Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme

Universität Stuttgart
Universitätsstraße 38
D–70569 Stuttgart

Diplomarbeit Nr.

Effekt der Sensorik, Formfaktor und Transferfunktion auf die Benutzbarkeit von Computermäusen

Enes Zeljkovic

Studiengang: Informatik

Prüfer/in: Jun.-Prof. Dr. Niels Henze

Betreuer/in: Dipl.-Ing. Valentin Schwind

Beginn am: 18. Januar 2017

Beendet am: 31. März 2017

CR-Nummer: H.5.2

Kurzfassung

…... Kurze Fassung der Diplomarbeit ...

Abstract

…... Short summary of the thesis ...

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **15**
1.1 Motivation 15
1.2 Problemstellung 16
1.3 Allgemeiner Lösungsansatz 16
1.4 Gliederung 17

2 Verwandte Arbeiten **19**
2.1 Geschichtlicher Hintergrund von Computermäusen 19
2.2 Das Fitts'sche Gesetz 24
2.3 Verwandte Arbeiten 27

3 Methodik **31**
3.1 Studiendesign 31
3.2 Apparatus 31
3.3 Experimentalaufgabe 33
3.4 Versuchspersonen 34

4 Ergebnisse und Analyse **35**

5 Diskussion **37**

Literaturverzeichnis **39**

Abbildungsverzeichnis

2.1 Darstellung der Flugzeugpositionen am SAGE Computer 1953 20
2.2 Engelbart's Maus 1968 22
2.3 Telefunken's Rollkugel RKS100-86 23
2.4 Normalisierung der Zielbreite 26
2.5 Bestimmung der effektiven Zielbreite 27

3.1 Maus A, B, C, D 32

Tabellenverzeichnis

Verzeichnis der Listings

Abkürzungsverzeichnis

AFIPS American Federation of Information Processing Societies. 21

ARC Augmentation Research Center. 21

ID index of difficulty. 24

IP Index of performance. 24

MIT Massachusetts Institute of Technology. 19

MT movement time. 24

NLS oN-Line-System. 21

SAGE Semi-Automatic Ground Environment. 19

SRI Stanford Research Institute. 20

TP Throughput. 24

1 Einleitung

1.1 Motivation

Zur heutigen Standardausstattung eines Computers gehört üblicherweise eine Computer-Maus, deren Geschichte eng mit der Geschichte des Computers verbunden ist. Die erste kommerzielle Maus (auch bekannt als Rollkugel oder RKS 100-86) wurde von Rainer Mallebrein bereits vor ca. 50 Jahren für Großrechner der Firma Telefunken entwickelt. Tatsächlich durchgesetzt hat sich die Maus erst in den 1980er Jahren, parallel zum Aufkommen der graphischen Benutzeroberflächen.

Im Laufe der Zeit konnte sich die Maus in zahlreichen Studien gegenüber anderen Zeigegeräten behaupten. Neben den niedrigen Herstellungskosten, der Geschwindigkeit und Präzision der Maus, sind es vor allem Hardware-ergonomische Aspekte, wie geringe Muskelbelastung oder Platzbedarf, die der Maus zum Standard-Eingabegerät verhalf. Auch heute gilt die moderne Maus als ein extrem gutes Eingabegerät. Ob die Maus auch zur Zeit ihrer flächendeckenden Etablierung auf dem Markt ein gutes Eingabegerät war, ist jedoch fraglich. Die zahlreichen Optimierungen in den letzten Jahrzehnten lassen diesen Schluss zu.

Am Prinzip der Maus-Interaktion hat sich in den letzten 50 Jahren nicht viel geändert. Die wesentlichen Evolutionsstufen sind der Formfaktor, die Ablösung der Kugel durch einen optischen Sensor sowie der Einsatz der Transferfunktionen, die die Benutzbarkeit des Geräts auf ein Minimum der eingesetzten Muskelkraft und des zur Steuerung des Geräts benötigten Platzes optimiert haben. Aus heutiger Sicht ist es schwer nachzuvollziehen, wie sich die Interaktion mit einer nicht-ergonomischer Kugelmaus ohne Transferfunktion angefühlt haben muss.

Um ein Gerät besser verstehen zu können, ist es von Vorteil, wenn man mit diesem interagieren kann. Doch das ist bei älteren Geräten nicht immer möglich, da sie entweder nur in geringer Stückzahl vorhanden sind oder die zum Gerät passende Technologie nicht mehr vorhanden ist. Mit dem Vormarsch der 3D-Drucker ergeben sich neue Möglichkeiten, auch seltene Exponate selbst nachzubauen, um diese zu untersuchen. Wir wollen von dieser Möglichkeit Gebrauch machen und einen Nachbau des RKS 100-86 mit dem Original vergleichen.

1.2 Problemstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, anhand einer Studie zu untersuchen, inwiefern sich die moderne Maus von der Rollkugel unterscheidet und welche Faktoren der Entwicklung am meisten dazu beigetragen haben. Des Weiteren ist zu untersuchen, inwiefern sich die Replik vom Original unterscheidet bzw. wie nah der Nachbau an das Originalgerät heranreicht.

1.3 Allgemeiner Lösungsansatz

Für die Beantwortung der ersten Frage brauchen wir die Originale Telefunken RKS100-86 Maus und eine moderne Maus mit optischem Sensor. Der ISO9241-9 Standard (Anforderungen an Eingabemittel – ausgenommen Tastaturen) bietet verschiedene Aufgaben an, die sich dazu eignen, diese zwei Mäuse quantitativ (Genauigkeit, Geschwindigkeit und Fehlerrate) und qualitativ (Platzbedarf, Lernaufwand, Benutzbarkeit) miteinander zu vergleichen. Um die dadurch festgestellten Unterschiede besser eingrenzen und mit Zahlen erklären zu können, ist eine dritte Maus erforderlich. Diese soll als Hybrid-Maus fungieren, indem sie den Formfaktor der Originale RKS100-86 und den optischen Sensor einer modernen Maus in sich vereint. Für die Beantwortung der zweiten Frage, nehmen wir den Nachbau der Original RKS100-86, die im Rahmen eines Studienprojekts „Reverse Engineering of the Computer Mouse RKS 100“ gebaut wurde und evaluieren auch diese gemäß dem ISO9241-9 Standard.

Des Weiteren brauchen wir eine Software, die Mausbewegungen und -klicks aufzeichnet, diese in Bildschirmkoordinaten umrechnet und den Mauszeiger auf dem Bildschirm bei allen vier Mäusen so bewegt, dass sich die Interaktion mit ihnen ähnlich anfühlt. Wie schon erwähnt, möchten wir aus historischem Kontext auf die Transferfunktionen des Betriebssystems verzichten, d.h. einerseits müssen wir diese ausschalten/umgehen können und andererseits muss die Anwendung der eigenen Transferfunktion bzw. eines Faktors auf die Rohdaten der zu untersuchenden Eingabegeräte möglich sein. Dieser Kalibrierungsprozess dient also der Anpassung der Benutzbarkeit unter den zu untersuchenden Mäuse, so dass sie möglichst gleiches Verhalten bei ihrer Verwendung aufweisen. (z.B. Wenn man eine Maus physisch 2cm nach rechts bewegt, bewegt sich auch der Cursor auf dem Bildschirm ebenfalls um 2cm nach rechts. Die anderen drei Mäuse müssen so angepasst sein, dass sie ein ähnliches Verhalten aufweisen). Für die Durchführung der Studie, muss diese Software auch die Präsentation der Aufgaben übernehmen, bei derer Ausführung die Aufzeichnung der Mausbewegungen erfolgt. Die weiteren aufzuzeichnenden Parameter werden durch den Standard, sowie die Aufgabenart vorgegeben (z.B. Fehlerrate beim Nichttreffen des Ziels). Eine Analyse, der so gewonnenen Daten eignet, sich dazu die Eingangsfragen zu beantworten

1.4 Gliederung

Diese Diplomarbeit ist folgendermaßen strukturiert. Im Kapitel 2 wird der geschichtliche Hintergrund der Computermaus vorgestellt, die Frage was hat zu ihrer Erfindung geführt und welche wichtigen Entwicklungsstufen die Maus zu einem der wichtigsten Eingabegeräte gemacht hat. Des Weiteren werden die wichtigsten Arbeiten in HCI-Entwicklung vorgestellt, sowie die Grundlagen des Fitts'schen Models und dessen Einzug in den ISO9241-9 Standard erläutert. Basierend auf dieser Grundlage, wird die Methode für die Durchführung der Studie im Kapitel 3 dargestellt. Die Ergebnisse der Studie werden im Kapitel 4 vorgestellt und analysiert. Im letzten Kapitel werden die gewonnen Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt und kritisch bzgl. ihrer Bedeutung für die zukünftige Arbeiten bewertet.

2 Verwandte Arbeiten

2.1 Geschichtlicher Hintergrund von Computermäusen

Neben der Tastatur gehört heute die Maus als Standardeingabegerät nahezu an jedem Computer. Dies ist neben den einfachen Prinzipien wie Zeigen und Auswählen vor allem auf die leichte Bedienbarkeit und niedrige Herstellungskosten zurückzuführen. Als Standard für Interaktivität am Computer verdient die Maus daher eine nähere Betrachtung und Analyse ihres historischen Kontextes. Um den Ursprung der Computermaus besser verstehen zu können ist es notwendig, die Geschichte des Cursors bzw. der vor der Maus existierenden Eingabegeräte näher zu erläutern.

Zwischen 1945-1952 wurde am Massachusetts Institute of Technology (MIT) das Projekt Whirlwind entwickelt: dies war zuerst ein analoger Computer mit Kontrollfunktionen, aus dem später ein digitaler Rechner zur Steuerung eines radarvernetzten Verteidigungssystems wurde. Das Whirlwind-Projekt zeichnete verantwortlich für einige wichtige Schritte in der Entwicklung von digitalen Computern. So ist z.B. hier damit begonnen worden, Kathodenstrahlröhren als Ausgabegeräte an den Computer anzuschließen. So konnte zum ersten Mal ein symbolischer Code auf dem Bildschirm erscheinen: die Buchstaben T und F, T für Target und F für Fighter, die man mit einer sogenannten Lightgun am Bildschirm auswählte.[1] [2]

[1] Axel Roch: Die Maus. In: LAB. Jahrbuch für Künste und Apparate; Köln 1996, S. 166f.

[2] „For communication between aircontrol officers and the computer, we developed a light gun as an input device to the computer. (...) The light gun was a photocell receiver that was triggered by a flash from the cathode-ray display scope. To use it, one put the spout over the place where a displayed spot was expected. When the computer intensified that spot, light was picked up by the phototube and sent back to the computer. Then the computer knew, ›Oh, that one‹, and did what was indicated by the setting of control switches.“ Robert R. Everett: Whirlwind. In: Metropolis, Howlett, Rota: A History of Computing in the Twentieth Century; New York 1980, S. 376.

Aus Whirlwind ging das SAGE-System[3] hervor, ein Überwachungssystem, das die Air Force „zur taktischen Echtzeitkontrolle eines radarvernetzten Luftraums“[4] einsetzte.

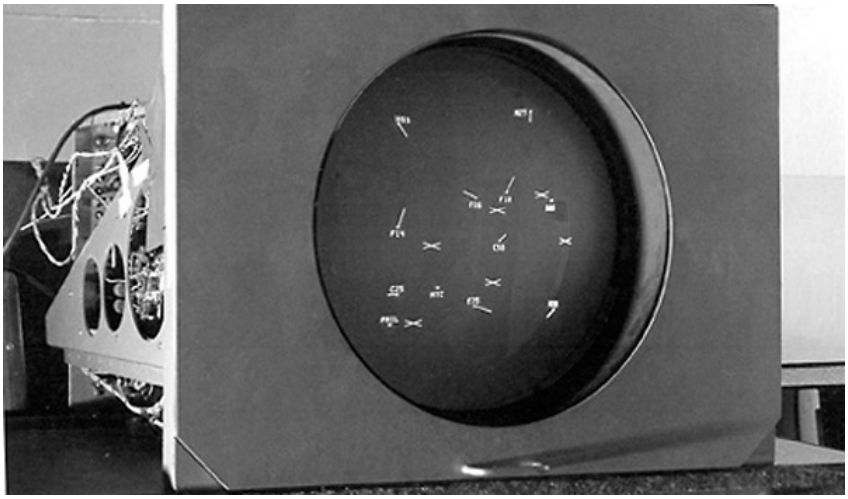

Abbildung 2.1: Darstellung der Flugzeugpositionen am SAGE Computer 1953

Der Lightpen, ein Gerät, das am Bildschirm einen markierten Bereich abgreift, hat seinen Vorläufer in der sogenannten Lightgun. Das Projekt Whirlwind, entwickelt ab 1945 am MIT für die taktische Kontrolle von Kriegsgebieten, brachte die Lightgun als Gerät zur Selektion von diskreten Symbolen auf dem Bildschirm hervor. Die Entscheidung, das Projekt Whirlwind als ein Prototyp des Nachfolgers SAGE abzuschließen, machte aus der Lightgun ein Gerät zur taktischen Echtzeit-Kontrolle eines radarvernetzten Luftraums.[5] Die Manipulation von Symbolen auf dem Bildschirm erlaubten zum ersten Mal eine Interaktivität mit dem Computer.[6]

[3] Seit Anfang der 50er Jahre wurde das Whirlwind-Projekt über die Air Force finanziell unterstützt. Die beginnende Aufrüstung der UdSSR machte in den Augen der Amerikaner ein „Air Defense System“ erforderlich. Parallel zu den Forschungen am MIT wurde am Air Force Cambridge Research Center daran gearbeitet, Daten aus Radargeräten über Telefonleitungen zu übertragen. Diese Entwicklungen sollten kombiniert werden. „This development led to a decision in 1951 to develop a computer tracking system for operational use and to form the Lincoln Laboratory to carry out the work. The Digital Computer Laboratory became a division of Lincoln, responsible for the design of the Semi-Automatic Ground Environment (SAGE) Air Defense System.“ Robert R. Everett: Whirlwind. In: Metropolis, Howlett, Rota: A History of Computing in the Twentieth Century; New York 1980, S. 375.

[4] Axel Roch: Die Maus. In: LAB. Jahrbuch für Künste und Apparate; Köln 1996, S. 167. Aus den technologischen Entwicklungen, die zur Konstruktion von Whirlwind und später dem SAGE Air Defense System nötig waren, ist auch der erste sog. Minicomputer hervorgegangen. Vgl: Metropolis, Howlett, Rota: A History of Computing in the Twentieth Century; New York 1980, S. 365f.

[5] Everett, Robert R. "Whirlwind", in: Metropolis, N. et al. „A History of Computing in the Twentieth Century“, 1980, S.375

[6] Der Begriff der direkten Manipulation wurde allerdings viel später geprägt, und zwar von Ben Shneiderman. Vgl.: Brenda Laurel: Computers as Theatre; Reading, Mass. 1997, S. 8. Dazu auch: Wulf R. Halbach: Interfaces; München 1994, S. 156.

Der Lightpen ging später aus der Lightgun hervor. Dieser wurde ebenso wie der Joystick und die Maus, am Stanford Research Institute (SRI) in Menlo Park, Kalifornien, gegen Ende der 50er Jahre entwickelt. Hier arbeitete William K. English zusammen mit Douglas C. Engelbart, der heute als Erfinder der Maus gilt.

1963 arbeitete ein Team um Douglas C. Engelbart am Augmentation Research Center (ARC) des SRI an verschiedenen experimentellen Zeigegeräten, unter anderem auch an einer Computermaus. Es galt die die schon etablierte Technologie des Lightpens zu ersetzen, da seine Benutzung nach ein paar Minuten Ermüdungserscheinungen nach sich zog. [7]

That November, while attending a conference on computer graphics in Reno, Nevada, Engelbart began to ponder how to adapt the underlying principles of the planimeter to X-Y coordinate input. On November 14, 1963, he first recorded his thoughts in his personal notebook about something he initially called a „bug“, which in a „3-point“ form could have a „drop point and 2 orthogonal wheels“. He wrote that the „bug“ would be „easier“ and „more natural“ to use, and unlike a stylus, it would stay still when let go, which meant it would be „much better for coordination with the keyboard“. [8]

Im Jahr 1964 schloß sich Bill English dem Team von Douglas C. Engelbart am ARC an und erstellte den ersten Prototyp einer Computermaus.[9] Diese Maus wurde das erste Mal im Juli 1965 erwähnt, in einer Veröffentlichung dessen Lead-Author English selbst war.[10] Wie schon erwähnt, verschiedene experimentelle Zeigegeräte, die für Engelbart's oN-Line-System (NLS)[11] entwickelt wurden, nutzten verschieden Körperbewegungen, z.B. Kopf-montierte Geräte, die am Kinn oder auf der Nase angebracht wurden, letztlich hat sich die Maus durchgesetzt, vor allem wegen ihrer Geschwindigkeit und Bequemlichkeit.[12]. Der Öffentlichkeit präsentierte Engelbart die Maus (s. Abbildung 2.2) am 9. Dezember 1968 auf der Herbsttagung der American Federation of Information Processing Societies (AFIPS). Wegen ihrer geschichtlicher Relevanz kennt man die heute als „The Mother of All Demos“. Sie fand wenig Beachtung, da es noch keine grafischen Benutzeroberflächen gab und die Menschen, die mit Computern zu tun hatten, mit der Eingabe von Kurzbefehlen per Tastatur vertraut waren. Für das auf zwei rechtwinklig

[7] Scott MacKenzie: Human-Computer Interaction: An Empirical Research Perspective.. Newnes, 31. Dezember 2012, S. 6–.

[8] Bardini, Thierry (2000). Bootstrapping: Douglas Engelbart, Coevolution, and the Origins of Personal Computing. Stanford: Stanford University Press, S. 95.

[9] Bardini, Thierry (2000). Bootstrapping: Douglas Engelbart, Coevolution, and the Origins of Personal Computing. Stanford: Stanford University Press. p. 98. ISBN 9780804738712.

[10] English, William K.; Engelbart, Douglas C.; Huddart, Bonnie (July 1965). Computer-Aided Display Control (Final Report, Menlo Park: Stanford Research Institute. p. 6.) - https://ia600808.us.archive.org/9/items/nasa_techdoc_19660020914/19660020914.pdf

[11] NLS war ein frühes Hypertext System, für welches man ein komfortables Zeigegerät zu entwickeln versuchte, Scott MacKenzie: Human-Computer Interaction: An Empirical Research Perspective. Newnes, 31. Dezember 2012, S. 6

[12] Engelbart, Douglas C. (March 1967), Display-Selection Techniques for Text Manipulation, IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, pp. 5–15

zueinanderstehenden Rädern basierende Prinzip beantragte Engelbart am 21. Juni 1967 ein Patent, das am 17. November 1970 als Patent US3541541 zugewiesen wurde.[13]

Abbildung 2.2: Engelbart's Maus 1968

Ein paar Wochen vor der Präsentation der Engelbart's Maus, am 02. Oktober 1968 erschien eine Publikation der Firma Telefunken, die ein Input-Instrument vorstellte, das an Monitoren hing und funktionell der Engelbart-Maus gleichkam: die so genannte Rollkugel. Die Rollkugel wurde für Telefunken's Großrechner TR-440 [14] entwickelt und sie hing am Monitor SIG-100. Diese wurde vom Team Rainer Mallebrein in Konstanz entwickelt. In Konstanz arbeitete Rainer Mallebrein bei AEG Telefunken an dem Problem, einen mobilen Pointer als Alternative zu dem fest eingebauten Trackball[15] am Bildschirm-Arbeitsplatz des „Radarzielextraktors" [16] zu entwickeln, den man für die Bundesanstaltung für Flugsicherung (heute Deutsche Flugsicherung) gebaut hatte.[17] Das Ergebnis war ein aufwendiges System, welches nicht nur den Radartisch und das,

[13] http://web.stanford.edu/dept/SUL/library/extra4/sloan/MouseSite/Archive/patent/Mouse.html

[14] Für detailierte Informationen über TR-440 und seinen Vorgänger TR-4 sei auf http://www.mirrorservice.org/sites/www.bitsavers.org/pdf/aeg-telefunken/ verwiesen

[15] Von 1966 an produzierte die amerikanische Firma Orbit solche "Ball Tracker"

[16] Mit Beginn der grafischen Bildverarbeitung experimentierte man mit Methoden, auf dem Bildschirm Schriften und Zeichnungen zu zeigen. In den USA erfand Ivan Sutherland das Sketchpad, einen Lichtgriffel, der im DEDS/ARTS-System der US-amerikanischen Flugsicherung verwendet wurde. In Deutschland hatte AEG-Telefunken für die Flugsicherung den digitalen „Radarzielextrator" entwickelt, der die die von der Radaranlage gelieferten Daten auf einem großen Bildschirm als Vektorgrafik zeigte, die mit neu entwickelten Schriften illustriert werden sollten. Die Fluglotsen brauchten einen Zeiger, um eine „Flugstraße" auszuwählen und dann mit der Flugnummer zu beschriften.

[17] https://www.heise.de/newsticker/meldung/50-Jahre-Mensch-Maschine-Interaktion-Finger-oder-Kugel-3567899.html

was in ihm steckte umfasste, sondern auch einen Satellitenrechner TR-86S, der die grafische Benutzeroberfläche erst möglich machte. Die Idee der fixen Zeigevorrichtung war in der Welt, doch nicht jeder Kunde wollte einen Arbeitsplatz mit einer fest verbauten Kugel. Besonders die Zielgruppe der Universitäten verlangte nach einer eleganteren Methode für die Arbeit an einem Bildschirm. Als dann 1967 die Arbeiten am TR-440 unter Eike Jessen begannen, hatte Mallebrein die Idee den Trackball aus dem Tisch herauszunehmen und umgedreht auf dem Tisch zu bewegen. Das Ergebnis war die Rollkugel-Steuerung (RKS) mit der Produktnummer 100-86. Von der Idee bis zum Prototypen brauchte das Team um Rainer Mallebrein mit einem Dutzend Fachleuten ein halbes Jahr, wobei nicht nur die Konstanzer Computerbauer, sondern auch das Hannoveraner Röhrenwerk von AEG Telefunken beteiligt war, dass die Spulen und Verstärker baute. Diese Rollkugel wurde optional zum Bildschirmarbeitsplatz, dem Sichtgerät SIG-100 angeboten – und niemals patentiert, weil die Erfindungshöhe vom Patentamt, aber auch von AEG-Telefunken als zu niedrig angesehen wurde.[18] Ende 1968 wurde dann der erste TR-440-Computer bei einem Kunden, dem Deutschen Rechenzentrum Darmstadt, installiert; in der Folgezeit verkaufte oder vermietete die Firma 45 weitere Systeme. Zum Peripherie-Angebot zählte das über einen Satellitenrechner TR-86 anzuschließende Sichtgerät SIG-100, wobei die Rollkugel aber nur optional dazugehörte. Wir wissen also nicht, ob die Telefunken-Maus schon 1968 zum Einsatz kam, belegt sind auf jeden Fall vier mobile Rollkugeln im Münchner Leibniz-Rechenzentrum anno 1972. Das war neun Jahre vor der ersten in den USA verkauften Maus, mit der man den Xerox Star bediente. [19]

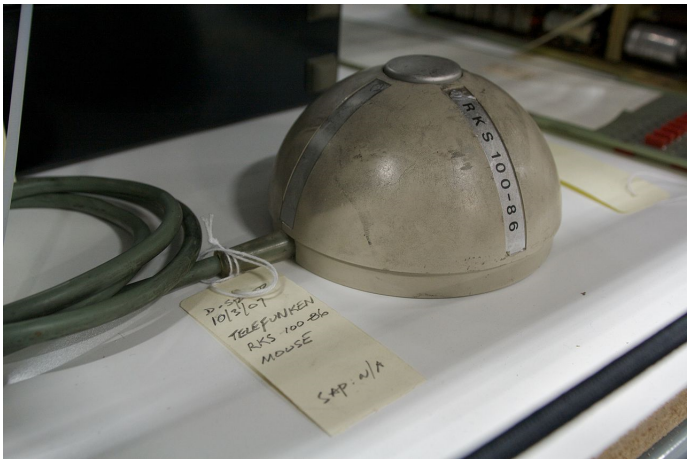

Abbildung 2.3: Telefunken's Rollkugel RKS100-86

[18] https://www.heise.de/newsticker/meldung/50-Jahre-Mensch-Maschine-Interaktion-Finger-oder-Kugel-3567899.html

[19] https://www.heise.de/newsticker/meldung/Auf-den-Spuren-der-deutschen-Computermaus-216255.html

2.2 Das Fitts'sche Gesetz

Das Fitts'sche Gesetz ist ein robustes Modell, welches bei schnellen, zielgerichteten Bewegungen (engl. rapid aimed movement) des Menschen, besagt, dass die Zeit, die man braucht, um mit einem Zeigegerät das Ziel zu treffen, einen logarithmischen Zusammenhang zur Entfernung über die Zielgröße hat (Fitts 1954). Dieses kann und wird in der HCI-Forschung sowohl als prädiktives als auch deskriptives Modell benutzt werden. Als prädiktives Modell steht es zum Beispiel für die Berechnung der Zeit, die ein Benutzer fürs Klicken eines Buttons benötigt, wenn er mit der graphischen Oberfläche interagiert. In diesem Kontext wird die Bewegungszeit (movement time (MT)) der Hand zum Ziel der Breite W auf Entfernung D, formal mit folgender Gleichung ausgedrückt:

$$MT = a + b * \log_2(\frac{2D}{W}) \tag{2.1}$$

wobei a und b empirisch bestimmte Konstanten sind.

Das Schlüsselkonzept der Fitts'schen Formulierung ist der Schwierigkeitsgrad (index of difficulty (ID)), welches mathematisch so ausgedrückt wird:

$$ID = \log_2(\frac{2D}{W}) \tag{2.2}$$

ID ist also die geometrische Repräsentation der Aufgabenschwierigkeit. Problematisch an dieser Formulierung ist die Tatsache, dass der Schwierigkeitsgrad auch negativ werden kann, wie zahlreiche Studien nach erster Fitts'schen Formulierung 1954 belegen. Das Fitts'sche Gesestz basiert auf der Informationstheorie von Shannon 1949 [..]. Laut MacKenzie [MI08] stellt die Formulierung von Fitts eine unnötige Abweichung von der ursprünglichen Theorie von Shannon dar. Aus diesem Grund empfiehlt MacKenzie in [SM04] eine Reformulierung des Fitts'schen Gesetzes vor, so wie es auch in Shannon's Arbeit ausgedrückt wurde:

$$MT = a + b * \log_2(\frac{D}{W} + 1) \tag{2.3}$$

Diese Formulierung verhindert einen negativen Schwierigkeitsindex, deckt sich besser mit empirischen Daten und aus diesen Gründen wird sie heute als current practice eingesetzt.

Index of performance (IP)/Throughput (TP)

Die Motivation für Fitts' Arbeit war der Versuch die Kapazität des motorischen Systems des Menschen zu verstehen. Unter Einbeziehung der Informationstheorie (die zu seiner Zeit hip war), charakterisierte er eine solche Kapazität als Bandbreite von Informationen, die durch

eine Menge von verschiedenen Gliedmaßen (Finger, Arm, Handgelenk ..) ausgedrückt wird. Formal beschrieben:

$$IP = \frac{ID}{MT} \tag{2.4}$$

wobei bits per second als Maßeinheit für den Durschsatz IP gilt. Je größer die menschliche Leistung, desto größer der Durchsatz, da mehr Informationen pro Sekunde übertragen werden. IP nützliches Konzept, da es zum einen eine Methode für die Darstellung der menschlichen Leistungsfähigkeit anbietet und zum anderen bietet es eine Möglichkeit um aktuelle Performance so zu quantifizieren, dass die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Techniken, die dieses Potenzial realisieren, ermöglicht wird.

Im deskriptiven Kontext also wird das Fitts'sche Gesetz als „Teil der Evaluation von neuartigen Zeigegeräten eingesetzt. Dabei wird die Bewegungszeit nicht prädiktiv berechnet, sondern es werden mehrere Messungen der Bewegungszeit vorgenommen, um dann zu bestimmen, wie verschiedene Konditionen die Koeffizienten innerhalb der Fitts'schen Relation beeinflußen."[MS03]

Die Performance wird gemessen durch die Ausführung von Task performance, z.B. one-direction Tapping, multi-directional Tapping, Dragging etc. Seit ISO9241-9 wird IP als TP bezeichnet.

Speed-Accuracy-Tradeoff (Normalisierung)

Der Durchsatz kombiniert also die Geschwindigkeit und Genauigkeit in einem Wert. Der Tradeoff zwischen diesen zwei Faktoren: je genauer, desto langsamer die Bewegung bzw. je schneller die Bewegung ausgeführt wird, desto ungenauer die Performance. Problematisch insofern, da studienübergreifende Vergleiche der Ergebnisse unmöglich bzw. erschwert werden. Wenn man z.B. die Bewegungszeiten verschiedener Eingabegeräte studienübergreifend vergleichen will, so haben diese keine Aussagekraft, es sei denn die Fehlerraten sind dieselben oder anderswie normalisiert.

Ein Ansatz, um solch eine Normalisierung zu erreichen wird von MacKenzie in [MSB91] und [MI08] diskutiert. Die Idee dabei ist die Berechnungen auf der Grundlage der Daten durchzuführen, die das beschreiben was Studienteilnehmer während der Taskausführung tatsächlich tun, anstatt was sie tun müssten[20]. In Praxis bedeutet das, dass die Zielbreite W sich mit dem Ort der tatsächlichen Interaktion decken muss. –> W wird zu We (effektive Zielbreite), also eine abhängige Variable.

[20] da man das Fitts'sche Gesetz ganz einfach unterlaufen kann, indem man genau das Gegenteil vom Gesagten macht, z.B. nicht schnell genug die Bewegung durchführen

Die Methode von MacKenzie beschreibt einen konstanten Fehlerfaktor um die effektive Zielbreite We zu bestimmen. Konkret: Zielbreite so anpassen als ob man eine konstante Rate von 4% hätte, d.h. die Schranken von We durch die Innenbegrenzungen der oberen und unteren 2% der Daten zu bestimmen so wie in Abbildung 2.4(b) dargestellt

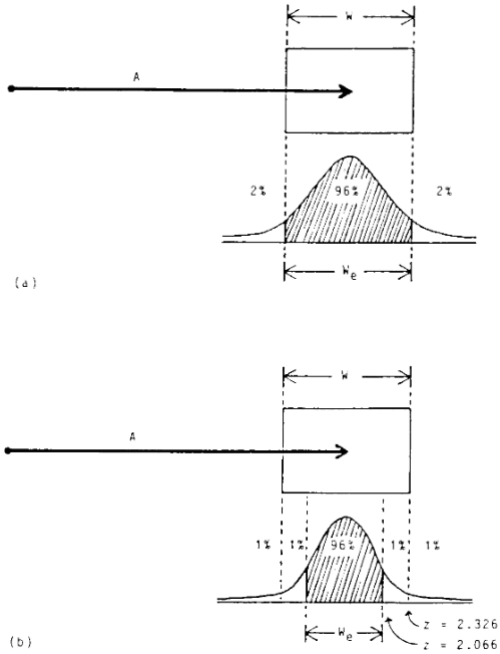

Abbildung 2.4: Normalisierung der Zielbreite

In MacKenzie, Sellen und Buxton [MSB91] wird solch eine Normalisierung zum ersten Mal in einer Studie eingesetzt und u.a. werden die Ergebnisse unter Einsatz von We und W verglichen. –> IP bei allen untersuchten Geräten geringer, normalisierte Werte machen studienübergreifende Vergleiche möglich...

Erweiterung auf zweidimensionale Tasks

Einige Studien wie z.B. Card, English und Burr [CEB78] haben das Fitts'sche Gesetz (welches ursprünglich auf eindimensionale Tasks angewandt wurde) auf zweidimensionale Zeigeaufgaben angewandt. Dabei wurde das Fitts'sche Modell wie üblich (also 1d) auf 2d Bewegungen angewandt: D ist die Entfernung zur Zielmitte und Zielbreite ist die horizontale Erweiterung des Ziels. Dabei wurde eine neue Frage aufgeworfen und zwar inwiefern der Winkel der durchgeführten Bewegung eine Rolle bei der Performance spielt (Bsp. der Handgelenk hat mehr Bewegungsfreiheit in 2d als ein Finger). Lässt man diesen Aspekt aus, kann das zu falschen Interpretationen der Studienergebnisse führen.

Ein weiterer Punkt ist, wie man die Zielbreite bestimmt, wenn das Ziel eine asymetrische Form hat und aus verschiedenen Winkeln ängefahren"wird. Die Problematik wird in Abbildung 2.5 veranschaulicht: Was ist hier die Zielbreite? W? H? WxH? W+H? ...

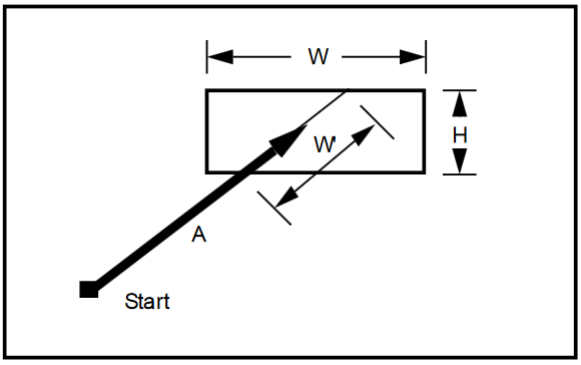

Abbildung 2.5: Bestimmung der effektiven Zielbreite

MacKenzie stellt in [MB92] solche verschiedene Modelle vor, mit dem Ergebnis, dass W+H und WxH nicht besser als Status Quo, also W, waren. SMALLER-OF und W' haben sich als „bessere" Modelle als W herausgestellt und unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. SMALLER-OF ist rechentechnisch effizienter als W'. Aber W'-Modell funktioniert auch auf kreisförmigen Zielen ohne dabei die Eindimensionalität des Fitts'schen Modells zu übernehmen.

2.3 Verwandte Arbeiten

Evaluation of Mouse, Rate-controlled Isometric Joystick, Step Keys, and Text Keys, for Text Selection on a CRT **(Card, English und Burr [CEB78])**

Eine sehr wichtige Veröffentlichung, weil zum einen hier das erste Mal die Übertragung des Fitts'schen Gesetztes in den Bereich Mensch-Computer-Interaktion stattfand und zum anderen weil sie die erste hardwareergonomische Untersuchung verschiedener Eingabegeräte beschreibt. Für diese Diplomarbeit insofern wichtig, weil sie auch die erste vergleichende Evaluierung der Maus beschreibt.

Untersucht wurden Bewegungszeiten und Fehlerraten von folgenden Eingabegeräten: isometrischer Joystick, Maus, Richtungstasten und Text-Tasten einer Tastatur. Dabei musste eine Text Selektionsaufgabe auf verschiedenen Distanzen und bei variierender Textbreite (Zielbreite) und gleicher Zielhöhe mehrfach durchgeführt werden. Im Endergebnis zeigte die Maus die geringste Fehlerrate und kürzeste Bewegungszeiten.

Auf diese Veröffentlichung folgten zahlreiche andere Untersuchungen, die die Gültigkeit des Fittschen Gesetzes untermauern. Dabei wurden u.a. folgende Eingabegeräte untersucht:

Computermaus, Tastatur, Eingabestift, Joystick, Trackball, Touchpad und Trackpoint, Touchscreen, TV-Fernbedienung, VR-Handschuh, kopfbasierte Steuerung, Blicksteuerunng, Smartwall, Video-Game Controller.[21]

Plamondon und Alimi [PA97] gibt eine Übersicht über wissenschaftliche Literatur, die sich mit Speed-/Accuracy Trade-Offs in rapid aimed movements auseinandersetzt. Dabei geben sie einen Überblick darüber, in welchen Bereichen und unter welchen Umständen das Fitts'sche Gesetz erfolgreich angewandt wurde, u.a. verschiedene Körperteile (Finger, Hände, Arme, Füße, Kopf, Augen), verschiedene Umstände wie unter Wasser oder unter Mikroskop, verschiedene Gruppen (Ältere, Jüngere, geisitg Behinderte, Parkinsonkranke, verschiedene Altersklassen, Affen, etc.).

Towards a Standard for Pointing Device Evaluation, Perspectives on 27 Years of Fitts' Law Research in HCI (**Soukoreff und MacKenzie [SM04]**) gibt sieben Empfehlungen für die Konstruktion des Fitts'schen Modells. Diese unterstützen und ergänzen teilweise die Methoden, die im ISO9241-9 beschrieben werden. Die Anwendung dieser Empfehlungen soll die Vergleichbarkeit und die Konsistenz der Veröffentlichungen verbessern.

Card, English, and Burr (1978): 25 Years Later (**MacKenzie und Soukoreff [MS03]**) beschreibt die Änderungen der mathematischen Formulierung des Fitts'schen Gesetztes über zwischen 1954-2003. Das Experiment aus [CEB78] wird unter current practice wiederholt und dessen Ergebnisse gegen [CEB78] erläutert.

Extending Fitts' Law to Two-dimensional Tasks **(MacKenzie und Buxton [MB92])** erweitert das eindimensionale Fitts'sche Modell auf zweidimensionale Tasks. Zwei alternative Interpretationen (SMALLER-OF- und W'-Modell) der Zielbreite werden vorgestellt.

Testing Pointing Device Performance and User Assessment with the ISO 9241, Part 9 Standard **(Douglas, Kirkpatrick und MacKenzie [DKM99])** Erste Anwendung des ISO9241-9 Standards. Untersucht wurden ein isometrischer Joystick und Touchpad auf Performance und Komfort. Die Veröffentlichung setzt sich kritisch mit den Problemen der Implementierung des ISO Standards auseinander und gibt Vorschläge zur Verbesserung des Modells. So wird z.B. empfohlen Bewegungszeiten (Geschwindigkeit) und Fehlerraten (Genauigkeit) als abhängige Variablen zu messen, anstatt nur den Durchsatz zu berechnen, der sowohl Geschwindigkeit als auch Genauigkeit in einem Wert beinhaltet. Bemängelt wird die Tatsache, dass der Standard nicht die Lerneffekte miteinbezieht, die es aber gibt, wie zahlreiche Studien zeigen. Weiter ist nicht klar, warum der Standard mind. 25 Teilnehmer an einer Studie empfiehlt, obwohl 12 eigentlich current practice ist. Die Bewertung des Fragebogens wird auch kritisch angesprochen. Für die Implementierung des Fitts'schen Modells in ein experimentelles Design für Testumgebungen ist der Standard in vielen Punkten vage. So wird im Standard nicht erklärt wie Task-Conditions variieren sollen als Funktion der Zielbreite und -distanz um den ganzen Bereich IDs abzudecken. Die Berechnungen von Durchsatz und We werden nicht detailiert genug erklärt, um Datenanalyse implementieren zu können.

[21] Quelle für jedes Gerät einzeln angeben???

Speed-accuracy measures in a population of six mice **(Isokoski und Raisamo [IR02])** 6 Computermäuse wurden nach dem ISO9241-9 Standard untersucht mit dem Ziel kleinere Mäuse bei denen hauptsächlich der Finger (und weniger Faust bzw. die Hand) eingesetzt wird zu überprüfen, ob der Durchsatz tatsächlich größer ist. Das Ergebnis zeigt, dass die Unterschiede vernachlässigbar klein sind. Da in dieser Diplomarbeit relativ große Computermäuse untersucht werden sollen (Stichwort: Formfaktor) wäre es interessant zu wissen, ob hier die Unterschiede auch so marginal sind.

Characterizing Computer Input with Fitts' Law Parameters: The Information and Non-information Aspects of Pointing **(Zhai [Zha04])** zeigt, dass der Durchsatz in seiner Definition TP = ID/MT kein gutes Konzept ist, und gibt einen Verbesserungsvorschlag wie zukünftige Studien durchgeführt werden sollen. (Ist auf den ersten Blick nicht klar, ob das Paper wirklich brauchbar ist für diese Diplomarbeit)

*Accuracy measures for evaluating computer pointing devices***(MacKenzie, Kauppinen und Silfverberg [MKS01])** schlägt sieben neue Messungen vor, die Effizienzunterschiede zwischen den untersuchten Geräten sichtbar machen (entlocken). Die Idee dahinter ist die, dass die übliche Vorgehensweise, nämlich Messung bzw. Berechnung von Bewegungszeiten, Fehlerraten und Durchsatz, auf einer Messung pro Versuch stüzt und keine Aspekte der Bewegung während des Versuchs in Betracht zieht. Es geht also um die Entwicklung neuer zusätzlicher Genauigkeitsmessverfahren, die evtl. erklären können, warum das eine Eingabegerät effizienter als das andere ist. Die Verfahren um die es hier geht: target re-entry, task axis crossing, movement direction change, orthogonal direction change, movement variability, movement error und movement offset.

*A Comparison of Input Devices in Element Pointing and Dragging Tasks***(MacKenzie, Sellen und Buxton [MSB91])**

An Error Model for Pointing Based on Fitts' Law(**Wobbrock et al. [Wob+08]**)

Speed-accuracy tradeoff in Fitts' law tasks - on the equivalency of actual and nominal pointing precision(**Zhai, Kong und Ren [ZKR04]**)

Fitts' Throughput and the Speed-Accuracy Tradeoff (**MacKenzie und Isokoski [MI08]**)

The Impact of Control-Display Gain on User Performance in Pointing Tasks(**Casiez et al. [Cas+08]**)

Display-Selection Techniques for Text Manipulation(**English, Engelbart und Berman [EEB67]**)

*Fitts' Law As a Research and Design Tool in Human-computer Interaction***(MacKenzie und Isokoski [MI08])**

No more Bricolage! Methods and Tools to Characterize, Replicate and Compare Pointing Transfer Functions Géry Casiez, Nicolas Rouss

Is Display/Control Gain a Useful Metric for Optimizing an Interface? Lynn Y. Arnaut Joel S. Greenstein

Force-to-motion functions for pointing Joseph D. Rutledge Ted Selker

Reverse Engineering of the Computer Mouse RKS 100 Yacoub, Turfa, Maurer

3 Methodik

3.1 Studiendesign

Als abhängige Variablen wureden die Bewegungszeit in Millisekunden, sowie die mittlere Fehlerrate in Prozent gemessen. Als unabhängige Variable wurde der Winkel zwischen der Mitte des Displays und des Zielobjekts in 20°-Stufen von 0° bis 360° variiert. Der Durchmesser der kreisförmigen Zielobjekte, die Zielbreite, W variierte zwischen 16, 32, 64, 96, 128 Pixel. Die Distanz A der Zielobjekte ausgehend von der Mitte des Displays variierte in drei Stufen zwischen 384, 512, 640 Pixel. Die Werte für A und W wurde so gewählt, dass die Bandbreite der verschiedenen IDs möglichst weit ausgeschöpft wird. Da die Bandbreite der IDs aus dem ISO9241-9 Standard nicht eindeutig hervorgeht, wurde diese entsprechend der Empfehlung von Soukoreff und MacKenzie [SM04] zwischen 2-8 bits gewählt. Dabei wurde bewusst auf die Schwierigkeitsstufen höheren Grades (>6 bit) verzichtet, da die Zielobjekte mit der kleinen Zielbreite nur schwer mit der Rollkugel zu treffen sind und somit die Durchführung der Studie nicht möglich gewesen wäre. Aus diesen 15 IDs zwischen 2.0 und 5,3576 waren 14 eindeutig.

Eine Kondition ist durch ein Tupel aus Distanz und Zielbreite (A x W) eindeutig definiert und besteht aus neun Trials. Ein Block besteht aus 15 verschiedenen Konditionen. Pro Gerät wurden jeweils 5 Blöcke durchgeführt, d.h. pro Gerät wurden insgesamt 5x3x5x9 = 675 Trials durchgeführt. Bezogen zwei Geräte aller zwölf Teilnehmer liegt die Gesamtsumme der Trials bei 675x2x12=16200.

Um Lerneffekte auszubalancieren, wurden Probanden per Zufall einer der zwei Gruppen zugeteilt. Die Gruppe A fing das Experiment mit der optischen Maus, die Gruppe B mit der Rollkugel RKS100-86. Am Ende des Experiments haben die Teilnehmer Fragebögen zur vergleichenden Bewertung entsprechend dem ISO9241-9 Standard ausgefüllt und ihre subjektiven Eindrücke von den untersuchten zwei Geräten anhand 12 Items mittels einer Rangskala bewertet.

3.2 Apparatus

Der eingesetze Computer war ein Notebook HP Pavilion dv7 mit einem AMD A-Series A6-3410MX / 1.6 GHz Prozessor und 6GB RAM. Die Aufgaben des Experiments wurden auf seinem 17.3"großen TFT-Display in einer Auflösung von 1600x900 Pixel unter maximaler

Wiederholfrequenz von 85Hz präsentiert. Die zu untersuchenden Eingabegeräte sind vier Computermäuse aus der Abbildung 3.1)

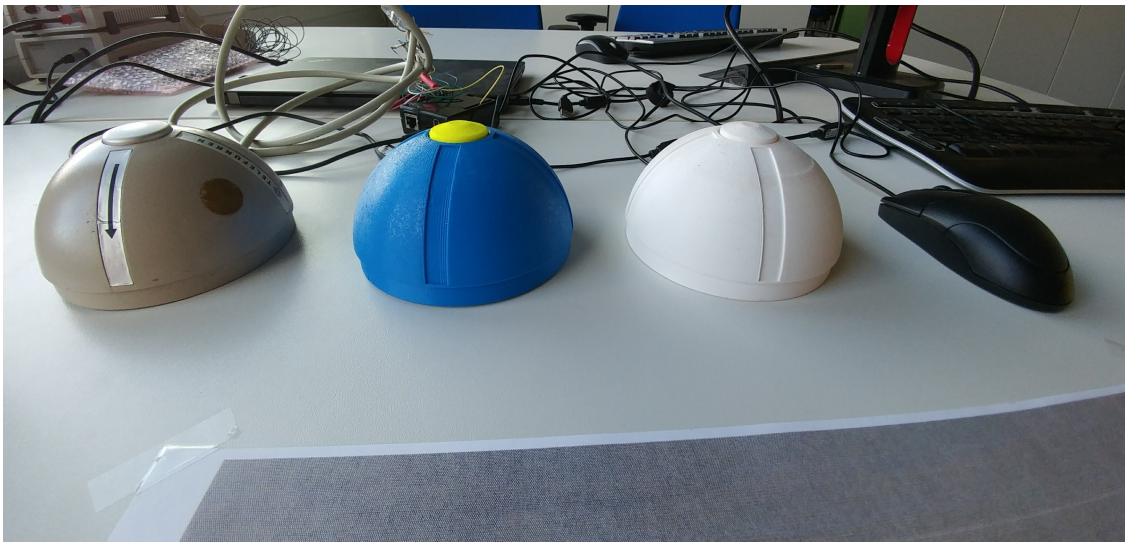

Abbildung 3.1: Maus A, B, C, D

Bei der Maus A handelt es sich um die Original Telefunken RKS100-86 Kugelmaus, die uns Computermuseum Stuttgart für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt hat. Diese hat den Durchmesser von 6cm bei einer Höhe von 7cm und einem Gewicht von 490g. Es gibt nur einen Klickbutton mit einem Durchmesser von 4cm, der oben in der Mitte platziert ist. Insgesamt waren es zwölf Kabel die ursprünglich nötig waren um diese Maus an einen Großrechner TR404 anzuschließen. Die Maus wurde über USB an den Computer angeschlossen, indem man einen Microcontroller dazwischengeschaltet hat, um die Mausbewegung im Encoder zu übersetzen. Zwecks besserer Bedienbarkeit, wurde ihr Ausgangskabel nach vorne verlegt, sowie es bei heutigen Kabelmäusen üblich ist. Problematisch war es eine entsprechend passende Unterlage/Mauspad zu finden, die das Rollen der Kugel optimal unterstützt. Glatte Unterlagen aus Holz, Karton, Plastik, Pappier haben das erwünschte Ergebnis nicht gebracht, stattdessen wurde die Rückseite des Mauspads verwendet. Der Grip aus Gummi führte zwar dazu, dass man mehr Betätigungskraft anwenden muss, um die Maus zu bewegen, allerdings war nur mit dieser ein präzises Treffen auch der kleinen Ziele bei der Durchführung der Studie möglich. Da die runde symmetrische Form bei den Vortests gelegentlich dazu geführt hat, dass man die Maus unbewusst nach rechts oder links dreht und somit die Orientierung des Zeigers auf dem Bildschirm verloren geht, wurden die Teilnehmer vor der Verwendung darauf aufmerksam gemacht, dass sie sich am Kabelausgang (entspricht 0°) orientieren können, falls die Steuerung nicht wie gewünscht funktioniert.

Bei der Maus B handelt es sich um einen Nachbau der Maus A. In ihrer Arbeit Reverse Engineering of the Computer Mouse RKS 100 haben die Autoren mit diesem 3D-Print versucht möglichst nah/identisch die Originalmaus nachzukonstruieren. Aufgrund des nicht mehr richtig funktionierenden Encoders, wurde die Bewegung der Maus entlang der Y-Achse (oben/unten)

auf dem Bildschirm gar nicht angezeigt. Aus diesem Grund wurde diese Maus aus der Untersuchung ausgeschlossen. Ihre Untersuchung zielte auf die Beantwortung der Frage, wie gut ein 3D-Ausdruck eines historischen Geräts an das Original rankommt.

Die Maus C ist ebenfalls ein 3D-Ausdruck der Originale RKS100-86. Hier man anstatt einer Kugel einen optischen Sensor eingebaut, damit der Formfaktor der RKS100-86 in einem Vergleich mit der modernen Maus untersucht werden kann. Die Maßen und Form entsprechen dem Original, das Gewicht ist wesentlich geringer, da durch die Verwendung des optischen Sensors, der Einbau der Encoder und der Kugel entfällt. Auch diese Maus wurde von der Evaluierung ausgeschlossen, da der Mausklick nicht immer als solcher interpretiert wird, was sie für die Durchführung der Aufgaben in der Studie ungeeignet macht.

Die Maus D ist eine moderne USB-Maus (Basetech BN-S11) mit einem optischem Sensor. Sie hat die Maßen 109 x 54 x 30 mm und ein Gewicht von 50g. Wegen ihrer symmetrischen Form ist sie genau wie die Mäuse A, B, C sowohl für Links- als auch Rechtshänder geeignet.

Für die Durchführung der evaluierenden Studie wurde der multidirektionale 2D-Task nach Fitts'schem Model in C-Sharp implementiert. Dabei wurde entsprechend der Aufgabenstellung der ISO9241-9 Standard als Vorgabe genutzt, soweit dies möglich war. Wie in Douglas, Kirkpatrick und MacKenzie [DKM99] erwähnt, ist der Standard nicht immer eindeutig genug. In solchen Fällen hat man dann selbst entschieden, was sinnvoll erscheint. Als Entwicklungsumgebung hat Visual Studio 2015 auf einem x64-Windows7-System gedient. Die Software zeichnet während der Durchführung der Fitts Task Mausbewegungen und Klicks auf und erzeugt ein Logfile mit verschiedenen Variablen und Messungen auf, welches später für die Auswertung der Studie herangezogen wird.

Während der Durchführung der Studie wurden die Transferfunktionen von Windows deaktiviert, um die Ergebnisse z.B. durch die Mausbeschleunigung nicht zu beeinflussen Sicherheitshalber hat man auch auf die Windows-MouseEvents verzichtet und stattdessen wurde die Auslesung der Rohdaten der Maus implementiert.

3.3 Experimentalaufgabe

Als Aufgabe wurde die multidirektionale Point-And-Klick Aufgabe entsprechend dem ISO9241-9 Standard verwendet. Die Durchführung der Aufgabe wurde den Probanden erklärt und vorgezeigt. Eine Sequenz bestehend aus 15 Konditionen war als Übung/Test zugelassen. In jedem Trial wurde das Ziel der Breite W und der Entfernung zum vorigen Ziel A in gelber Farbe auf dem Display präsentiert. Durch die Bewegung des Eingabegeräts steuert man den Cursor auf dem Display auf das Ziel zu und bestätigt dieses mit dem Klick beliebiger Maustaste. Ein Fehler wurde aufgezeichnet, wenn sich die Mitte des Cursors außerhalb der Grenzen des zu treffenden Kreises befand und dabei ein Mausklick ausgelöst wurde. Das Auftreten eines Fehlers wurde visuell durch die Einfärbung des verfehlten Ziels in rot, sowie akustisch durch einen Signalton angezeigt. Probanden wurden gebeten die Aufgabe so schnell und so

präzise wie möglich durchzuführen. Den Probanden wurde auch zwischen den Blöcken die Möglichkeit einer Pause angeboten (hat aber niemand gebraucht.). Zusätzlich wurde zum Eingabegerät Rollkugel erklärt, dass der Kabelausgang als öbenßu werten sei, falls das Gerät bei der Durchführung der Aufgabe aufgrund seines Formfaktors gedreht wird und der Zeiger eine nicht gewünschte Richtung annimmt.

3.4 Versuchspersonen

An der Studie haben 12 Probanden teilgenommen (7 männlich, 5 weiblich). Probanden waren alle Rechtshänder im Alter zwischen 17-50 Jahren, der Altersdurchschnitt betrug 37,2 Jahre (sd=10). Alle Probanden gaben an mit dem Eingabegerät Maus täglich zu arbeiten.

4 Ergebnisse und Analyse

Die durchschnittliche Bewegungszeit für die optische Maus war 1,0302 sec mit einer Abweichung 0,466 sec. Für die Rollkulgel beträgt die durchschnittliche Bewegungszeit 1,7855 sec bei einer Abweichung von 0,935 sec.

...

5 Diskussion

Literaturverzeichnis

[CEB78] S. K. Card, W. K. English, B. J. Burr. „Evaluation of Mouse, Rate-Controlled Isometric Joystick, Step Keys, and Text Keys for Text Selection on a CRT“. In: *Ergonomics* 21.8 (1978), S. 601–613. DOI: 10.1080/00140137808931762. URL: http://dx.doi.org/10.1080/00140137808931762 (zitiert auf S. 26–28).

[Cas+07] G. Casiez, D. Vogel, Q. Pan, C. Chaillou. „RubberEdge: Reducing Clutching by Combining Position and Rate Control with Elastic Feedback“. In: *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '07. Newport, Rhode Island, USA: ACM, 2007, S. 129–138. ISBN: 978-1-59593-679-0. DOI: 10.1145/1294211.1294234. URL: http://doi.acm.org/10.1145/1294211.1294234.

[Cas+08] G. Casiez, D. Vogel, R. Balakrishnan, A. Cockburn. „The Impact of Control-Display Gain on User Performance in Pointing Tasks“. In: *Human–Computer Interaction* 23.3 (2008), S. 215–250. DOI: 10.1080/07370020802278163. eprint: http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/07370020802278163. URL: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07370020802278163 (zitiert auf S. 29).

[DKM99] S. A. Douglas, A. E. Kirkpatrick, I. S. MacKenzie. „Testing Pointing Device Performance and User Assessment with the ISO 9241, Part 9 Standard“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '99. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: ACM, 1999, S. 215–222. ISBN: 0-201-48559-1. DOI: 10.1145/302979.303042. URL: http://doi.acm.org/10.1145/302979.303042 (zitiert auf S. 28, 33).

[EEB67] W. K. English, D. C. Engelbart, M. L. Berman. „Display-Selection Techniques for Text Manipulation“. In: *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics* HFE-8.1 (1967), S. 5–15. ISSN: 0096-249X. DOI: 10.1109/THFE.1967.232994 (zitiert auf S. 29).

[IR02] P. Isokoski, R. Raisamo. „Speed-accuracy measures in a population of six mice“. In: *Proceedings of APCHI2002: 5th Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction). Science*. Press, 2002, S. 765–777 (zitiert auf S. 29).

[MB92] I. S. MacKenzie, W. Buxton. „Extending Fitts' Law to Two-dimensional Tasks“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '92. Monterey, California, USA: ACM, 1992, S. 219–226. ISBN: 0-89791-513-5. DOI: 10.1145/142750.142794. URL: http://doi.acm.org/10.1145/142750.142794 (zitiert auf S. 27, 28).

[MI08] I. S. MacKenzie, P. Isokoski. „Fitts' Throughput and the Speed-accuracy Tradeoff". In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '08. Florence, Italy: ACM, 2008, S. 1633–1636. ISBN: 978-1-60558-011-1. DOI: 10.1145/1357054.1357308. URL: http://doi.acm.org/10.1145/1357054.1357308 (zitiert auf S. 24, 25, 29).

[MKS01] I. S. MacKenzie, T. Kauppinen, M. Silfverberg. „Accuracy Measures for Evaluating Computer Pointing Devices". In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '01. Seattle, Washington, USA: ACM, 2001, S. 9–16. ISBN: 1-58113-327-8. DOI: 10.1145/365024.365028. URL: http://doi.acm.org/10.1145/365024.365028 (zitiert auf S. 29).

[MS03] I. S. MacKenzie, R. W. Soukoreff. „Card, English, and Burr (1978): 25 Years Later". In: *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. CHI EA '03. Ft. Lauderdale, Florida, USA: ACM, 2003, S. 760–761. ISBN: 1-58113-637-4. DOI: 10.1145/765891.765974. URL: http://doi.acm.org/10.1145/765891.765974 (zitiert auf S. 25, 28).

[MSB91] I. S. MacKenzie, A. Sellen, W. A. S. Buxton. „A Comparison of Input Devices in Element Pointing and Dragging Tasks". In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '91. New Orleans, Louisiana, USA: ACM, 1991, S. 161–166. ISBN: 0-89791-383-3. DOI: 10.1145/108844.108868. URL: http://doi.acm.org/10.1145/108844.108868 (zitiert auf S. 25, 26, 29).

[PA97] R. Plamondon, A. M. Alimi. „Speed/accuracy trade-offs in target-directed movements". In: *Behavioral and Brain Sciences* 20.2 (Juni 1997), S. 279–303. URL: https://www.cambridge.org/core/article/div-class-title-speed-accuracy-trade-offs-in-target-directed-movements-div/6DEEA7BC2A12E917DC0E8A1ED3CB9EA1 (zitiert auf S. 28).

[SM04] R. W. Soukoreff, I. S. MacKenzie. „Towards a Standard for Pointing Device Evaluation, Perspectives on 27 Years of Fitts' Law Research in HCI". In: *Int. J. Hum.-Comput. Stud.* 61.6 (Dez. 2004), S. 751–789. ISSN: 1071-5819. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2004.09.001. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.09.001 (zitiert auf S. 24, 28, 31).

[Wob+08] J. O. Wobbrock, E. Cutrell, S. Harada, I. S. MacKenzie. „An Error Model for Pointing Based on Fitts' Law". In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '08. Florence, Italy: ACM, 2008, S. 1613–1622. ISBN: 978-1-60558-011-1. DOI: 10.1145/1357054.1357306. URL: http://doi.acm.org/10.1145/1357054.1357306 (zitiert auf S. 29).

[ZKR04] S. Zhai, J. Kong, X. Ren. „Speed-accuracy Tradeoff in Fitts' Law Tasks: On the Equivalency of Actual and Nominal Pointing Precision". In: *Int. J. Hum.-Comput. Stud.* 61.6 (Dez. 2004), S. 823–856. ISSN: 1071-5819. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2004.09.007. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.09.007 (zitiert auf S. 29).

[Zha04] S. Zhai. „Characterizing Computer Input with Fitts' Law Parameters: The Information and Non-information Aspects of Pointing". In: *Int. J. Hum.-Comput. Stud.* 61.6 (Dez. 2004), S. 791–809. ISSN: 1071-5819. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2004.09.006. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.09.006 (zitiert auf S. 29).

Alle URLs wurden zuletzt am 17. 02. 2017 geprüft.

Erklärung

Ich versichere, diese Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Aussagen als solche gekennzeichnet. Weder diese Arbeit noch wesentliche Teile daraus waren bisher Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens. Ich habe diese Arbeit bisher weder teilweise noch vollständig veröffentlicht. Das elektronische Exemplar stimmt mit allen eingereichten Exemplaren überein.

Ort, Datum, Unterschrift