN 4)	5.6598	0.0714	0.0238	0.0476	3.7253	0.0000	0.0000	0.0000	11.7056	0.0000	0.0000	0.0000	2.9533	0.1667	0.0833	0.0833
TN 5	5.5143	0.0000	0.0000	0.0000	3.7522	0.0000	0.0000	0.0000	14.2837	0.0000	0.0000	0.0000	7.7038	0.1000	0.0000	0.1000
TN 6	5.3079	0.0208	0.0208	0.0000	3.9796	0.0000	0.0000	0.0000	10.4049	0.0417	0.0417	0.0000	2.2981	0.2262	0.2262	0.0000
TN 7	3.3641	0.1034	0.1034	0.0000	3.5658	0.1000	0.0000	0.1000	7.7131	0.0000	0.0000	0.0000	3.9398	0.0000	0.0000	0.0000
TN 8	3.9932	0.1053	0.0263	0.0789	3.7865	0.0000	0.0000	0.0000	16.7195	0.0000	0.0000	0.0000	1.9522	0.3182	0.2727	0.0455
TN 9	5.2425	0.0000	0.0000	0.0000	2.8413	0.0000	0.0000	0.0000	9.6253	0.0855	0.0855	0.0000	2.7187	0.0833	0.0833	0.0000
TN 10	4.6297	0.0000	0.0000	0.0000	4.7210	0.1000	0.0000	0.1000	10.0196	0.0217	0.0217	0.0000	3.3278	0.2143	0.0714	0.1429
TN 11	5.5240	0.0000	0.0000	0.0000	4.6608	0.0000	0.0000	0.0000	10.2723	0.0217	0.0217	0.0000	6.0195	0.0833	0.0833	0.0000
TN 12	4.1227	0.0217	0.0217	0.0000	3.5605	0.0000	0.0000	0.0000	11.6841	0.0000	0.0000	0.0000	4.9388	0.0000	0.0000	0.0000

Aufgrund verfälschter Daten verworfen Messresultat

	CLICK RELEASE CLICK V2								LASERPOINTER							
	Sentence				Random				Sentence				Random			
	WPM	TER	CER	NCER	WPM	TER	CER	NCER	WPM	TER	CER	NCER	WPM	TER	CER	NCER
TN 4	4.3445	0.0526	0.0263	0.0263	3.3034	0.0833	0.0833	0.0000	8.4609	0.1618	0.1471	0.0147	4.5932	0.1667	0.0833	0.0833

TN: Teilnehmer, **WPM:** Words per Minute, **TER:** Total Error Rate, **CER:** Corrected Error Rate, **NCER:** Not Corrected Error Rate

Anhang H Auswertung des User Experience Questionnaires**Laserpointer-Tastatur**

	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8	F 9	F 10	F 11	F 12	F 13	F 14	F 15	F 16	F 17	F 18	F 19	F 20	F 21	F 22	F 23	F 24	F 25	F 26
TN 1	6	6	3	2	3	6	5	6	2	3	5	2	6	6	4	6	3	2	3	5	4	4	7	3	2	5
TN 2	5	7	5	2	2	4	5	7	3	6	5	2	6	5	2	6	2	5	3	4	2	4	2	4	3	3
TN 3	6	6	3	1	2	5	6	6	2	4	5	2	6	5	4	6	2	4	2	6		5	2	3	2	3
TN 13 (ersetzt TN 4)	5	7	7	2	4	4	3	6	4	7	3	3	6	4	2	6	2	2	2	5	2	7	1	6	3	2
TN 5	5	6	3	1	3	5	5	6	2	3	5	3	6	5	5	5	3	2	3	6	2	5	1	3	3	5
TN 6	7	7	3	1	3	5	6	7	1	4	6	1	7	5	5	6	1	1	1	7	1	7	1	4	1	5
TN 7	7	7	1	1	2	6	7	6	2	1	6	1	7	7	7	6	1	1	2	6	1	6	2	2	2	7
TN 8	3	6	6	3	4	2	2	7	7	7	4	4	6	4	1	2	6	6	2	3	4	2	2	4	4	1
TN 9	6	6	6	6	4	4	3	6	1	7	6	3	6	4	1	6	2	2	4	7	1	4	1	3	2	1
TN 10	5	3	6	2	3	4	4	3	3	4	4	4	6	5	2	4	4	3	4	3	4	4	4	5	4	2
TN 11	6	7	3	1	3	6	6	7	5	6	4	2	7	4	3	5	1	2	2	4	1	4	1	3	4	5
TN 12	6	6	4	1	1	5	5	7	4	7	6	2	6	4	7	5	5	1	5	5	1	6	1	1	3	7

TN: Teilnehmer, F: Frage

Die Antworten von Teilnehmer 4 wurden nicht beachtet, weil die Messresultate aufgrund Verfälschungen ausgeschlossen wurden mussten.

	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8	F 9	F 10	F 11	F 12	F 13	F 14	F 15	F 16	F 17	F 18	F 19	F 20	F 21	F 22	F 23	F 24	F 25	F 26
TN 4	6	6	5	1	3	4	4	6	4	5	5	2	7	5	4	5	4	5	2	2	2	5	2	4	3	4

CLICK RELEASE CLICK V2

	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8	F 9	F 10	F 11	F 12	F 13	F 14	F 15	F 16	F 17	F 18	F 19	F 20	F 21	F 22	F 23	F 24	F 25	F 26
TN 1	5	5	3	3	3	5	5	6	2	6	4	3	6	6	2	5	2	4	2	5	3	4	2	3		4
TN 2	5	7	2	3	3	5	5	6	3	2	5	2	5	5	6	5	3	2	5	5	2	5	3	3	3	6
TN 3	6	6	5	6	6	5	5	7	4	5	5	2	5	5	4	4	1	4	2	2	4	5	2	3	3	5
TN 13 (ersetzt TN 4)	6	6	2	1	4	7	7	7	4	1	6	2	6	7	7	6	4	2	4	5	2	4	3	2	2	7
TN 5	4	6	4	1	4	4	5	6	5	3	4	3	7	5	4	5	1	3	2	3	1	5	1	3	3	5
TN 6	7	5	1	4	3	7	7	5	3	1	7	2	3	5	6	5	5	1	3	6	4	5	2	2	4	6
TN 7	6	7	2	1	3	4	5	5	4	3	5	3	5	5	5	6	2	2	2	5	2	5	2	2	2	6
TN 8	2	3	2	6	6	1	1	3	7	2	2	6	2	2	6	2	5	6	6	1	6	2	5	6	6	6
TN 9	6	6	3	1	3	6	6	4	3	5	6	1	6	5	4	6	3	3	2	5	2	4	2	2	1	5
TN 10	5	5	2	5	4	6	6	3	6	2	3	3	3	5	5	3	4	3	5	3	2	4	3	2	2	5
TN 11	7	6	3	1	4	4	7	7	5	1	6	1	6	7	7	7	1	2	2	4	1	3	1	1	1	7
TN 12	7	5	2	5	2	6	7	5	2	1	6	2	3	6	6	3	3	2	5	6	3	6	2	3	4	7

TN: Teilnehmer, F: Frage

Die Antworten von Teilnehmer 4 wurden nicht beachtet, weil die Messresultate aufgrund Verfälschungen ausgeschlossen wurden mussten.

	F 1	F 2	F 3	F 4	F 5	F 6	F 7	F 8	F 9	F 10	F 11	F 12	F 13	F 14	F 15	F 16	F 17	F 18	F 19	F 20	F 21	F 22	F 23	F 24	F 25	F 26
TN 4	4	5	3	5	4	3	3	3	5	2	3	4	4	3	6	3	5	5	3	1	2	3	3	5	5	5

10 Verzeichnisse

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: VirtualBoy, ein Virtual Reality System zu Unterhaltungszwecken, welches 1995 auf den Markt kam [3].	1
Abbildung 2: Gemeinsame Präsentation von Microsoft und Cirque du Soleil an der Build-Konferenz 2017. Beide Firmen geben bekannt, dass sie zusammenarbeiten, um mithilfe der HoloLens die Bühnengestaltung zu vereinfachen [8].	2
Abbildung 3: Twiddler 3, die neueste Version der Chording-Tastatur [13].	4
Abbildung 4: Der Datenhandschuh von Kitty mit mehreren Kontaktstellen an jedem Finger [16].	5
Abbildung 5: Bei der Eingabemethode «PizzaText» wählt der Anwender erst mit einem der beiden Analogsticks einen Sektor (b) und dann mit dem anderen ein darin befindliches Zeichen aus (c). Durch Verweilen auf demselben Zeichen kann dieses erneut eingegeben werden (d) [22].	6
Abbildung 6: Kombination von GestureType und einer Vorhersage für das nächste Zeichen (Skizze).	9
Abbildung 7: Der HTC Vive Controller. Abbildung von der HTC Corporation [42].	16
Abbildung 8: Das erste Keyboard-Design mit der Übersicht (links), Unterauswahl (Mitte) und Variantenauswahl (rechts).	17
Abbildung 9: Skizzenhafte Darstellung der Funktionsweise von TOUCH.	17
Abbildung 10: Skizzenhafte Darstellung der Funktionsweise von CLICK HOLD.	18
Abbildung 11: Skizzenhafte Darstellung der Funktionsweise von CLICK CLICK.	18
Abbildung 12: Skizzenhafte Darstellung der Funktionsweise von CLICK RELEASE CLICK.	19
Abbildung 13: Der Versuchsaufbau für den ersten Nutzertest.	20
Abbildung 14: Die beiden untersuchten Displaypositionen. Links die Position direkt über dem Touchpad und rechts die etwas nach vorne versetzte Position.	21
Abbildung 15: Erweiterung des Designs um einen Zurück-Button.	23
Abbildung 16: Kumulierte Wahrscheinlichkeiten der Folgebuchstaben. Die x-Achse enthält die Anzahl der kumulierten Folgebuchstaben, auf der y-Achse ist der zugehörige Wahrscheinlichkeitswert abzulesen. Jede Linie steht für einen Ursprungsbuchstaben.	24
Abbildung 17: Tastaturlayout mit Buchstabenvorschlägen (hervorgehoben).	24
Abbildung 18: Anzeige des eingegebenen Textes direkt über dem Controller.	25
Abbildung 19: Die Laserpointer-Tastatur von SteamVR.	26
Abbildung 20: Words Per Minute Resultate der Nutzerstudie. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an.	29
Abbildung 21: Die in der Studie gemessenen Fehlerraten. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an.	30
Abbildung 22: Fehlerrate für nicht korrigierte Fehler. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an.	30
Abbildung 23: Fehlerrate für korrigierte Fehler. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an.	30
Abbildung 24: Die subjektiven Einschätzungen der Studienteilnehmern zu den beiden Eingabemethoden. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an.	31

10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung der in vorherigen Arbeiten untersuchten Texteingabemethoden.	10
Tabelle 2: Vergleich der Varianten der MSD-Fehlermetrik.	14
Tabelle 3: Platzierung der Eingabemethoden durch die Teilnehmer des ersten Nutzertests. Tiefere Zahlenwerte stehen für eine bessere Platzierung.	22

11 Literaturverzeichnis

- [1] Oculus, «Oculus Rift: Step Into the Game,» Kickstarter, 1 August 2012. [Online]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/1523379957/oculus-rift-step-into-the-game/description>. [Zugriff am 4 Juni 2019].
- [2] Wikipedia, «Virtual reality,» [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_reality. [Zugriff am 4 Juni 2019].
- [3] Evan-Amos, «Virtual Boy Set,» [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_Boy#/media/File:Virtual-Boy-Set.jpg. [Zugriff am 6 Juni 2019].
- [4] V. Savov, «HTC Vive priced at \$799, available in early April,» Vox Media, 21 Februar 2016. [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2016/2/21/11081462/htc-vive-consumer-edition-price-release-date-mwc-2016>. [Zugriff am 6 Juni 2019].
- [5] D. Seifert, «First look at Sony's new PlayStation VR headset,» Vox Media, 15 März 2016. [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2016/3/15/11225032/sony-playstation-vr-headset-photos-gdc-2016>. [Zugriff am 4 Juni 2019].
- [6] HP Development Company, «HP REVERB VIRTUAL REALITY HEADSET – PRO EDITION,» [Online]. Available: https://www8.hp.com/us/en/workstations/mixed-reality-headset/index.html?jumpid=in_r11260_us/en/psg/vr_ready_workstations/productmodule-mixed-reality-headset-learn-more. [Zugriff am 4 Juni 2019].
- [7] S. O'Kane, «Cirque du Soleil will use HoloLens to design sets and plan shows,» Vox Media, 11 Mai 2017. [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2017/5/11/15625724/cirque-du-soleil-microsoft-hololens-build-2017>. [Zugriff am 4 Juni 2019].
- [8] S. Stein. [Online]. Available: https://cnet4.cbsistatic.com/img/_k6dYg7kTHWOvsGwakWKgeEvO_o=/1092x0/2017/05/11/3de10933-d984-40d5-9606-24aaa0198f6c/screen-shot-2017-05-11-at-1-16-41-pm.png. [Zugriff am 6 Juni 2019].
- [9] M. McGill, D. Boland, R. Murray-Smith und S. Brewster, «A Dose of Reality: Overcoming Usability Challenges in VR Head-Mounted Displays,» in *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, Seoul, 2015.
- [10] J. Walker, B. Li, K. Vertanen und S. Kuhl, «Efficient Typing on a Visually Occluded Physical Keyboard,» in *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Denver, 2017.
- [11] K. Lyons, T. Starner, D. Plaisted, J. Fusia, A. Lyons, A. Drew und E. W. Looney, «Twiddler typing: one-handed chording text entry for mobile phones,» in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Wien, 2004.
- [12] A. S. Arif und W. Stuerzlinger, «Analysis of Text Entry Performance Metrics,» in *2009 IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity (TIC-STH)*, Toronto, 2009.
- [13] Tek Gear Inc., «T3 Step 2,» [Online]. Available: https://tgimages.s3.amazonaws.com/twiddler/wiki/T3_Step2.jpg. [Zugriff am 6 Juni 2019].
- [14] S. Sridhar, A. M. Feit, C. Theobalt und A. Oulasvirta, «Investigating the Dexterity of Multi-Finger Input for Mid-Air Text Entry,» in *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, Seoul, 2015.

- [15] D. A. Bowman, V. Q. Ly und J. M. Campbell, «Pinch Keyboard: Natural Text Input for Immersive Virtual Environments,» 2001.
- [16] F. Kuester, M. Chen, M. E. Phair und C. Mehring, «Towards keyboard independent touch typing in VR,» in *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*, Monterey, 2005.
- [17] M. Prätorius, D. Valkov, U. Burgbacher und K. Hinrichs, «DigiTap: an eyes-free VR/AR symbolic input device,» in *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, Edinburgh, 2014.
- [18] B. McCaul und A. Sutherland, «Predictive Text Entry in Immersive Environments,» in *Proceedings of the 2004 Virtual Reality (VR'04)*, Chicago, 2004.
- [19] X. Yi, C. Yu, M. Zhang, S. Gao, K. Sun und Y. Shi, «ATK: Enabling Ten-Finger Freehand Typing in Air Based on 3D Hand Tracking Data,» in *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, Charlotte, 2015.
- [20] Y. Lu, C. Yu, X. Yi, Y. Shi und S. Zhao, «BlindType: Eyes-Free Text Entry on Handheld Touchpad by Leveraging Thumb's Muscle Memory,» in *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, New York, 2017.
- [21] C. Yu, Y. Gu, Z. Yang, X. Yi, H. Luo und Y. Shi, «Tap, Dwell or Gesture?: Exploring Head-Based Text Entry Techniques for HMDs,» in *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Denver, 2017.
- [22] D. Yu, K. Fan, H. Zhang, D. Monteiro, W. Xu und H.-N. Liang, «PizzaText: Text Entry for Virtual Reality Systems Using Dual Thumbsticks,» *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Bd. 24, Nr. 11, pp. 2927-2935, 6 September 2018.
- [23] I. Poupyrev, N. Tomokazu und S. Weghorst, «Virtual Notepad: Handwriting in Immersive VR,» in *Proceedings. IEEE 1998 Virtual Reality Annual International Symposium*, Atlanta, 1998.
- [24] S. Frees, R. Khoun und G. D. Kessler, «Connecting the Dots: Simple Text Input in Immersive Environments,» in *IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)*, Alexandria, 2006.
- [25] L. Hoste und B. Signer, «SpeeG2: a speech- and gesture-based interface for efficient controller-free text input,» in *Proceedings of the 15th ACM on International conference on multimodal interaction*, Sydney, 2013.
- [26] S. Pick, A. S. Puika und T. W. Kuhlen, «SWIFTER: Design and evaluation of a speech-based text input metaphor for immersive virtual environments,» in *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, Greenville, 2016.
- [27] Samsung, «samsung.com,» [Online]. Available: [http:// downloadcenter.samsung.com/content/UM/201801/20180123103332177/DEU_KTMDVBEUL-3.0.7_180111.1.pdf](http://downloadcenter.samsung.com/content/UM/201801/20180123103332177/DEU_KTMDVBEUL-3.0.7_180111.1.pdf). [Zugriff am 11 März 2019].
- [28] J. J. Dudley, K. Vertanen und P. O. Kristensson, «Fast and Precise Touch-Based Text Entry for Head-Mounted Augmented Reality with Variable Occlusion,» in *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, New York, 2018.
- [29] E. Matias, I. S. MacKenzie und W. Buxton, «Half-QWERTY: a one-handed keyboard facilitating skill transfer from QWERTY,» in *Proceedings of the INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems*, Amsterdam, 1993.

- [30] M. Speicher, A. M. Feit, P. Ziegler und A. Krüger, «Selection-based Text Entry in Virtual Reality,» in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Montréal, 2018.
- [31] J. Grubert, L. Witzani, E. Ofek, M. Pahud, M. Kranz und P. O. Kristensson, «Text Entry in Immersive Head-Mounted Display-Based Virtual Reality Using Standard Keyboards,» in *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, Reutlingen, 2018.
- [32] J.-W. Lin, P.-H. Han, J.-Y. Lee, Y.-S. Chen, T.-W. Chang, K.-W. Chen und Y.-P. Hung, «Visualizing the keyboard in virtual reality for enhancing immersive experience,» in *ACM SIGGRAPH 2017 Posters*, Los Angeles, 2017.
- [33] I. S. MacKenzie und B. Ashtiani, «BlinkWrite: efficient text entry using eye blinks,» *Universal Access in the Information Society*, Bd. 10, Nr. 1, pp. 69-80, März 2011.
- [34] D. A. Bowman, C. J. Rhoton und M. S. Pinho, «Text Input Techniques for Immersive Virtual Environments: An Empirical Comparison,» in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Baltimore, 2002.
- [35] S. G. Hart und L. E. Staveland, «Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research,» in *Human Mental Workload*, P. A. Hancock und N. Meshkati, Hrsg., Amsterdam, North Holland Press, 1988, pp. 139-183.
- [36] B. Laugwitz, T. Held und M. Schrepp, «Construction and Evaluation of a User Experience Questionnaire,» in *HCI and Usability for Education and Work: 4th Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering of the Austrian Computer Society*, Graz, 2008.
- [37] J. Brooke, «SUS: a 'quick and dirty' usability scale,» in *Usability Evaluation In Industry*, P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester und I. L. McClelland, Hrsg., London, Taylor & Francis Ltd, 1996, pp. 189-194.
- [38] P. J. Gianaros, E. R. Muth, J. T. Mordkoff, M. E. Levine und R. M. Stern, «A questionnaire for the assessment of the multiple dimensions of motion sickness.,» *Aviation, space, and environmental medicine*, Bd. 72, Nr. 2, p. 115, 2001.
- [39] I. S. MacKenzie und R. W. Soukoreff, «A character-level error analysis technique for evaluating text entry methods,» in *Proceedings of the second Nordic conference on Human-computer interaction*, Aarhus, 2002.
- [40] R. W. Soukoreff und I. S. MacKenzie, «Metrics for text entry research: an evaluation of MSD and KSPC, and a new unified error metric,» in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Ft. Lauderdale, 2003.
- [41] HTC Corporation, «Vive Pro,» [Online]. Available: [https:// www.vive.com/us/product/vive-pro/](https://www.vive.com/us/product/vive-pro/). [Zugriff am 26 Mai 2019].
- [42] HTC Corporation, «VIVE Image Gallery,» [Online]. Available: [https:// www.vive.com/us/pr/newsroom-gallery/htcvive/](https://www.vive.com/us/pr/newsroom-gallery/htcvive/). [Zugriff am 26 Mai 2019].
- [43] M. Beißwenger, «Das Dortmunder Chat-Korpus,» *Zeitschrift für germanistische Linguistik*, Bd. 41, Nr. 1, pp. 161-164, 2013.
- [44] D. Goldhahn, T. Eckart und U. Quasthoff, «Building Large Monolingual Dictionaries at the Leipzig Corpora Collection: From 100 to 200 Languages.,» in *Proceedings of the 8th International Language Ressources and Evaluation (LREC'12)*, Istanbul, 2012.

- [45] Valve, «OpenVR SDK,» [Online]. Available: [https:// github.com/ValveSoftware/openvr](https://github.com/ValveSoftware/openvr).
[Zugriff am 31 Mai 2019].
- [46] M. Schrepp, «Compare Scale Means, V3,» [Online]. Available: [https:// www.ueq-online.org/
Material/Data_Analysis_Tools.zip](https://www.ueq-online.org/Material/Data_Analysis_Tools.zip). [Zugriff am 24 Mai 2019].