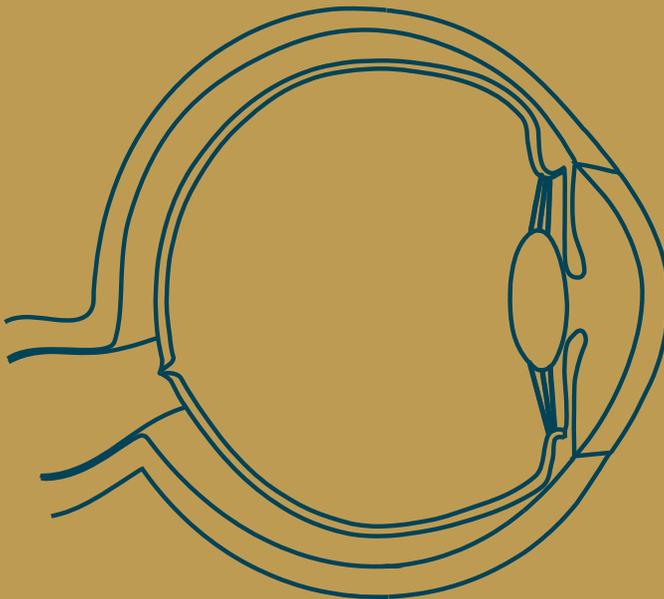


# Masterarbeit

Florentin Förschler

## Visuell simuliertes Erkunden taktiler Grafiken

Zur Evaluation digitaler Vorlagen für taktile Grafiken



Hochschule Magdeburg-Stendal  
Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign (IWID)

## Masterarbeit

zur Erlangung des Grades eines „Master of Arts“  
im Studiengang Interaction Design

**Thema:**                    **Visuell simuliertes Erkunden taktiler Grafiken**

Eingereicht von:    Florentin Förschler

Matrikel:             20152126

Ausgabetermin:     5.2.2019

Abgabetermin:      1.7.2019

1. Betreuer (HS):    Herr Prof. Dominik Schumacher

2. Betreuer:           Dr. Michael Minge

.....  
1.Prüfer

.....  
2.Prüfer

# Visuell simuliertes Erkunden taktiler Grafiken

Zur Evaluation von digitalen Vorlagen für taktile Grafiken

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>4</b>
Hintergrund – Das Projekt „tacpic“	4
Problemstellung	5
Motivation	5
Ziel der Arbeit	5
<b>2. Stand der Forschung</b>	<b>6</b>
Allgemeine menschliche Wahrnehmung	6
Visuelle Wahrnehmung	7
Haptische Wahrnehmung	9
Taktile Grafiken	20
<b>3. Versuch 1 - Schwellpapier</b>	<b>28</b>
Teilnehmende	28
Stimuli	29
Versuchsaufbau	31
Versuchsablauf	32
Beobachtungen und Ergebnisse	33
<b>4. Entwicklung des Simulator</b>	<b>38</b>
Bisherige Simulatoren im Kontext taktiler Grafiken	38
Anforderungen	40
Umzusetzende Einschränkungen des Tastsinns	41
Umsetzung des Haptisch-zu-Visuell-Simulators	42

<b>5. Versuch 2 - Simulator</b>	<b>46</b>
Teilnehmende	46
Stimuli	46
Versuchsaufbau	47
Versuchsablauf	48
Beobachtungen und Ergebnisse	49
<b>6. Diskussion</b>	<b>54</b>
Vergleich der Beobachtungen aus Versuch 1 und Versuch 2	54
Vergleich zu (Loomis et al. 1991)	56
<b>7. Fazit</b>	<b>58</b>
Optimierungspotenzial	59
Ausblick	61
<b>8. Literaturverzeichnis</b>	<b>64</b>
<b>9. Anhang</b>	<b>69</b>
Heatmaps	70
Diagramme Vergleich zwischen Versuch 1 und Versuch 2	78
Stimuli Versuch 1 und Versuch 2	84

### Abstract

Um Vorlagen für die Produktion von verständlichen und qualitativ hochwertigen taktilen Grafiken zu erstellen, ist das Verständnis über die Möglichkeiten und Grenzen der haptischen Wahrnehmung von zentraler Bedeutung. In dieser Arbeit wird untersucht, ob sich die grundlegenden Eigenheiten der haptischen Wahrnehmung in Bezug auf die Erkundung taktiler Grafiken visuell auf einem Computermonitor simulieren lassen. Dazu wurde in Versuch 1 anhand von bereits in früheren Studien eingesetzten Stimuli untersucht, wie und unter welchen Einschränkungen blinde und sehingeschränkte Menschen taktile Grafiken erkunden und interpretieren können. Daraufhin wurde, unter Miteinbeziehung der Erkenntnisse aus Versuch 1 und psychophysiologischer Faktoren der haptischen Wahrnehmung, ein Simulator entwickelt. Dieser wurde von den Teilnehmenden des Versuchs 2 zur Erkundung der entsprechenden Stimuli aus Versuch 1 eingesetzt. Die Ergebnisse und Beobachtungen der beiden Versuche wurden verglichen. Die daraus folgenden Erkenntnisse sollen zur Weiterentwicklung des Simulators genutzt werden.

*»Integraler Bestandteil eines [...] Studiums ist der Umgang und das Verständnis für grafische Materialien. In der zunehmenden Visualisierung von Studium und Lehre spielen sie eine immer bedeutendere Rolle. Wo noch vor einigen Jahren seitenweise Text oder Tafelanschriften verwendet wurden, um einen Lehrinhalt zu veranschaulichen bzw. zu erläutern, kommen heutzutage häufig lediglich einige wenige Folien, ein Video oder eine Animation zum Einsatz (Ein Bild sagt mehr als tausend Worte). Diese Entwicklungen stellen für Menschen mit Blindheit oder Sehbehinderung oft eine große Barriere dar, die es zu überwinden gilt.«*

*(Jaworek 2014, S. 3)*

## 1. Einleitung

### 1.1. Hintergrund – Das Projekt „tacpic“

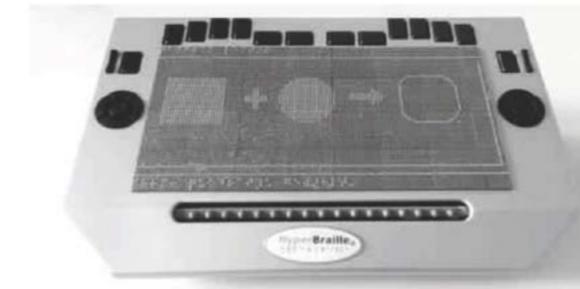
Im Sommersemester 2016 wurde an der Hochschule Magdeburg-Stendal innerhalb des Masterstudiengangs *Interaction Design* von Professor Dominik Schumacher ein ergebnisoffenes Semesterprojekt mit dem Oberthema „Konfigurator, digitaler Input – analoger Output“ angeboten. Unter anderem wurde von den Studierenden Laura Evers und Florentin Förschler ein Konzept zur automatisierten Umwandlung von digitalen Bilddateien zu taktilen Grafiken<sup>1</sup> entwickelt, welches blinden und sehbehinderten Menschen eine Teilhabe an der immer visueller werdenden Gesellschaft ermöglicht. Gleichzeitig ermöglicht dieses Konzept den sehenden Nutzenden individuelle und ansonsten visuelle Bildinhalte, mit blinden und sehbehinderten Menschen zu teilen. Während der vorläufigen Entwicklung wurden verschiedene Methoden und Materialien recherchiert und in Experimenten auf ihre Eignung zur Erstellung taktiler Grafiken untersucht. Die Ergebnisse wurden am Ende des Semesters hochschulintern präsentiert und stießen auf besonderes Interesse der Gründer- und Transferförderung an der Hochschule Magdeburg-Stendal. Es wurde auf die Möglichkeit hingewiesen, dass eine Weiterarbeit an diesem Konzept und die Entwicklung eines Geschäftsmodells durch eine Förderung im Programm *ego.-Gründungstransfer der Investitionsbank Sachsen-Anhalt* finanziert werden kann. Schon im Zuge der Vorbereitungen auf eine Bewerbung auf diese Förderung, fand eine Weiterentwicklung des Konzepts statt und das Team hat sich um Robert Wlček erweitert.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit besteht das Konzept darin, eine Webplattform anzubieten, welche es sehenden Nutzenden ermöglicht, digitale Vorlagen für taktile Grafiken zu gestalten oder visuelle digitale Grafiken und Fotografien auf die Plattform zu übertragen und dort mit Hilfe eines Editors ohne Vorkenntnisse so aufzubereiten, dass auf Grundlage dieser Daten seitens des Unternehmens taktile Grafiken produzierbar sind. Die so entstehenden digitalen Vorlagen für taktile Grafiken können für andere Nutzende auf der Plattform zur weiteren Optimierung und Bestellung freigegeben werden. Geht eine Bestellung ein, wird vom Unternehmen auf Basis der digitalen Vorlage eine physische taktile Grafik produziert und an den Endnutzer versandt.

<sup>1</sup> Der Begriff ‚taktile Grafiken‘ hat sich in der Literatur durchgesetzt und wurde in dieser Arbeit übernommen, obwohl ein aktives Ertasten taktiler Grafiken per Definition der haptischen Wahrnehmung zugeordnet wird.

### 1.2. Problemstellung

Eine der größten Herausforderungen des Projekts besteht darin, dass die Gestaltenden während der Erstellung kein direktes taktilen Feedback erhalten, um ihr Design evaluieren zu können (Evers et al. 2018). Vielversprechende Lösungsansätze zum Kooperativen Gestalten taktiler Grafiken von sehenden und blinden Personen, die im Projekt Tangram bzw. dessen Nachfolger Mosaik der TU Dresden entwickelt wurden, setzen spezielle, mitunter kostspielige Hardware wie taktile Displays in Form von Stiftplatten voraus, welche nur einigen wenigen Interessierten zur Verfügung stehen (Bornschein und Prescher 2014, S. 1).



**Abbildung 1:** „BrailleDis 7200“ Beispiel für ein taktilen Display. Über die berührungsempfindliche Stiftplattenmatrix können sowohl Grafiken angezeigt als auch Eingaben getätigt werden. (Bornschein und Prescher 2014, S. 2)

Das Erstellen von taktilen Bildern und Grafiken für blinde und sehbehinderte Menschen bringt besondere Herausforderungen mit sich. Es gelten besondere Einschränkungen, die nur teilweise automatisiert überprüft werden können. Eine der wichtigsten Herausforderungen besteht darin, dass sich die sehbeeinträchtigungsfreien Erstellenden in die blinden Nutzenden hineinversetzen müssen (Helios 2001, S. 3), um ein Gleichgewicht zwischen Prägnanz, Komplexität, Verständlichkeit und Aussagekraft der Darstellung zu finden.

### 1.3. Motivation

Es soll ein Beitrag dazu geleistet werden die von (Jaworek 2014, S. 3) beschriebene Barriere weiter abzubauen, indem ein unkomplizierter Zugang zu taktilen Grafiken ermöglicht wird. Intensive Recherchen innerhalb des Projekts „tacpic“ haben ergeben, dass Privatpersonen in Deutschland kaum die Möglichkeit haben, zu akzeptablen Bedingungen an taktile Grafiken zu gelangen oder diese für ihre Zwecke kostengünstig herstellen zu lassen. Auch öffentliche Einrichtungen, die selbst in der Lage wären taktile Grafiken herzustellen oder diese produzieren zu lassen, werden vor die Herausforderung gestellt, dass es kaum geeignete Vorlagen gibt bzw. diese nicht zugänglich sind. Das Projekt „tacpic“ und die vorliegende Arbeit sind eine Möglichkeit, an der Erleichterung eines solchen Zugangs mitzuwirken.

### 1.4. Ziel der Arbeit

Der Mangel an Vorlagen für taktile Grafiken scheint vor allem darin begründet, dass diese Vorlagen bisher nur von einigen wenigen Experten angefertigt werden. Eines der Ziele des Projekts „tacpic“ ist es, mehr Menschen dazu zu befähigen, Vorlagen für taktile Grafiken erstellen zu können. Der im Zuge dieser Ausarbeitung entwickelte Simulator soll dahingehend einen Lösungsansatz bieten, indem dieser den Erstellenden einerseits gestattet, sich in blinde und sehbehinderte Menschen hineinzuversetzen und andererseits die Möglichkeit bietet, die eigene oder die Arbeit anderer bezüglich ihrer haptischen Wahrnehmbarkeit zu überprüfen.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob sich die grundlegenden Eigenheiten der haptischen Wahrnehmung in Bezug auf die Exploration taktiler Grafiken visuell auf einem Computermonitor simulieren lassen.

## 2. Stand der Forschung

»Anders als bei den anderen bekannten Sinnen (Sehen, Hören, Riechen, Schmecken) lässt sich dem Tastsinn keinem alleinstehenden Sinnesorgan zuordnen.«

(Grunwald und Beyer 2001, S. 11)

### 2.1. Allgemeine menschliche Wahrnehmung

Dem menschlichen Organismus ist es durch die Verarbeitung von Reizeinflüssen möglich, Informationen über sich und seine Umwelt aufzunehmen. Die dazu nötigen sensorischen Systeme bestehen meist aus folgenden Einheiten (Goldstein und Ritter 2002, S. 40):

- 1.) Eine Struktur zum Sammeln und Modifizieren von aufgenommenen Reizen.
- 2.) Rezeptoren zur Umwandlung der Reizinformationen in elektrische Signale.
- 3.) Neuronen zur Signalaufbereitung und Weiterleitung an das Gehirn.
- 4.) Zentrale Neuronen im Gehirn zur Weiterverarbeitung der empfangenen Signale und deren Umsetzung in Wahrnehmungseindrücke.

In dieser Arbeit wird vorwiegend auf die Eigenschaften der Rezeptoren der visuellen und haptischen Wahrnehmung eingegangen.

### 2.2. Visuelle Wahrnehmung

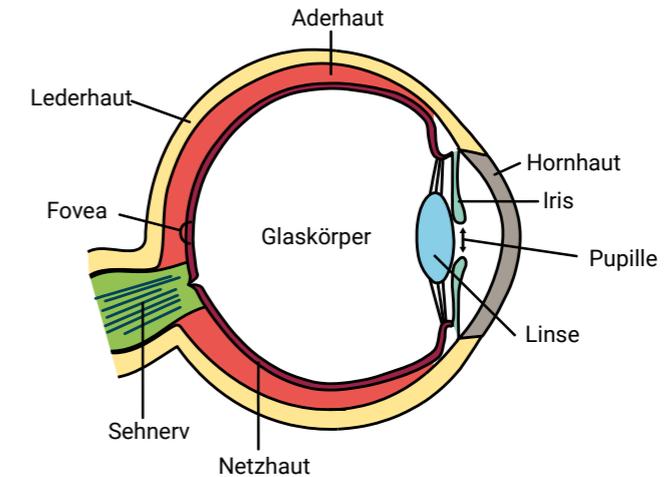


Abbildung 2: Das menschliche Auge nach (Goldstein 2002, S.68)

Die visuelle Wahrnehmung wird von (Goldstein und Ritter 2002) in folgende Themengebiete unterteilt:

#### Farbwahrnehmung

#### Objektwahrnehmung

#### Wahrnehmung von räumlicher Tiefe und Größe

#### Bewegungswahrnehmung

Auf die vielseitigen Aspekte dieser Kategorien kann im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden. Vielmehr soll ein Überblick über die grundlegenden Strukturen der visuellen Wahrnehmung gegeben werden.

Die Struktur zum Sammeln und Modifizieren von visuellen Reizen stellt das Auge dar. Durch die transparente **Hornhaut** (Kornea) und die in ihrem Durchmesser veränderbare **Pupillenöffnung** fallen Lichtstrahlen auf die **Linse**. Die durch die Linse fokussierten Lichtstrahlen treffen auf die **Netzhaut**, die aus einem

komplexen Neuronennetzwerk besteht, welches die einfallenden Lichtreize verarbeitet und weiterleitet. Die Basis dieses Netzwerks besteht aus den **Rezeptoren der visuellen Wahrnehmung**, den **Stäbchen** und **Zapfen**. Diese sind Photorezeptoren, die auf einfallende Lichtstrahlen mit dem Aussenden elektrischer Signale reagieren (Goldstein und Ritter 2002, S. 40). Die unterschiedlichen Photorezeptoren sind zwar relativ ähnlich aufgebaut, erfüllen aber verschiedene Aufgaben. Die Stäbchen sind lichtempfindlicher und dadurch besser zur Reizverarbeitung bei geringem Lichteinfall geeignet. Während der Lichteinfall groß genug ist, um von den weniger lichtempfindlichen Zapfen detektiert zu werden, findet eine aktive Hemmung der Stäbchen statt. Es gibt drei Arten von Zapfen, die sich hinsichtlich der in ihnen befindlichen photosensitiven Pigmenten unterscheiden. Deshalb reagieren sie unterschiedlich auf die Wellenlänge der einfallenden Lichtstrahlen, wodurch das Phänomen der Farbwahrnehmung erklärt werden kann (Schandry 2011).

Das Phänomen Farbe ist keine physikalische Eigenschaft des Lichts. Die Empfindung für Farbe ist sozusagen eine Zusatzleistung unseres Wahrnehmungsapparats, die dem Licht eine Qualität verleiht, die lediglich auf der subjektiven Seite der Wahrnehmungswelt vorhanden ist. Allerdings hat die Farbwahrnehmung ihre Basis in einer physikalischen Charakteristik des Lichts, nämlich in seiner Wellenlänge.

(Schandry 2011, S. 251)

Stäbchen und Zapfen unterscheiden sich nicht nur in Form und Funktion, sondern auch durch ihre Anzahl und Verteilung auf der Netzhaut. Auf der menschlichen Netzhaut sind etwa 120 Millionen Stäbchen und sechs Millionen Zapfen verteilt. Wobei im Bereich des schärfsten Sehens, der **Fovea** (Sehgrube), ausschließlich Zapfen vorkommen. Die Signale der beiden Photorezeptoren werden durch das komplexe Neuronennetzwerk<sup>2</sup> aus Bipolarzellen, Horizontalzellen, Amakrinzellen und Ganglienzellen aufbereitet und verlassen das Auge über den Sehnerv zum Corpus geniculatum laterale, von dem sie an den primären visuellen Cortex weitergeleitet werden (Goldstein und Ritter 2002).

Da die Zapfen und Stäbchen primär auf die Veränderung der einfallenden Lichtstrahlen reagieren, würde sich eine Rezeptorer müdung einstellen, sobald das Auge einem konstant unbewegten Bild ausgesetzt ist.

Das Bild könnte nach und nach nicht mehr wahrgenommen werden. Um diesen Effekt zu vermeiden, finden automatisch Mikrobewegungen des Auges statt, welche dafür sorgen, dass die einfallenden Lichtstrahlen minimal auf der Netzhaut verschoben werden und stets unterschiedliche Photorezeptoren aktivieren, um so die Sensitivität gegenüber dem Stimulus aufrecht zu erhalten. Diese Mikrobewegungen des Auges werden als **Drift** und **Mikrosakkaden** bezeichnet. Während einer andauernden Fixation beschreibt der Drift eine langsame Verschiebung des Auges, weg vom fixierten Objekt. Die Mikrosakkaden korrigieren diese Verschiebung und sorgen für eine Refixierung des Objekts. Als **Tremor** wird ein minimales Zittern des Auges bezeichnet, welches ebenfalls für die Aufrechterhaltung der Sensitivität dienlich sein soll, aber auch nur ein Nebeneffekt von Instabilitäten der Augenmuskulatursteuerung sein könnte (Joos und Velichkovsky 2003, S. 4–5).

## 2.3. Haptische Wahrnehmung

»Haptik, die: (Psychologie) Lehre vom Tastsinn«

(DWDS – Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache)

Die »[...] Frage nach der „Einheitlichkeit des (Tast-) Sinnes“ [ist] ein altes philosophisches und erkenntnistheoretisches Problem, das bis in unsere Tage hineinreicht.«

(Grunwald und Beyer 2001, S. 4)

Wie (Doerrer, S. 9) und (Grunwald und Beyer 2001, S. 7) feststellen, sind die Begrifflichkeiten, welche den Tastsinn kategorisieren, nicht eindeutig festgelegt. Zumindest nutzen nicht alle Autoren dieselben Begriffe mit derselben Bedeutung. (Grunwald und Beyer 2001, S. 7) beschreiben die Einführung des Systembegriffs als drastischste Veränderung der Betrachtungsweise und den damit verbundenen Begriffs- und Bedeutungswandel. Die Bedeutungen der tragenden Begriffe „taktil“ und „Haptik“ befinden sich bis heute im Wandel. Dem Systembegriff bedienen sich auch (Goldstein und Ritter 2002, S. 431) sie unterteilen das „haptisch-somatische System“ in Hautsinne und Haltungssinne. Wobei die Hautsinne mit dem Begriff der Somatosensorik benannt werden. (Schandry 2011) wiederum nennt die Somatosensorik als Oberbegriff für folgende Unterkategorien:

Sensorik der Körperoberfläche: Hautsinne, Hautsensibilität (Ekterozeption)  
 Sensorik des Bewegungsapparats: Tiefensensibilität (Propriozeption) mit Informationen aus Muskeln, Sehnen und Gelenken  
 Sensorik der inneren Organe: Viszerozeption oder Enterozeption  
 Ein weiteres Kriterium, ob eine Wahrnehmung als taktil oder haptisch zu beurteilen ist, wird von (Grunwald und Müller 2017, S. 22) anhand des Aktivitätszustandes des gereizten Subjekts definiert. Wird die Haut eines Menschen im Ruhezustand durch einen äußeren Einfluss deformiert, ist die Wahrnehmung taktil. Ist die Deformation der Haut die Folge aktiver eigenständiger Bewegungen, gilt die Wahrnehmung als haptisch. Ein Überblick über den Komplex der Haptik und die verschiedenen Unterkategorien lässt sich in der DIN EN ISO Norm zur Ergonomie der Mensch-System-Interaktion finden (Abbildung 3).

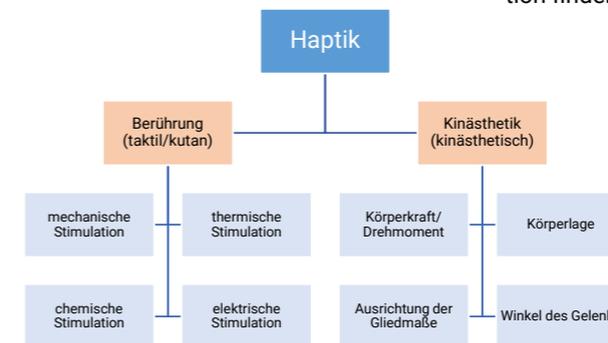


Abbildung 3: Unterteilung der Haptik nach DIN EN ISO 9241\_910:2011

<sup>2</sup> Auf Grund der Komplexität und dem begrenzten Umfang dieser Arbeit, kann an dieser Stelle nicht weiter auf die neuronalen Mechanismen und die Verarbeitung im visuellen Cortex eingegangen werden, dem interessierten Leser sei jedoch empfohlen die hier zitierte Primärliteratur zu bemühen.

Innerhalb dieser Arbeit gelten die Einteilung und Begrifflichkeiten des Organigramms (siehe Abbildung 3) und die folgende Beschreibung des Oberbegriffs der haptischen Wahrnehmung sowie der beiden Unterkategorien kinästhetische Wahrnehmung und taktile Wahrnehmung, wobei Fokus auf mechanischer Stimulation liegt.

**Taktile Wahrnehmung:** Die oberflächennahen Sinneszellen der taktilen Wahrnehmung oder auch *Oberflächensensibilität* (Silbernagel und Despopoulos 1991) (Schuenemann und Widmann 1998) befinden sich in der Haut des Menschen. Sie sind elementar für die Wahrnehmung von unmittelbaren Umweltreizen, wie der Oberflächenbeschaffenheit von Gegenständen oder Bewegungen berührter Objekte.

**Kinästhetische Wahrnehmung:** Die Sinneszellen der kinästhetischen Wahrnehmung oder auch Tiefensensibilität (Schuenemann und Widmann 1998) befinden sich in Sehnen, Muskeln und Gelenken des Menschen (Burdea und Brooks 1996). Sie detektieren die Stellung, Lage und Bewegung der menschlichen Körperteile, sowie Kräfte, die durch Muskeln erzeugt werden. Sie liefern also überwiegend Informationen über den Körper selbst, als über dessen Umwelt.

**Haptische Wahrnehmung:** Haptische Wahrnehmung bildet den Überbegriff zu taktiler und kinästhetischer Wahrnehmung und ist als Kombination der Sinnesindrücke beider Wahrnehmungskategorien zu verstehen. Aktives Ertasten setzt eine Bewegung von Händen und Fingern voraus und ist demnach als haptische Wahrnehmung zu klassifizieren. Der Begriff ‚Tastsinn‘ kann synonym zu haptischer Wahrnehmung verwendet werden (Doerr, S. 11).

### 2.3.1. Rezeptoren der taktilen Wahrnehmung

Freie Nervenenden nehmen hauptsächlich Schmerz- und Temperaturreize auf, dienen aber auch als Berührungssensoren der behaarten Haut, an welcher sie Haarfollikel umwickeln und dadurch auf die Bewegung des Haares mit der Weiterleitung eines Reizes reagieren können. (Schandry 2011) In der unbehaarten Haut des Menschen sind vier Arten von Sinneszellen der taktilen Wahrnehmung zu finden, welche vier Nervenfasern zugeordnet werden können. Diese reagieren auf mechanische Auslenkungen der Haut und werden demnach auch **Mechanorezeptoren** genannt. Aus den Eigenschaften dieser Mechanorezeptoren leitet sich die Einordnung in vier **neuronale Subsysteme** ab (Goldstein und Ritter 2002). Diese werden häufig mit folgenden Abkürzungen angegeben:

**SA-I**  
**SA-II**  
**RA-I**  
**RA-II**

**SA;** steht für *Slowly Adapting*, also Rezeptoren, die sich nur langsam an einen anhaltenden Reiz gewöhnen und daher praktisch durchgehend reagieren, solange der Reiz anhält. Die Intensität der Reaktion nimmt nur langsam ab (siehe Abbildung 4).

**RA;** steht für *Rapidly Adapting*, also Rezeptoren, die sich sehr schnell an einen anhaltenden Reiz gewöhnen und daher vor Allem Intensitätsveränderungen des anliegenden Reizes detektieren.

Die römischen Ziffern **I** oder **II** geben einen Hinweis auf die relative Größe des **rezeptiven Feldes** des jeweiligen Rezeptors. Im Kontext der taktilen Wahrnehmung wird das Haut- bzw. Gewebeareal als rezeptives Feld bezeichnet, welches die Einwirkung des Reizes an den Rezeptor überträgt (Grunwald und Beyer 2001, S. 30). Die Arbeit von (Johansson und Vallbo 1983, S. 27) beschreibt zentrumsnahe Bereiche innerhalb der rezeptiven Felder, welche eine besonders erhöhte Sensibilität aufweisen und in ihrer Lage den Endungen der jeweiligen Nervenfasern entsprechen.

Neben der Unterteilung in neuronale Subsysteme, findet auf Grundlage der unterschiedlichen Wahrnehmungsschwellen in Bezug auf Auslenkung und Auslenkungsfrequenz auch eine Unterteilung in vier **psychophysische Subsysteme** statt (Bolanowski Jr. et al. 1988).

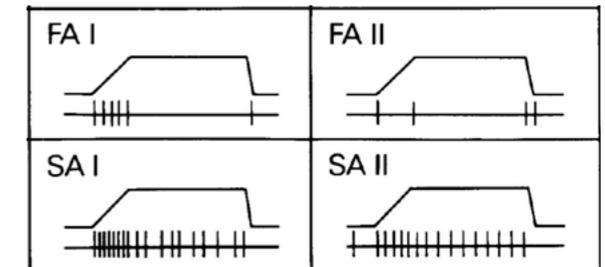
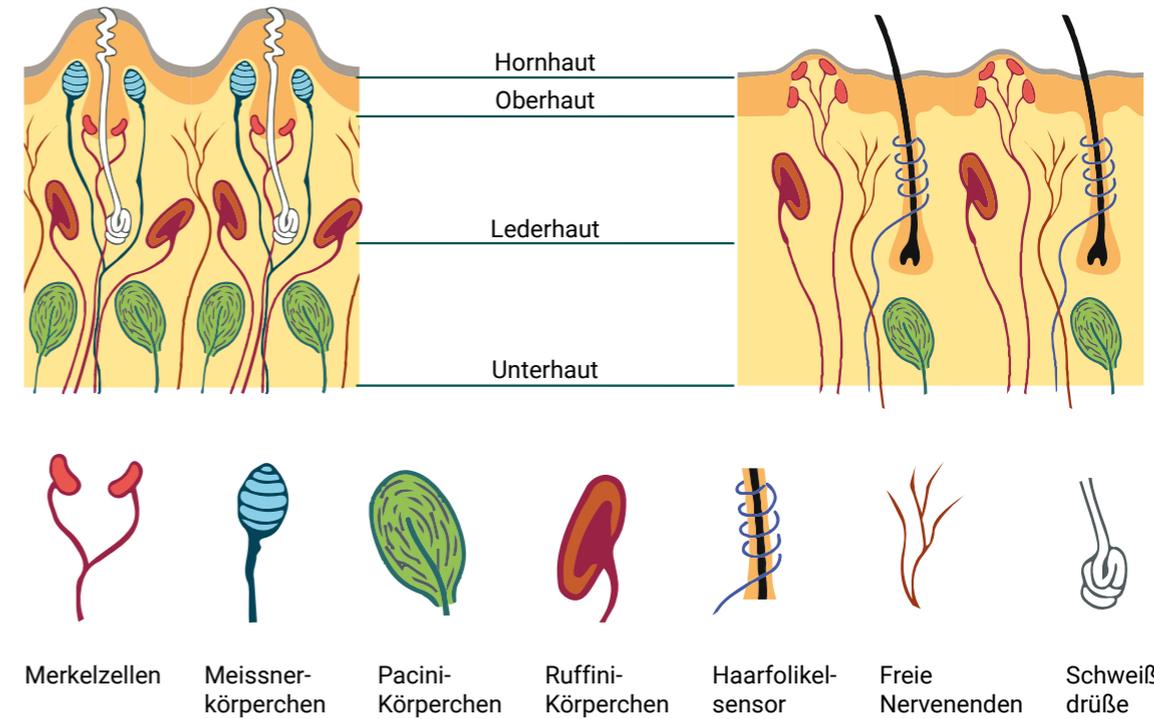


Abbildung 4: Kodierungseigenschaften der Mechanorezeptoren. (nach Johansson und Vallbo 1983, S. 27)

Neuronales Subsystem	SA-I	SA-II	RA-I	RA-II
Sinneszellen	Merkelzellen	Ruffini-Körperchen	Meissner-Körperchen	Pacini-Körperchen
Reiz	Vertikaler Druck	Dehnung der Haut	leichtes Antippen	Schnelle Vibration
Rezeptives Feld Größe in mm <sup>2</sup>	3- 12	50 - 75	3 -19	100 - 300
Randbegrenzung des rezeptiven Felds	klar abgegrenzt	diffus	klar abgegrenzt	diffus
Psychophysisches Subsystem	NP III	NP II	NP I	P
Wahrnehmung	Druck, Berührung, (Bewegung)	Dehnung, Druck, Berührung	Berührung, Vibration, (Bewegung)	Berührung, Vibration
Anzahl afferenter Nervenfasern pro cm <sup>2</sup>	Fingerkuppe: 70 Fingerglieder: 30 Handfläche: 8	Fingerkuppe: 10 Fingerglieder: 16 Handfläche: 18	Fingerkuppe: 140 Fingerglieder: 40 Handfläche: 25	Fingerkuppe: 25 Fingerglieder: 10 Handfläche: 10

NP steht für „nichtpacinisch“, P steht für „Pacini-Körperchen“

**Tabelle 3:** Übersicht über die vier Typen von Mechanorezeptoren mit zugehörigen Sinneszellen nach Zusammenfassung von (Hatzfeld 2013, S. 18) Größenbereiche der rezeptiven Felder auf Basis der Quellen: (Treede 2007), (Dargahi und Najarian 2004), (Burdea und Brooks 1996), (Howe 1993), (Treede 2007), (Vallbo und Johansson 1984), (Phillips et al. 1990, S. 590) ergänzt durch Reizangaben und Einteilung in die psychophysischen Subsysteme nach (Goldstein und Ritter 2002) Wahrnehmungsbegrifflichkeiten von (Grunwald und Beyer 2001, S. 29).



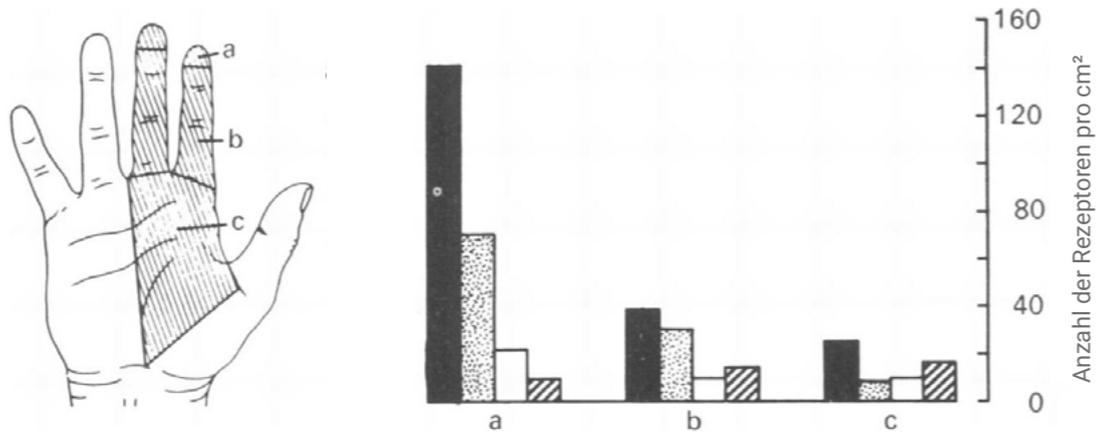
**Abbildung 5:** Mechanorezeptoren. Querschnitt durch die unbehaarte und behairte Haut des Menschen (nach Treede 2007, S. 308 ; Goldstein 2002, S.433 und Peters et al. 2009b, S. 15759)

**Merkelzellen** treten in Clustern innerhalb der Oberhaut (Epidermis) am Übergang zur Lederhaut (Dermis) auf und sind scheibenförmig ausgeprägt. Ihre Anzahl in den Fingerspitzen ist deutlich erhöht. Dort sind sie entlang der Papillarleisten angeordnet (Goldstein und Ritter 2002), (Vallbo und Johansson 1984).

**Ruffini-Körperchen** befinden sich in der mittleren Lederhaut und zeichnen sich durch eine Verzweigung von Nervenfasern aus, welche sich innerhalb einer spindelförmigen Kapsel befinden (Vallbo und Johansson 1984), (Goldstein und Ritter 2002).

**Meissner-Körperchen** befinden sich in erhöhter Anzahl in der Lederhaut der Hand- und Fußinnenflächen, angeordnet entlang der Papillarleisten, nimmt ihre Verteilungsdichte in Richtung der Fingerspitzen zu. Sie sind von ovaler Form und bestehen aus Stapeln geschichteter, abgeflachter Zellen, welche von einer Nervenfaser durchwunden sind (Schandry 2011), (Goldstein und Ritter 2002), (Vallbo und Johansson 1984).

**Pacini-Körperchen** sitzen in der Unterhaut (Subkutis) und bestehen aus einer von mehreren Schichten umgebenen Nervenfaser. Sie kommen ebenfalls in inneren Organen und Gelenken vor (Schandry 2011), (Goldstein und Ritter 2002).



**Abbildung 6:** Verteilungsdichte der Mechanorezeptoren der vier Neuronalen Subsysteme. Die Säulen stehen von links nach rechts für die Mechanorezeptoren der Fasern RA I, SA I, RA II und SAI (Johansson und Vallbo 1979, S. 291)

Die Verteilungsdichten der Sinneszellen unterscheiden sich innerhalb der Körperregionen. In ihren Untersuchungen konnten (Johansson und Vallbo 1979, S. 291) die Verteilungsdichten für die Rezeptoren der vier neuronalen Subsysteme in der menschlichen Hand ermitteln (siehe Abbildung 6). In der Studie von (Peters et al. 2009b, S. 15758) wurden geschlechtsspezifische Unterschiede der taktilen Wahrnehmung untersucht. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass der bedeutendste Faktor für unterschiedlichen taktilen die Fingergröße ist. Die Ursache dafür liegt an der Tatsache, dass die Anzahl von Merkelzellen. Daraus folgen eine niedrigere Verteilungsdichte und damit auch eine geringere Tastschärfe bei größeren Fingern.

Die Verarbeitung von zwei unterschiedlichen taktilen Mustern, welche auf zwei Fingern derselben Hand einwirken ist prinzipiell möglich, hat jedoch negative Auswirkungen auf den Aufmerksamkeitsmechanismus, im Vergleich zur Verarbeitung unterschiedlicher Muster, welche auf einen Finger einwirken. Dieser Effekt ist deutlich geringer, wenn es sich bei den beiden Fingern nicht um Finger der gleichen Hand handelt (Craig 1985, S. 496).

### 2.3.2. Die Zweipunktschwelle

Die Zweipunktschwelle (auch Zwei-Punkte-Diskriminationsschwelle genannt) gibt den kleinsten Abstand zwischen zwei punktuellen, **statischen Reizungen** der Haut an, bei welchem diese noch als zwei getrennte Reizungen wahrgenommen werden können (Goldstein und Ritter 2002, S. 442 – 443). Die Zweipunkteschwelle unterscheidet sich zwischen unterschiedlichen Körperregionen deutlich. Sie wurde bereits 1829 von dem Leipziger Physiologen Ernst Heinrich Weber erforscht (Grunwald und Beyer 2001, S. 18), indem ein abgestumpfter Zirkel an die verschiedenen Körperregionen der Versuchspersonen angelegt wurde und diese feststellen sollten, ob es sich dabei um eine oder beide Zirkelspitzen handelt.

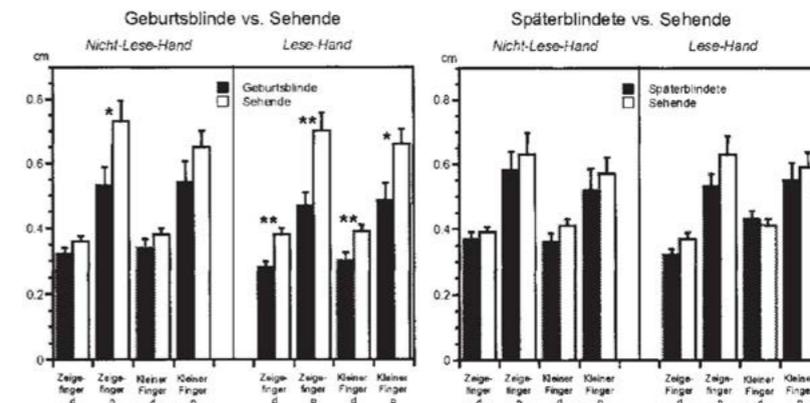
Mit einer Zweipunkteschwelle von 3–5mm zählen Zungenspitze, Lippen und Fingerspitzen zu den berührungsempfindlichsten Regionen, wohingegen an Rücken, Bauch und Oberschenkel eine Zweipunkteschwelle von 5 – 7cm festzustellen ist. (Schandry 2011, S. 232)

Für die Fingerspitze des Zeigefingers liegt der mittlere Abstand zwischen den Zentren der Mechanorezeptoren nach (Johnson und Phillips 1981, S. 1189) bei ungefähr 1,0 mm.

Das entspricht der von E. H. Weber für die Fingerbeere des Zeigefingers ermittelten Zweipunkteschwelle, da zur Erkennung zweier getrennter Punkte mindestens ein nicht angeregter Mechanorezeptor liegen sollte.

Für eine niedrigere Zweipunkteschwelle spricht die Beobachtung, dass blinde Menschen Brailleschrift lesen können, obwohl die Zentren der erhabenen Punkte lediglich 2,3-2,5 mm voneinander entfernt sind (Fakoo 2018). Dieser Umstand könnte durch eine besonders niedrigere Zweipunkteschwelle bei blinden Menschen aufgrund einer kompensatorischen Sensibilisierung erklärt werden.

Die Untersuchungen von (Röder und Rösler 2001, S. 91), in denen die Zweipunkteschwelle zwischen spät-erblindeten, geburtsblinden und sehenden Menschen gemessen und verglichen wurden, ergaben für die blinde Versuchsgruppe eine signifikant geringere Zweipunkteschwelle als bei der sehenden Kontrollgruppe. Für späterblindete Menschen ließ sich aber nur eine nicht signifikant geringere Schwelle nachweisen (siehe Abbildung 7). Die höhere taktile Wahrnehmungsleistung von geburtsblinden Menschen kann jedoch nicht erklären, warum auch späterblindete Menschen dazu in der Lage sind, Braille zu lesen.



**Abbildung 7:** Zweipunkteschwelle von blinden, geburtsblinden und sehenden Menschen (Röder und Rösler 2001, S. 91)

## 2.3.3. Brailleschrift

»Diese bekannte Punktschrift für Blinde wurde 1825 von dem Franzosen Louis Braille erfunden und ist heute [...] die erfolgreichste und effektivste Blindenschrift der Welt.«

(Fakoo 2018)

Bei der von Louis Braille entwickelten Punktschrift setzt sich jeder Buchstabe aus einer Kombination von erhabenen Punkten innerhalb einer 2x3 Matrix zusammen. Die für Braille-Schrift bekannten Leseraten schwanken zwischen 90 und 200 Wörtern pro Minute, wobei professionelle Leser die Punkte systematisch mit mehreren Fingern abtasten. Die Leserate ist, wie beim Lesen von Schwarzschrift<sup>3</sup> auch, von den sprachlichen Fähigkeiten des Lesers abhängig (Röder und Rösler 2001, S. 89–90)

Nach (Fakoo 2018) existieren in der deutschen Brailleschrift vier verschiedene Kürzungsgrade:

**Basisschrift**

Alle Schwarzschrift-Buchstaben werden eins zu eins in Braille-Zeichen übersetzt. Es gibt keine Großbuchstaben, diese werden mit einem vorangestellten Sonderzeichen markiert.

**Vollschrift**

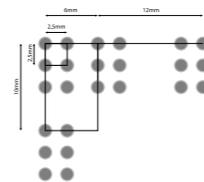
Häufig vorkommende Laute wie (/ch/, /sch/, /ie/, /ei/, /au/, ...) werden durch eigene Braille-Zeichen ausgedrückt. In dem auf acht Punkten basierenden Computerbraille/Eurobraille kann diese Kürzungsform nicht angewendet werden, da die Braille-Zeichen, die zur Darstellung der Laute nötig wären, hier für die Darstellung von Zahlen genutzt werden. Dafür können durch die zusätzlichen beiden Punkte Großbuchstaben und Sonderzeichen dargestellt werden.

**Kurzschrift**

Die Zeichenanzahl wird durch weitere Kürzungsregeln im Vergleich zur Vollschrift um 30-40% verkürzt.

**Stenografie**

Um es zu ermöglichen, gesprochene Sprache mitzuschreiben, werden ganze Worte, Redewendungen und Sätze abgekürzt, dabei bekommt ein Streifenschreiber<sup>4</sup> zum Einsatz.



**Abbildung 8:**  
6-Punkt-Braille Raster (nach Fakoo 2018)

<sup>3</sup> Schwarzschrift ist die Bezeichnung für jede Form von Schrift für sehende Menschen, um sie von der Brailleschrift oder anderen Blindenschriften zu unterscheiden.

<sup>4</sup> Streifenschreiber sind Geräte, mit denen Braille-Zeichen auf Papierstreifen geprägt werden können.

## 2.3.4. Braille und die Wahrnehmungsforschung

Um zu untersuchen, wie die einzelnen Mechano-rezeptoren der Fingerbeere des Zeigefingers auf Braille-Buchstaben reagieren, haben (Phillips et al. 1990) die erhabenen Braille-Zeichen am fixierten Finger der Versuchspersonen entlanggeführt (siehe Abbildung 9) und die entstehenden Impulse am Mittelarmnerv der Versuchspersonen mittels einer zuvor eingeführten **Wolframnadel-Mikroelektrode**<sup>5</sup> aufgezeichnet. Aus den aufgezeichneten Daten wurden „Spatial Event Plots“ (SEP) generiert (siehe Abbildung 10). Eine mögliche Interpretation der SEP legt den Schluss nahe, dass es sich bei den visualisierten Punkten um die, in Abhängigkeit von Ort und Zeit, aufgezeichneten Reize einer einzelnen Nervenzelle handelt (Phillips et al. 1990).

Die SPEs der SA I und RA I Nervenfasern zeigen keine Lücke zwischen den visualisierten Impuls-Clustern, dennoch lassen sich die durch die Braille-Zeichen

hervorgerufenen Muster deutlich voneinander unterscheiden. Diese Beobachtung könnte erklären, warum auch späterblindete Menschen Braille lesen können, obwohl die Distanz der Braille-Punkte unterhalb der gemessenen Zweipunkeschwelle liegt. Hinzu kommt, dass in diesem Versuch durch die Bewegung des Stimulus über die Haut eine **dynamische, laterale Reizung** erzeugt wurde, während beim Feststellen der Zweipunkeschwelle lediglich eine **statische, dorsale Reizung** erzeugt wird. Ernst Heinrich Weber selbst hat den Einfluss der Bewegung auf die Wahrnehmungsmöglichkeiten des Tastsinns bereits beobachtet, ihm jedoch in seiner weiteren Forschung – zumindest, wenn es nach dem Kasseler Experimental-Psychologe David Katz geht – eine zu geringe Bedeutung beigemessen.

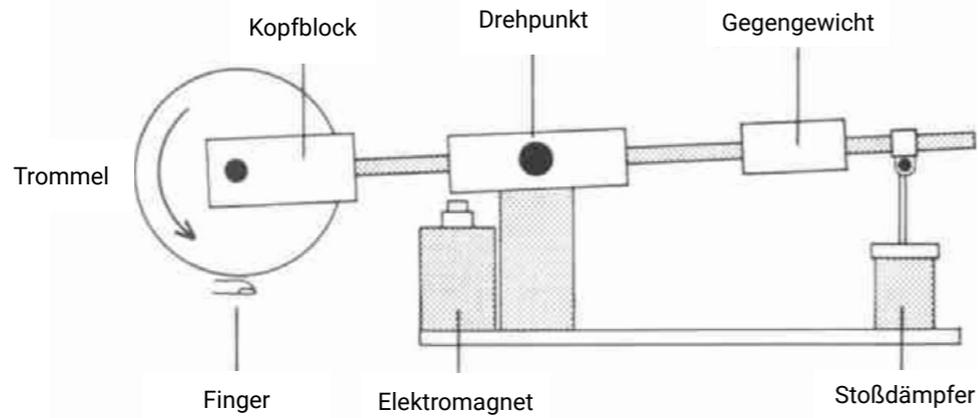
»Es ist überhaupt kaum zu glauben, wie viel bei der Wahrnehmung der Form der Körper und der Form ihrer Oberfläche im Kleinen (der Rauigkeiten oder Glätte), ferner bei der Wahrnehmung der Härte und Weichheit und des Abstandes der Körper von einander [sic!] von der absichtlichen Bewegung unserer Glieder abhängt. Man verschließe die Augen, lasse die Hand wohlunterstützt ruhen. Wenn nun ein Anderer Glas, Metall, Papier, Leder und andere Körper mit den Fingerspitzen in Berührung bringt und an denselben vorbeibewegt, so verwechselt man Körper mit einander, die man sogleich unterscheidet, wenn man die Hand bewegt.«

(Weber 1851, S. 81)

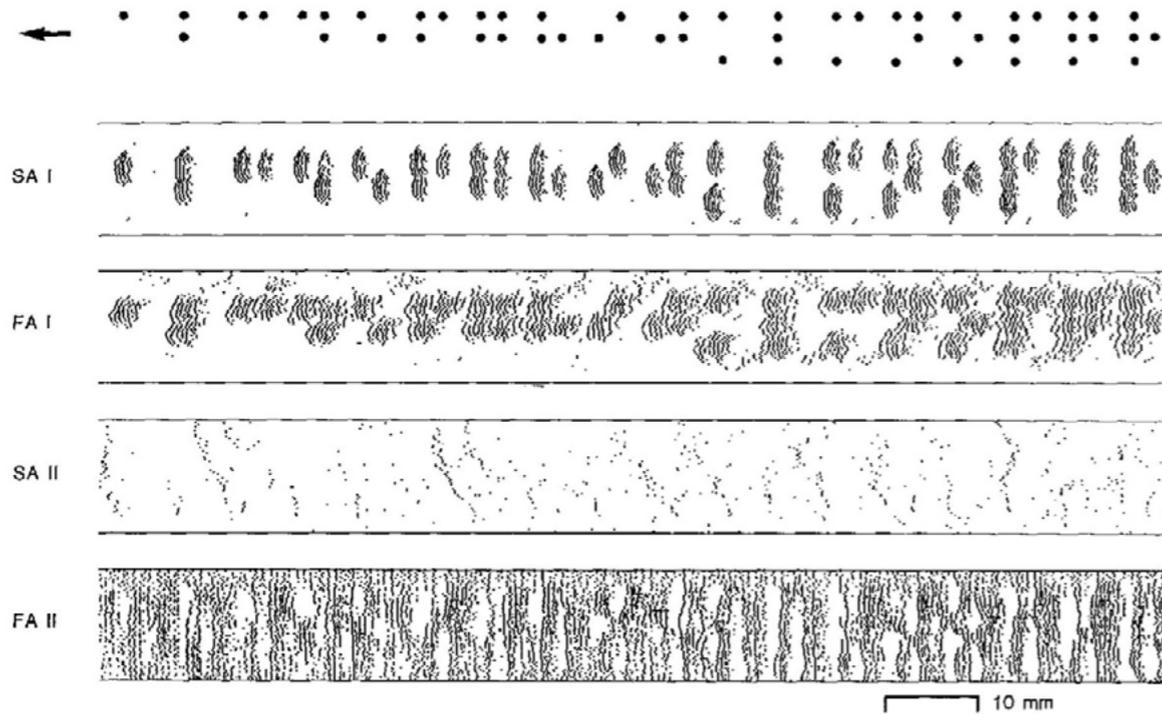
»Angeichts derartiger Feststellungen möchte man doch fragen, warum man niemals dazu vorgedrungen ist, die Bewegung grundsätzlich als einen elementaren gestaltenden Faktor der Tastphänomene herauszuheben, unentbehrlich fast in dem Sinn, wie das Licht nötig ist, damit es zu Farbempfindungen komme.«

(Katz 1925, S. 58)

<sup>5</sup> Wolframnadel-Mikroelektroden sind extrem dünn (100-200µm am Schaft, 1-5µm an der Spitze). Auf Grund des Formfaktors und der elektronenleitenden Eigenschaft des Metalls sind sie zur Abnahme von elektrischen Impulsen an einzelnen Nervenfasern geeignet.



**Abbildung 9:** Schematische, seitliche Darstellung des Muster Stimulators. Das mit Braille-Zeichen geprägte Papier wurde auf der Außenseite der Trommel fixiert. Die Trommel rotiert und wird durch einen Magneten auf den fixierten Finger abgesenkt. Die Kontaktkraft wird über das Gegengewicht justiert. Nach jeder Umdrehung wird die Trommel um 0,2 mm entlang ihrer Achse verschoben. (Johnson und Lamb 1981, S. 120)



**Abbildung 10:** Spatial Event Plots von Braille-Zeichen (Phillips et al. 1990, S. 591)

### 2.3.5. Visuelle und haptische Auflösung

Die Ergebnisse von (Johnson und Phillips 1981, S. 1189) deuten darauf hin, dass die mittlere Rezeptorverteilung in 2,0 – 2,5 mm der Haut der Zeigefingerbeere ungefähr einer Winkelminute auf der Fovea entsprechen. Innerhalb der Fovea, dem Bereich des schärfsten Sehens auf der Netzhaut, beträgt der Abstand der Zapfen zwischen 0,002 und 0,003 mm was einer maximalen Winkelauflösung von 25" bis 27" (Winkelsekunden) entspricht (Johnson und Phillips 1981, S. 1189) (Schandry 2011, S. 251). Der mittlere Abstand zwischen den Zentren der Mechanorezeptoren liegt nach (Johnson und Phillips 1981, S. 1189) bei ungefähr 1,0 mm.

Bei einem Visus von 1 hat ein Mensch eine Winkelsehschärfe von einer Winkelminute, bei einem Abstand von 60cm entspricht das einer Ortauflösung von etwa 0,175 mm.

Die Untersuchungen von (Hartridge und Owen 1922) ergeben, dass für die visuelle Erkennung von Buchstaben, die Buchstabenhöhe mindestens 2' (Winkelminuten<sup>6)</sup>) entsprechen muss, damit sie zu 50% korrekt erkannt werden können. Durch die Versuche von (Johnson und Phillips 1981) wird für die taktile Erkennung von Buchstaben, bei gleicher Erfolgsquote eine Höhe von 5,0 mm ermittelt. Daraus lässt sich ableiten, dass sowohl zum visuellen als auch haptischen Erkennen von Schwarzschrift-Buchstaben mindestens ein Rezeptorraster von 4x5 nötig ist. Braille-Zeichen können schon bei einer Buchstabenhöhe von 6 mm eindeutig differenziert werden.

Sowohl die Antwortreize der Photorezeptoren des Auges, als auch die der Mechanorezeptoren der SA-Nervenfasern sind abhängig von einem Intensitätswechsel eines äußeren Reizes. Bei einem gesunden Menschen wird dieser Intensitätswechsel automatisch in Form von Mikrobewegungen des Auges gewährleistet (Drift und Mikrosakkaden). Für die Haptische Wahrnehmung sind solche automatischen Mechanismen nicht bekannt, weshalb eine bewusste – oder unbewusste – Bewegung z.B. der Finger notwendig ist um kontinuierliche Antwortreize der SA-Rezeptoren zu erzeugen.

6 Zwei Winkelminuten entsprechen bei einem Abstand von 60cm ca. 0,35mm

## 2.4. Taktile Grafiken

»Bei taktilen Grafiken handelt es sich um grafische Materialien, die durch den Tastsinn erfahrbar sind. Linien, Texturen und andere Objekte können dabei als erhabene Formen präsentiert werden, um eine Unterscheidbarkeit von Inhalt und Hintergrund zu ermöglichen.« (Bornschein und Engel 2018, S. 3)

Taktile Grafiken werden prinzipiell auf verschiedenste Weise umgesetzt, etwa durch das Zusammensetzen von unterschiedlichen Materialien zu Collagen oder indem Darstellungen zunächst als Matrizen angefertigt und dann durch Thermoformen auf Folie vervielfacht werden. Geringe Stückzahlen lassen sich auch durch das händische nachzeichnen mit „Window-Color“ herstellen, auch kommen Brailledisplays in Form von Stiftplatten zum Einsatz, welche Grafiken zwar in Echtzeit, aber in vergleichsweise geringer Auflösung anzeigen können (siehe Abbildung 1). Mit grafikfähigen Braille-Prägegeräten ist es möglich, einfache Grafiken in geringer Auflösung in Papier zu prägen, alternativ wird Schwellpapier verwendet.

**Schwellpapier** ist ein Spezialpapier zur Herstellung taktiler Grafiken. Es ist mit wärmeempfindlichen Mikrokapseln beschichtet, weshalb es auch Mikrokapselpapier genannt wird. Unter Wärmeeinfluss schwellen die Mikrokapseln an und so können erhabene Linien, Flächen oder ganze Reliefgrafiken erzeugt werden. Klassischerweise wird das abzubildende Motiv durch einen Laserdrucker oder Kopierer auf das Papier übertragen. Tintenstrahldrucker eignen sich nicht zur Bedruckung, da die Tinte von der Beschichtung des Schwellpapiers abgewiesen wird.<sup>7</sup>

Um schließlich eine Schwellung zu erzeugen, wird das bedruckte Papier durch ein spezielles Heizgerät, einem „Fuser“ geführt. Durch die Bestrahlung der Wärmelampe im „Fuser“ erhitzen sich die dunkel bedruckten Stellen stärker und die Mikrokapseln an diesen Stellen schwellen an (Kurze 1999, S. 19–20).

Mit einem Lasergraviersystem ist es möglich das Schwellpapier selektiv zu erhitzen und so unabhängig von einer Bedruckung erhabene Linien, Muster oder Flächen zu erzeugen. Diese Methode wurde eingesetzt um die Stimuli für Versuch 1 zu erzeugen.

### 2.4.1. Erkennen taktiler Grafiken

*»Ein taktilen Bild muss sequentiell abgetastet und mental zu einem Gesamtkonzept zusammengefügt werden, während ein visuelles Bild quasi „auf einen Blick“ wahrgenommen wird.«*

*(Grunwald und Beyer 2001, S. 95)*

*»Während es der Sehsinn ermöglicht eine Darstellung nahezu simultan, auf einen Blick, in ihrer Gänze wahrzunehmen, arbeitet der Tastsinn seriell, Stück für Stück. Daher dauert das Ertasten oft deutlich länger als das Betrachten.«*

*(Jaworek 2014, S. 8)*

Die wichtigsten Faktoren für das Erkennen taktiler Grafiken fasst (Helios 2001, S. 6–8) zusammen:

**Der Zeitpunkt der Erblindung** ist für das räumliche Vorstellungsvermögen sowie das Erkennen symbolhafter Abbildungen und mentaler Modelle von Perspektive ausschlaggebend. Späterblindete haben den Vorteil auf ihre, bis zum Zeitpunkt der Erblindung, gesammelte visuelle Erfahrung zurückgreifen zu können.

**Das Tastvermögen** ist unterschiedlich ausgeprägt und von verschiedenen Faktoren abhängig.

**Der Inhalt und die Komplexität der Abbildung** stehen in direktem Zusammenhang mit der Zeit, die benötigt wird, um eine Grafik zu interpretieren. Die blinden Erkundenden müssen sich zunächst einen Überblick verschaffen, um die Inhalte der Grafik dann im Detail erfassen und in den Kontext der gesamten Grafik setzen zu können. Hierbei wird meist zwischen orientierungs- und erkenntnisbasiertem Tasten hin und her gewechselt.

**Die Art der Darstellung** von Abbildungen realer Objekte oder dargestellte Sachverhalte können weniger gut erkannt werden, als abstrakte schematische Darstellungen. In beiden Fällen haben Späterblindete auf Grund ihrer visuellen Erfahrung einen Vorteil.

<sup>7</sup> Achtung: Es ist auch nicht jedes Laserdrucker- oder Kopiergerät geeignet, da diese den auf das Papier aufgetragenen Toner durch eine beheizbare Walze fixieren. Ist die Temperatur dieser Fixierwalze zu hoch, schwillt das Papier bereits im Gerät und es besteht die Gefahr eines Papierstaus.

**Der Kontext** spielt für die Interpretation der Grafik eine übergeordnete Rolle. Besonders im Bildungssektor dienen Grafiken oft der Verdeutlichung schon im Text erklärter Prinzipien oder sind losgelöst vom Kontext nur bedingt zu Verstehen.

**Die Umsetzung und das dabei angewandte Verfahren** können die Erkennbarkeit und damit das Verständnis einer Grafik stark beeinflussen. Eine schlechte Umsetzung kann zur Folge haben, dass die Grafik nicht mehr erkannt oder schon gar nicht weiter erkundet wird.

Um die grafischen Möglichkeiten der Verfahren optimal zu nutzen, sind rasterlose Medien zu bevorzugen, also Schwellpapier oder sogar Thermoform-Folien<sup>8</sup>. Diese Medien erlauben es, kontinuierliche Zeichnungen darzustellen. Gerasterte Medien, wie Stiftplatten oder Braille-Präger-Ausdrucke bieten keine Möglichkeiten, Linien – insbesondere gebogene – ohne tastbares Raster darzustellen. (Kurze 1999)

Zusätzlich weißt die Arbeit von (Wijntjes et al. 2008, S. 613) eindeutig darauf hin, dass die Größe der Abbildung einen wichtigen Faktor darstellt, da größere Grafiken besser erkannt werden, weil sie dazu anregen beide Hände zum Erkunden einzusetzen. Eine beidhändige Exploration liefert den Erkundenden mehr Informationen als eine einhändige Exploration, was eine schnellere und genauere Erkennung zur Folge hat.

<sup>8</sup> Thermoformen ist ein Verfahren zur Umformung von flächigen, thermoplastischen Kunststoffen durch Wärme und den anschließenden Einfluss eines Vakuums, wie es auch zu Herstellung von Joghurtbechern oder eben taktilen Grafiken eingesetzt wird.

#### 2.4.2. Heuristiken beim Erkunden taktiler Grafiken

In den Schulungsunterlagen für blinde und sehbehinderte Menschen von (Bornschein und Engel 2018) werden einige Heuristiken zum effizienten Erkunden taktiler Grafiken beschrieben. So wird grundsätzlich der Einsatz beider Hände und das ständige Bewegen beider Finger empfohlen. Längenabstände sollten mittels Fingerbreiten, Fingerlängen, Handbreiten und Handspannen ermittelt werden. Für längere Abstände wird empfohlen, auf die Dauer zu achten, die benötigt wird, um einen Finger bei konstanter Geschwindigkeit von einem Element zum anderen zu bewegen. Unterscheidbare Elemente sollen nach und nach im Detail untersucht werden, um die Struktur des Gesamten zu begreifen.

Die Erkundungsstrategien werden von (Bornschein und Engel 2018) in folgende Schritte unterteilt:

##### **Bildbeschreibung lesen**

Gute Bildbeschreibungen können wichtige zusätzliche oder elementare Informationen und Hinweise zum Inhalt der Grafik und damit auch der einzusetzenden Erkundungsstrategie liefern.

##### **Einen ersten Überblick erhalten**

Zunächst sollte nach Hinweisen zur korrekten Ausrichtung der Grafik gesucht werden. So sind z.B. der Titel, dessen Position sowie andere Braille-Beschriftungen zum Ermitteln der Ausrichtung geeignet, sofern diese nicht auf andere Weise gekennzeichnet ist.

Um die Grafik zu Beginn initial abzutasten wird zu einer, vom Zentrum ausgehenden herzförmigen Bewegung geraten, die für eine gute erste Orientierung innerhalb der Grafik sorgt (siehe Abbildung 11).

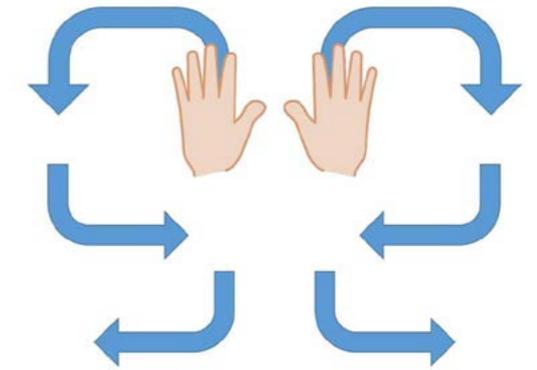


Abbildung 11: Initiales Abtasten mit beiden Händen (Bornschein und Engel 2018, S. 6)

Es empfiehlt sich, die dabei genutzte Anzahl von Fingern und die Auflagefläche der Hand zu variieren, um herauszufinden, welche Technik für den Erkundenden persönlich die meisten Informationen liefert. Textuelle Inhalte wie Titel, Labels oder Legenden, welche auch auf separaten Blättern angeboten werden können, bieten die Möglichkeit den Überblick zu verbessern. Ein Abfahren von Außenrändern der gesamten Darstellung ermöglicht es, die Ausdehnung der Grafik besser einzuschätzen. Das gezielte Suchen nach Referenzsystemen wie Koordinatenachsen hilft Diagrammen solche zu identifizieren und zu verstehen. Es ist generell hilfreich, zu ermitteln um welchen Typ von Grafik es sich handelt, um die Darstellung zu interpretieren.

**Details erkunden**

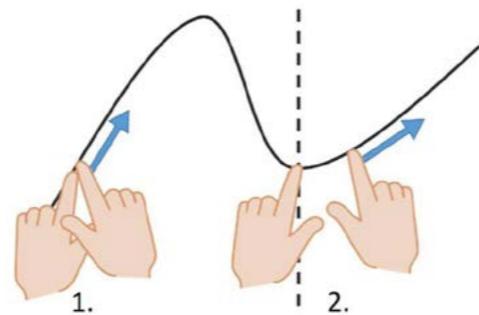
Ist für die Grafik kein Einstiegspunkt bekannt, soll mit der Erkundung links oben begonnen werden, bis ggf. ein geeigneter Punkt gefunden wird, von dem ausgehend die Erkundung neu begonnen werden soll.

**1.) Räumliche Beziehungen**

Um eine räumliche Vorstellung der Grafik zu erlangen, kann es hilfreich sein, markante Orientierungspunkte zu suchen, zu denen bei Bedarf zurückgekehrt werden kann. Der Einsatz beider Hände ermöglicht es, die Finger der einen Hand auf diesem Referenzpunkt ruhen zu lassen, während die Grafik mit den Fingern der anderen Hand im Detail erkundet wird. So lassen sich die räumlichen Beziehungen relativ zu dem gewählten Orientierungspunkt aufbauen. Weist die Grafik beispielsweise eine Legende auf so kann es ebenfalls hilfreich sein, die Finger einer Hand auf der Legende zu platzieren, um schneller zwischen Darstellung und Legende referenzieren zu können.

**2.) Linienverfolgung**

Zum Erkennen von geschlossenen Formen kann ebenfalls ein ruhender Referenzfinger eingesetzt werden, während die andere Hand der Kontur der Form folgt. Treffen die Finger wieder aufeinander, handelt es sich in der Regel um eine geschlossene Form. Treffen sie sich nicht wieder, kann der Referenzfinger zur nächsten markanten Stelle verschoben werden, solange die anderen Finger die Linie weiter erkunden. Weiterhin sollten Dicke und Struktur von Linien untersucht werden, um diese klar voneinander unterscheiden zu können.



**Abbildung 12:** Linienverfolgung und Referenzfinger beim Entscheidungspunkt (Bornschein und Engel 2018, S. 8)

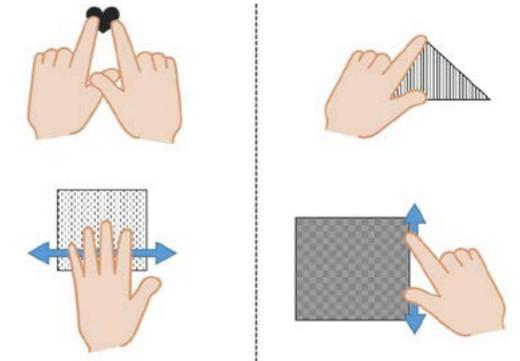
**Charakteristische Merkmale**

Die verfolgten Linien auf ihre Eigenschaften, wie z.B. Winkel, Richtungswechsel oder ihre Lage, hin zu untersuchen, ist für die Identifizierung der Form relevant. Die Form eines dargestellten Objekts definiert sich nicht über die Textur, sondern über seine Kontur. Für die Interpretation von mathematischen Graphen ist vor allem auf die Wendepunkte der Linien zu achten.

Der alleinige Einsatz der Zeigefinger bietet sich beim Identifizieren von Symbolen an.

Texturen und Flächenmuster können durch den Einsatz mehrerer Finger erkundet werden. Zielgerichtetes Suchen nach erwarteten Elementen kann hilfreich sein, wenn deren Typ bereits bekannt ist. So kann beispielsweise bei der Abbildung eines Tiers zunächst nach Kopf und Schwanz gesucht werden, bevor Körper und Beine genauer untersucht werden.

Die im Abschnitt „räumliche Beziehungen“ beschriebenen Techniken zu Referenzpunkten und Längenabmessungen können auch zur Ermittlung von Größenverhältnissen der einzelnen Details eingesetzt werden.



**Abbildung 13:** Erkundung charakteristischer Merkmale eines Objekts (Bornschein und Engel 2018, S. 9)

Untersuchungen zu Erkundungs-Heuristiken für taktile Grafiken von (Lederman et al. 1985) haben ergeben, dass der Einsatz von Referenz- bzw. Ankerpunkten zwar zur Abstandsmessung zwischen zwei Punkten, aber nicht für die Analyse von Kurven geeignet ist.

## Versuch 1 - Schwellpapier

### 3. Versuch 1 - Schwellpapier

Taktile Wahrnehmung und Erkennung taktiler Grafiken durch blinde und sehingeschränkte Versuchspersonen

Ziel von Versuch 1 war es, zu untersuchen, wie blinde und sehingeschränkte Personen taktile Grafiken auf Schwellpapier explorieren und welche Darstellungen in welchem Zeitraum erkannt bzw. nicht erkannt werden. Ebenso wurden Komplikationen und Schwierigkeitsgrade für unterschiedliche Darstellungen beobachtet.

#### 3.1. Teilnehmende

An dem Versuch nahmen insgesamt fünf Probanden teil. Es handelte sich um drei weibliche und zwei männliche Personen, von denen vier Schülerinnen und Schüler im Alter von 12 bis 17 Jahren waren und eine 46-jährige Schreibkraft. Vier der Teilnehmenden waren seit der Geburt vollblind. Eine Person hatte einen Sehrest, der es ihr ermöglicht bei enormer Vergrößerung Umrisse zu erkennen. Die Teilnehmenden gaben an viel bis sehr viel Erfahrung im Lesen der Brailleschrift und wenig bis viel Erfahrung im Umgang mit taktilen Grafiken zu haben. Bei drei Teilnehmenden war Deutsch Muttersprache die restlichen beherrschten die deutsche Sprache, hatten jedoch einen geringeren aktiven Wortschatz.

#### 3.2. Stimuli

Um die Exploration verschiedener taktiler Darstellungen untersuchen zu können, wurden Stimuli in Form von 22 farblosen, linienbasierten Reliefgrafiken auf DIN A4 Schwellpapier angefertigt. Die Darstellungen wurden in vier Sets unterteilt. Das erste Set bestand aus einfachen geometrischen Formen: Stern, Quadrat, Sechseck, Oval, Kreis und Dreieck. Das zweite Set bestand aus zweidimensionalen Darstellungen von Alltagsgegenständen: Pullover, Bleistift, Kamm, Briefumschlag, Schlüssel, Tennisschläger. Das dritte Set bestand aus dreidimensionalen Darstellungen von Alltagsgegenständen: Schüssel, Kerze, Schraubendreher, Tasse, Vorhängeschloss und Trillerpfeife. Die Darstellungen der Formen und Alltagsgegenstände wurden zentral innerhalb eines rechteckigen Begrenzungsrahmens von 159 mm Breite und 113 mm Länge platziert. Das vierte Set bestand aus einem Liniendiagramm, einem Säulendiagramm und einer schematischen Darstellung des menschlichen Blutkreislaufs. Die Darstellungen der geometrischen Figuren und der Alltagsgegenstände wurden mit dem jeweiligen Titel des Sets in Sechspunkt-Braille beschriftet, während die Diagramme sowohl mit Überschriften als auch Labels in Sechspunkt-Braille versehen wurden (siehe Abbildung 14). Bei der Beschriftung des Liniendiagramms wurde versehentlich anstatt der Jahreszahl 2013 die Jahreszahl 2012 doppelt eintragen. Alle Motive sind im Abschnitt Diagramme des Anhangs zu finden.



**Abbildung 14:** Exemplarische Motive der Stimuli aus den Kategorien: Geometrische Form, Alltagsgegenstand (ohne Perspektive) und Diagramm. Alle Motive sind im Anhang zu finden.

### 3.2.1. Auswahlkriterien und Aspekte der Stimuli

Die Auswahl der Motive für die Sets der Alltagsgegenstände erfolgte auf Basis der Arbeiten von (Lederman und Chataway 1990) und (Loomis et al. 1991, S. 169), mit Ausnahme des Tennisschlägers, der nur in der Studie von Loomis et al. verwendet wurde. Die dargestellten Objekte sollten niederkomplex und in Gänze mit den Händen erfahrbar sein (z.B. ist eine Tasse in Gänze mit den Händen erfahrbar, eine Autobahnbrücke nicht). Die Objekte sollten eindeutig benennbar sein, also eine hohe Bezeichnungsübereinstimmung aufweisen (Lederman und Chataway 1990) (Snodgrass und Vanderwart 1980). Um die Ergebnisse dieser Arbeit mit den Ergebnissen früherer Werke vergleichen zu können wurden auch die Ausmaße des Begrenzungsrahmens übernommen. Die Auswahl der geometrischen Formen fand unter der Annahme statt, dass die gewählten Motive ebenfalls ein hohe Bezeichnungsübereinstimmung aufweisen und verhältnismäßig einfach zu erkennen sind. Aufgrund der Einfachheit wurde der Versuch mit diesem Set begonnen, um die Versuchspersonen in die Versuchssituation einzuführen.

Trotz der hohen Bezeichnungsübereinstimmung wurde im Vorfeld des Versuchs festgelegt, welche Alternativbezeichnungen ebenfalls als korrekte Erkennung gewertet werden. So wurden für das Quadrat auch die Bezeichnungen Rechteck oder Viereck, für das Oval auch Ellipse und für das Sechseck auch Wabe oder Hexagon akzeptiert. Im Verlauf des Versuchs wurde das Oval aufgrund der Sprachbarriere eines Teilnehmenden auch als „komischer flacher Kreis“ bezeichnet. Da diese Beschreibung aber recht eindeutig ist, wurde sie ebenfalls als korrekte Antwort gewertet. Innerhalb der Sets der Alltagsgegenstände wurden als korrekte Bezeichnungen für den Bleistift auch Stift, für den Briefumschlag auch Brief, für die Schüssel auch Schale und für den Schraubendreher auch Schraubenzieher zugelassen.

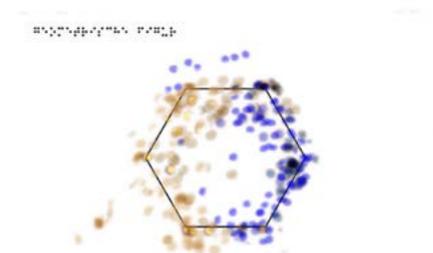
Linien- und Säulendiagramm wurden aus den Schulungsunterlagen für blinde und sehbehinderten Menschen von (Bornschein und Engel 2018) übernommen. Die schematische Darstellung des Blutkreislaufs wurde vom Autor selbst erstellt, wobei absichtlich auf die gängige Konvention, die Legende vor der Darstellung zu platzieren, verzichtet wurde, um die Reaktion der Teilnehmenden auf diese Platzierung beobachten zu können. Zudem wurde versucht, die Flussrichtung des Blutes durch aneinander gereihte Pfeilspitzen darzustellen.

### 3.3. Versuchsaufbau

Der Versuch fand an der Schule der am Versuch teilnehmenden Schülerinnen und Schülern bzw. der Arbeitsstätte der Schreibkraft statt. Die Versuchspersonen wurden gebeten, auf einem Stuhl an einem Tisch Platz zu nehmen, auf dem ein eigens für diesen Test angefertigter Tastrahmen aus Sperrholz platziert war. An dem Tastrahmen wurde eine Videokamera mit integriertem Mikrofon fixiert, welche sowohl die Bewegungen der Hände, als auch die verbalen Äußerungen der Teilnehmenden beim Erkunden der taktilen Grafiken aufgezeichnet hat. Um die Fingerbewegungen aus dem aufgezeichneten Video extrahieren und als Heatmap visualisieren zu können, wurden auf den Mittel- und Zeigefingern der Teilnehmenden farbige Klebepunkte angebracht.

Während des Versuches lösten sich bei zwei Teilnehmenden die Klebepunkte wiederholt von den Fingernägeln ab, weshalb die Videoaufnahmen dieser beiden Teilnehmenden nicht genutzt werden konnten, um Heatmap-Visualisierungen der Fingerpositionen zu erzeugen. Beim Analysieren der Videoaufzeichnungen wurde festgestellt, dass die Mittelfinger häufig nicht dauerhaft zum aktiven Tasten genutzt wurden, sondern sich wenige Millimeter über dem Schwellpapier befanden, wohingegen die Zeigefinger das Schwellpapier die meiste Zeit berührten. Aus diesem Grund wurden zur Erstellung der Heatmap-Visualisierungen lediglich die Positionen der Zeigefinger genutzt. Zur Erzeugung der Heatmaps aus den verwertbaren Videoaufnahmen wurde das Videomaterial mit einer Frequenz von 3Hz abgetastet, die Farben der Klebepunkte herausgefiltert. Die entstandenen Bilddateien wurden übereinandergelegt, multipliziert und auf eine Ebene reduziert. Schließlich wurden die einzelnen Heatmaps der Teilnehmenden zusammengeführt, um einen Gesamteindruck zu vermitteln. Danach wurde die ursprüngliche Grafik als Hintergrund eingefügt (siehe Abbildung 15).

Durch die so entstandenen Heatmaps kann nur ein grober Eindruck über das Tastverhalten gewonnen werden, da unklar ist, ob sich mit dem Finger auch die Aufmerksamkeit der Teilnehmenden auf dem markierten Bildbereich befunden hat. Die Intentionen der Tastenden bleiben dem Betrachter der Heatmaps zwar verborgen, dennoch stellen sie ein probates Mittel dar um die potenziell abgetasteten Bereiche zu markieren. Alle erzeugten Heatmaps aus beiden Versuchen werden im Abschnitt des Anhangs gegenübergestellt.



**Abbildung 15:** Zusammengeführte Heatmap Versuch 1 - Sechseck. orange = Zeigefinger der linken Hand, blau = Zeigefinger der Rechten Hand



**Abbildung 16:** Versuchsaufbau Versuch 1 – Zu sehen ist der hölzerne Fühlrahmen, an dessen Stativ eine Webcam samt Mikrofon fixiert wurde. Der Rahmen konnte während der Erkundung verschoben werden ohne, dass die Videoaufnahmen der Hände davon beeinflusst wurden. Die in der Teilnehmerposition abgebildete Person ist kein Proband, sondern der Kollege des Autors, welcher sich zur Darstellung des Versuchsaufbaus zur Verfügung gestellt hat.

### 3.4. Versuchsablauf

Zunächst wurden die Versuchspersonen über den Versuchsablauf in Kenntnis gesetzt und bei Interesse auch über das Ziel des Versuchs aufgeklärt. Danach wurden die personenbezogenen Daten aufgenommen. Die Versuchspersonen wurden angewiesen, die vom Versuchsleiter nacheinander in den Fühlrahmen eingebrachten taktilen Grafiken zu erkunden, die Abbildung zu erkennen und ihre Gedanken dabei kontinuierlich laut auszusprechen. Die Titel der jeweiligen Sets sowie das Vorhandensein weiterer Beschriftungen wurde den Versuchspersonen verbal mitgeteilt. Ihnen wurde das Ziel gesetzt, sich innerhalb von maximal zwei Minuten auf eine finale Antwort festzulegen. Zu den beiden Diagrammen und der schematischen Darstellung des menschlichen Blutkreislaufs wurde den Teilnehmenden folgende Fragen bzw. Aufgaben gestellt, nachdem sie mit der Erkundung begonnen hatten.

#### Säulendiagramm

Wer hat die meisten Arbeitsstunden?  
 Wer hat die wenigsten Arbeitsstunden?  
 Wie viele Arbeitsstunden hat Tim?

#### Liniendiagramm

Ab wann gab es in Deutschland mehr Spielfilmproduktionen als Kurzfilmproduktionen?

#### Schematische Darstellung des Blutkreislaufs

Beschreibe den Weg des sauerstoffarmen und des sauerstoffreichen Blutes.  
 Für die Erkundung der Diagramme und die Beantwortung der zugehörigen Fragen wurde kein Zeitlimit gesetzt. Es wurde die jeweilige Antwort, deren Korrektheit und die Zeit bis zur finalen Antwort festgehalten. Den Versuchspersonen war es zur Frustrationsvermeidung freigestellt, die Aufgaben auch schon vor Ablauf der zwei Minuten abzubereiten, wenn es ihnen nicht möglich war die korrekte Antwort zu geben. Die Teilnehmenden erhielten nach dem Äußern korrekter Antworten die Bestätigung des Versuchsleiters und wurden bei Bedarf nach dem Nennen falscher Antworten ermuntert, die Grafik weiter zu erkunden. Dabei wurde die Erkundungsdauer bzw. die Reaktionszeit bis zum Nennen der finalen Antwort vom Versuchsleiter mit Hilfe einer Stoppuhr ermittelt und festgehalten. Nach jeder Grafik wurden die Teilnehmenden gebeten, den Schwierigkeitsgrad des Erkennens auf einer Skala von 1 bis 6 (1 = sehr einfach, 6 = sehr schwer) anzugeben – auch diese Angaben wurden vom Versuchsleiter festgehalten. Jede Versuchsperson hat die jeweiligen Sets mit einem anderen Motiv begonnen.

### 3.5. Beobachtungen und Ergebnisse

Tabelle 1: Protokollierte Daten und Messwerte – Versuch 1

Versuch 1 mit Schwellpapier	V1P1	V1P2	V1P3	V1P4	V1P5
Alter	17	16	12	14	46
Geschlecht	m	m	w	w	w
Bildungsgrad	Sekundarstufe I 8. Klasse, G-Niveau	Sekundarstufe I 8. Klasse, G-Niveau	Sekundarstufe I 7. Klasse, G-Niveau	Sekundarstufe I 8 Klasse, E-Niveau	Hochschulabschluss
Zeitpunkt der Erblindung	Geburt	Geburt	Geburt	(Sehrest)	Geburt
Erfahrung mit Braille	2 (viel)	1 (sehr viel)	1 (sehr viel)	1 (sehr viel)	1 (sehr viel)
Erfahrung mit taktilen Grafiken	2 (viel)	3 (etwas)	3 (etwas)	2 (viel)	4 (wenig)

		Reaktionszeit in Sekunden				
geometrische Formen	Stern (5)	21	4	3	3	7
	Quadrat (5)	10	4	3	3	3
	Sechseck (4)	8	17	38	4	5
	Oval (4)	8	10	9	6	6
	Kreis (5)	8	5	8	7	4
	Dreieck (5)	2	4	3	5	3
Alltagsgegenstände (ohne Perspektive)	Pullover (1)	79	53	3	6	92
	Bleistift (3)	79	4	3	4	28
	Kamm (2)	60	53	120	3	55
	Briefumschlag (2)	72	6	93	4	38
	Schlüssel (1)	104	84	69	8	95
	Tennisschläger (0)	120	46	3	25	85
Alltagsgegenstände (mit Perspektive)	Schlüssel (3)	60	9	7	4	79
	Kerze (0)	107	71	56	31	120
	Schraubendreher (1)	83	72	120	48	78
	Tasse (3)	51	26	48	11	39
	Vorhängeschloss (0)	71	48	120	53	48
	Trillerpfeife (0)	78	46	21	59	34
<b>Säulendiagramm</b>						
Wer hat die meisten Arbeitsstunden? (5)		159	17	120	30	200
Wer hat die wenigsten Arbeitsstunden? (5)		164	42	130	38	207
Wie viele Arbeitsstunden hat Tim? (5)		189	47	170	48	219
<b>Liniendiagramm</b>						
Ab wann gab es in Deutschland mehr Spielfilmproduktionen als Kurzfilmproduktionen? (3)		249	98	290	134	223

 = keine korrekte Antwort

Wegen der verhältnismäßig geringen Anzahl an Versuchspersonen kann von den Ergebnissen keine statistische Relevanz erwartet werden. Die ermittelten Werte dienen vorwiegend dazu, Tendenzen zu erkennen (Siehe Diagramm 1). Eine umfassende Gegenüberstellung der ermittelten Daten aus Versuch 1 und 2 ist im Anhang zu finden.

### 3.5.2. Datenanalyse

Der mittlere Prozentsatz korrekt erkannter geometrischer Formen liegt bei 93,3% (SD = 10,3) bei einer mittleren Reaktionszeit von 7,4 Sekunden (SD = 7,1). Für die korrekte Erkennung der Alltagsgegenstände in einer perspektivlosen Darstellung wurde ein Wert von 30% (SD = 21) bei einer mittleren Reaktionszeit von 49,8 Sekunden (SD = 39,6) ermittelt, während die perspektivisch dargestellten Alltagsgegenstände im Mittel zu 23,3% (SD = 29,4) korrekt erkannt wurden. Die mittlere Reaktionszeit betrug dabei 58,8 Sekunden (SD = 32,7).

Unter den geometrischen Formen wurde das Dreieck mit einer mittleren Reaktionszeit von 3,4 Sekunden (SD = 1,1) am schnellsten und zu 100% korrekt erkannt. Die längste Zeit benötigten die Teilnehmenden, um das Sechseck zu erkennen, im Durchschnitt 14,4 Sekunden (SD = 14,2) bei 80% korrekten Antworten.

Innerhalb des Sets der nicht perspektivisch dargestellten Alltagsgegenstände wurde der Bleistift mit 23,6 Sekunden (SD = 32,7) und mit 60% korrekter Antworten am schnellsten und häufigsten erkannt. Der Schlüssel wurde mit durchschnittlich 72,0 Sekunden (SD = 38,1) am längsten erkundet und nur zu 20% korrekt erkannt. Bei einer geringeren Reaktionszeit von 55,8 (SD = 46,9) wurde der Tennisschläger vom keinem der Teilnehmenden als solcher erkannt.

Innerhalb des Sets der perspektivisch dargestellten Alltagsgegenstände konnte für die Tasse die schnellste mittlere Reaktionszeit von 35,0 Sekunden (SD = 35,1) und ein Prozentsatz von 60% korrekter Antworten ermittelt werden. Die längste Reaktionszeit von 80,2 Sekunden (SD = 26) wurde beim Schraubendreher festgestellt. Der Prozentsatz korrekter Antworten lag hier bei 20%. Vorhängeschloss und Trillerpfeife wurden von niemandem erkannt.

Alle drei Fragen zum Säulendiagramm konnten von allen Teilnehmenden in einer mittleren Reaktionszeit von 133,6 Sekunden (SD = 81,4) korrekt beantwortet werden.

Die Frage zum Liniendiagramm konnte innerhalb einer mittleren Reaktionszeit von 198,8 Sekunden (SD = 80,3) von 60% der Teilnehmenden korrekt beantwortet werden. Dabei wurde die Antwort als korrekt gewertet, wenn sie zwischen einschließlich 2011 und 2013 lag. Dies ist dem Fehler bei der Erstellung des Stimulus geschuldet. Bei der Auswertung wurde jedoch darauf geachtet, dass die Teilnehmenden sich mit dem Finger im angestrebten Zielbereich befanden, also das Diagramm grundsätzlich korrekt interpretieren konnten.

Aufgrund der abweichenden Fragestellung bei der schematischen Darstellung des Blutkreislaufs wurden für deren Erkundung keine Daten erhoben, sondern lediglich Beobachtungen festgehalten.

Die Einschätzungen der Schwierigkeitsgrade wurden wie erwartet in direkter Abhängigkeit von korrekter Erkennung und Erkendauer abgegeben.

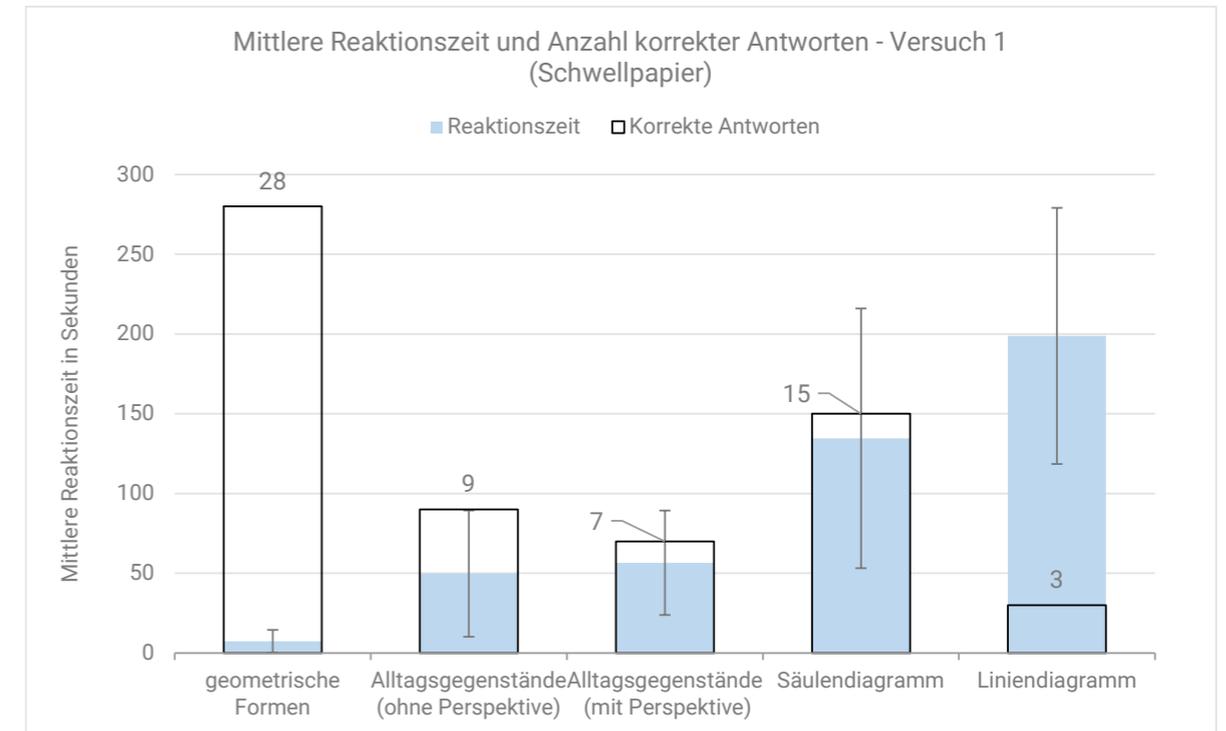


Diagramm 1: Mittlere Reaktionszeit und Anzahl korrekter Antworten - Versuch 1

### 3.5.3. Beobachtungen

Bei 4 von 5 Teilnehmenden folgte die Darstellung des Kreises auf die Darstellung des Ovals. Durch die Beobachtungen während des Versuchs liegt die Vermutung nahe, dass das Oval bei umgekehrter Reihenfolge häufiger als solches erkannt worden wäre.

Grundlegend konnte die Fühlstrategie der Kontur- und Linienverfolgung vermehrt beobachtet werden. Abstände wurden sowohl durch das Spreizen von Daumen und Zeigefinger als auch durch den Einsatz eines ruhenden Referenzfingers, von dem aus der Primärfinger auf einer Geraden zum anvisierten Objekt geführt wurde.

Bei der Erkundung der geometrischen Formen war die Tendenz zu beobachten, dass die Teilnehmenden zunächst mit den Handflächen oder zeitgleich mit allen Fingerbeeren über die Grafik strichen, bevor sie begannen die Formen spiegelsymmetrisch mit den Zeigefingern abzufahren. Dabei wurde die linke Seite der Darstellung vom Zeigefinger der linken Hand und die rechte Seite der Darstellung vom Zeigefinger der rechten Hand nachgefahren (siehe Abbildung 13). Es war zu erkennen, dass die Anzahl der Ecken bzw. die Anzahl der zur Erkennung relevanter Objektmerkmale mit der Reaktionszeit korreliert.

Die Teilnehmerin mit Sehrest konnte bis auf den Tennisschläger alle Alltagsgegenstände, welche nicht perspektivisch dargestellt wurden, erkennen. Die Struktur der Schlagfläche konnte nicht als solche erkannt werden.

Ein Teilnehmer stellte fest, dass moderne Briefumschläge nicht der Darstellung entsprechen, sondern statt der markenten spitz zulaufenden Klebelasche eine gerade Klebelasche aufweisen. Des Weiteren stellte eine Teilnehmerin fest, dass die Drehung der Motive sie irritiert und die Aufgabe erschwert hat.

Bei Erkunden der Diagramme war grundsätzlich zu beobachten, dass mit dem Titel begonnen wurde, der direkt in der linken oberen Ecke gesucht wurde. Ein ausgiebiges flächiges Orientierungstasten, war bei keinem der Teilnehmenden zu beobachten.

Die Teilnehmenden gaben an, durch den Unterricht mit Säulendiagrammen vertraut zu sein. Überwiegend konnte beobachtet werden, dass die Säulen vor den Achsen und deren Braille-Beschriftungen erkundet wurden. Die versetzten Beschriftungen der Säulen haben bei allen Teilnehmern für Irritation gesorgt, da sie mit den Fingern zunächst nur auf Höhe einer Zeile entlanggefahren sind und dadurch nicht alle Säulen-Beschriftungen wahrnehmen konnten. Die Breite der ausgefüllten Säule sorgte ebenfalls für Irritationen.

Die Frage zum Liniendiagramm konnte nur beantwortet werden, nachdem der Versuchsleiter darauf aufmerksam gemacht hatte, dass die beschrifteten Linien im oberen Drittel des Diagramms als Legende zu verstehen sind. Die nicht unbeschriftete und nicht umrahmte Legende wurde von drei der Teilnehmenden nicht auf Anhieb als solche erkannt.

Die Aufgabe zur Darstellung des menschlichen Blutkreislaufs konnte von keinem der Teilnehmenden gänzlich erfüllt werden. Zwei der Teilnehmenden konnten die gefüllten und ungefüllten Pfeilspitzen unterscheiden, jedoch konnten die Überschneidungen nicht als solche identifiziert werden. Dennoch war es allen Teilnehmenden möglich, die Metapher der gefüllten und ungefüllten Seiten der symbolhaft dargestellten Organe zu verstehen. Die umrahmte und beschriftete Legende wurde trotz ihrer unkonventionellen Platzierung direkt als solche erkannt. Die Labels wurden mehrheitlich entdeckt und konnten korrekt zugeordnet werden.

# Entwicklung des Simulators

## 4. Entwicklung des Simulator

### 4.1. Bisherige Simulatoren im Kontext taktiler Grafiken

Für eine Studie von (Loomis et al. 1991, 167-177) wurde ein experimenteller taktil-zu-visuell Simulator (nach den eingeführten Begrifflichkeiten der vorliegenden Arbeit; haptisch-zu-visuell Simulator) entwickelt, um die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der visuellen

und haptischen Wahrnehmung zu untersuchen. Dabei kam ein Computer, ein schwarz-weiß-Monitor und ein Grafik Tablet zum Einsatz. Die Darstellungsfläche erstreckte sich auf 178mm in Breite und 164 mm in der Höhe. Um die Grafiken hinter einem fest installierten Sichtfenster auf dem Monitor zu verschieben, sollten die Teilnehmenden ein Grafiktablett mit dem zugehörigen Stift nutzen. Die Größe der Sichtfenster sollte in einem der Versuche der Auflagefläche des Zeigefin-

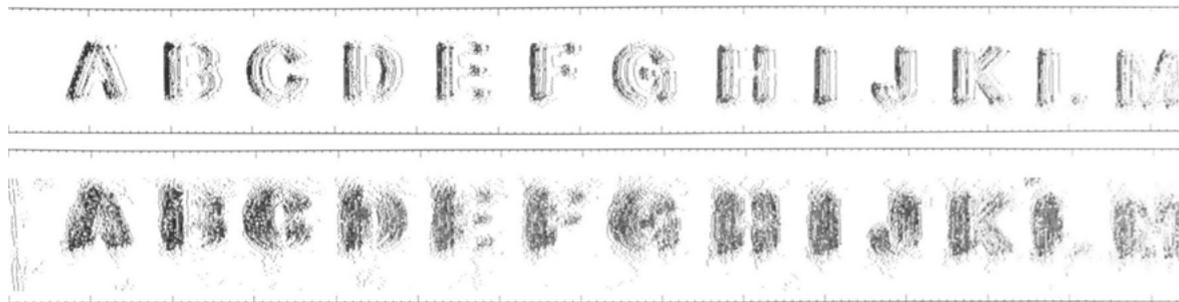


Abbildung 17: SEP rekonstruiert von einer SA (oben) und einer RA (unten) Nervenfaserverbindung. Buchstabenhöhe: 6,5mm | Scangeschwindigkeit: 50mm/sek | Kontaktkraft: 60g. Aus (Phillips et al. 1988, S. 1319)



Abbildung 18: Buchstabenhöhe 6,5mm Auflösung 300 Pixel/Zoll | Radius des Gaußscher Weichzeichners von oben nach unten: 20px | 15px | 10px | 0px

gers und in einem weiteren Versuch der Auflagefläche von Zeige- und Mittelfinger entsprechen. Die Fingerbeerenauflagefläche des Zeigefingers wurde als Rechteck mit einer Breite von 11 mm und einer Höhe von 18 mm realisiert. Die Darstellung des zusätzlichen Mittelfingers wurde durch ein zweites, leicht versetztes Rechteck mit selben Ausmaßen umgesetzt. Um die geringere räumliche Auflösung des Tastsinns zu erzeugen wurde eine Art Milchglasscheibe vor dem Monitor montiert.

Mit diesem Simulator sollten die sehenden Teilnehmenden Linienzeichnungen von Alltagsgegenständen erkunden und korrekt benennen. Mit verbundenen Augen sollten die gleichen Motive als taktile Grafiken erkundet werden. Dabei sollte von der einen Hälfte der Teilnehmenden nur der Zeigefinger und von der anderen Hälfte Zeige- und Mittelfinger eingesetzt werden. Letzteren war es dabei untersagt die Finger abzuspreizen.

Danach wurden Reaktionszeit und Quote der korrekten Antworten zwischen den verschiedenen Versuchsmodalitäten verglichen.

Während im Vergleich der Ergebnisse zwischen haptischer Ein- und Zweifingererkundung kein signifikanter Unterschied festgestellt werden konnte, haben sich die Ergebnisse bei der visuellen Erkundung, durch die der Erweiterung des Sichtfeldes signifikant verbessert. Als Erklärung für das Ausbleiben einer Verbesserung der Ergebnisse bei der Erkundung mit Zeige- und Mittelfinger wird ein möglicher Maskierungseffekt genannt.

Demnach kommt es zu einer fingerübergreifenden Reizüberlagerung, welche die eigentlich zu erwartende Steigerung der verarbeitbaren Reize hemmt, sodass von einer größeren Auflagefläche nicht profitiert werden kann.

In einer nachfolgenden Arbeit war es den Versuchsteilnehmenden erlaubt taktile Grafiken mit allen fünf Fingern einer Hand zu erkunden, wobei im Vergleich mit der Ein-Finger-Erkundung deutliche bessere Werte erreicht wurden (Klatzky et al. 1993, S. 178). Diese Beobachtung relativiert die These des Einflusses einer fingerübergreifenden Maskierung.

Des Weiteren werden die Überlegungen angestellt, dass bei der Erkundung unter Einsatz der zusätzlichen vier Finger nicht unbedingt durch die, in Summe, vergrößerte Auflagefläche profitiert wird, sondern dadurch, dass mit den zusätzlichen Fingern die Grafik während des Erkundens gewissermaßen vorgefühl werden kann. Dem zufolge kann der primäre Erkundungsfinger effizienter zu den bereits durch die anderen Finger detektierten Elemente der Grafik geführt werden. Einen weiteren potenziellen Mehrwert für die Erkundung taktiler Grafiken stellen die räumlichen Informationen dar, welche über die Haltungssinne der zusätzlich eingesetzten Finger wahrgenommen werden können.

*Die Studie von (Loomis et al. 1991, 167-177) diente dem vorliegenden Werk als Vorbild und Teilergebnisse werden im Kapitel Diskussion miteinander verglichen.*

In der Arbeit von (Loomis et al. 1991, 167-177) wurde darauf hingewiesen, dass ein Verschieben des Sichtfensters auf der Grafik möglicherweise eine bessere visuelle Simulation darstellt, als ein Verschieben der Grafik hinter einem fest montierten Sichtfenster. Dieser Aspekt wurde für die Konzipierung, des in der vorliegenden Arbeit entwickelten Simulators aufgegriffen. Dabei soll nicht unerwähnt bleiben, dass (Loomis 1986, S. 36) bereits eine Version des Simulators entwickelt hat, bei dem nicht die Grafik hinter einem Sichtfenster, sondern das Sichtfenster vor der Grafik verschoben werden konnte. Diese Variante wurde in einem Nebenversuch von (Loomis et al. 1991, 167-177) untersucht, jedoch vom Hauptversuch auf Grund der Überlegung ausgeschlossen, dass die Teilnehmenden dabei sowohl

## 4.2. Anforderungen

visuell durch die Position des Sichtfensters, als auch kinästhetisch über die Position der Stift-Hand, Informationen über das Layout der Grafik erlangen würden. Bei der haptischen Exploration dagegen könne nur die Position der Hand Informationen über das Layout der Grafik liefern.

Aus diesem Grund wurden in dem Nebenversuch der Simulator mit dem fixierten Sichtfenster und der Simulator mit dem beweglichen Sichtfenster gegeneinander getestet.

Bei der fixierten Variante mit kleinem Sichtfenster lag die mittlere Korrektheit der Antworten bei 38% und die mittlere Reaktionszeit bei 106 Sekunden, wohingegen bei der beweglichen Variante mit kleinem Sichtfenster die mittlere Korrektheit der Antworten bei 71% und die mittlere Reaktionszeit bei 74 Sekunden lag. Mit der beweglichen Variante wurden also deutlich bessere Ergebnisse erzielt.

Die „*Spartel Event Plots*“ (siehe Abbildung 10) von (Phillips et al. 1990) können ebenfalls als Form eines taktil-zu-visuell Simulators verstanden werden, da sie taktile Reize visualisieren. Sie dienten den Visualisierungen des Simulators, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurde als Vorbild.

Der Simulator soll die Einschränkungen des Tastsinns in Bezug auf das Erkunden taktiler Grafiken so realistisch wie möglich nachbilden.

Der Simulator soll nicht nur in der Forschung oder von Experten, sondern auch von einer heterogenen Masse Privatpersonen eingesetzt werden können. Daher schließt sich kostenintensive Spezialhardware als mögliches Medium aus. Die Simulation soll auf gängigen Endgeräten nutzbar sein und durch ein Zusammenspiel zwischen Eingabegerät (Trackpad/ Touchscreen/Maus) und Ausgabegerät (Display), das haptische Erkunden von taktilen Grafiken visuell nachahmen.

Da der Simulator in das Angebot der zu Beginn beschriebenen Onlineplattform *tacpic.de* eingebunden werden soll, bietet sich eine Umsetzung auf Grundlage gängiger Webtechnologien wie Java Skript an.

## 4.3. Umzusetzende Einschränkungen des Tastsinns

Die Möglichkeiten der visuellen Wahrnehmung erlauben es, ein Bild quasi simultan wahrzunehmen, während die limitierte „Wahrnehmungsfläche“ der taktilen Wahrnehmung ein sequenzielles Abtasten erzwingt und das Bild mental zu einem Gesamtkonzept zusammengesetzt werden muss (Grunwald und Beyer 2001, S. 95), (Jaworek 2014, S. 8). Daraus resultiert eine größere Belastung des Arbeitsgedächtnisses (Loomis et al. 1991).

Die bedeutendste Einschränkung des Tastsinns im Kontext taktiler Grafiken ist die limitierte Wahrnehmungsfläche. Diese entspricht den Auflageflächen der Fingerbeeren, die in den Erkundungsprozess involviert sind.

Eine weitere Einschränkung ist die – im Vergleich zur visuellen Wahrnehmung – deutlich geringere örtliche Auflösung.

In der im Kapitel 4.1 genauer beschriebenen Arbeit von (Loomis et al. 1991) wurde untersucht welchen Effekt unterschiedlich große Wahrnehmungsflächen auf die haptischen und visuellen Wahrnehmungsleistungen beim Erkennen von Grafiken haben. Um haptisches und visuelles Erkunden vergleichen zu können, wurde bei der visuellen Exploration das Sichtfenster reduziert. Das reduzierte Erkundungsfenster entsprach in seinen Ausmaßen der Auflagefläche der Fingerspitzen, welche bei der haptischen Erkundung eingesetzt wurden.

Die geringere örtliche Auflösung wurde durch eine künstliche Unschärfe imitiert, indem eine Art Milchglasscheibe vor dem Monitor angebracht wurde, welcher als Anzeige der visuellen Grafik diente.

Während eine Vergrößerung des Sichtfensters die Leistungen bei der visuellen Erkundung deutlich verbessern konnte, wurden bei der haptischen Erkundung mit einer größeren Auflagefläche nur geringfügig bessere Leistungen erreicht.

Die durch Buchstaben hervorgerufenen SPE (siehe Abbildung 17) unterscheiden sich deutlich von den weichgezeichneten Buchstaben (siehe Abbildung 18). Diese Beobachtung wirft die Frage auf, ob eine solche künstliche Unschärfe, wie sie in den Studien von (Loomis et al. 1991) eingesetzt wurde, ein adäquates Mittel ist, um die geringere örtliche Auflösung des Tastsinns zu imitieren. Zudem lässt eine solche Darstellung auch den Einfluss der Bewegung, also das **aktive Tasten**, außer Acht.

*Der Simulator soll die geringere Auflösung des Tastsinns durch ein bewegungsabhängiges Imitieren der Mechanorezeptor Eigenschaften simulieren.*

Die Arbeiten von (Phillips et al. 1990, S. 590) und (Connor et al. 1990, S. 3833) weisen darauf hin, dass SA II und RA II Mechanorezeptoren, vermutlich aufgrund ihrer schlechten räumlichen Auflösung und der großen rezeptiven Felder, bei der Erkennung von Braille-Zeichen eine untergeordnete Rolle spielen. Diese Beobachtung kann auf taktile Grafiken übertragen werden.

Die „*Spatial Event Plots*“ aus den Arbeiten (Phillips et al. 1992, S. 829), (Phillips et al. 1990), (Phillips et al. 1988) vermitteln den Eindruck, dass die Bewegungsrichtung in der der Stimulus über die Haut bewegt wird Einfluss auf die Reizwahrnehmung hat. Die zuerst überquerte, senkrechte Kante eines Objekts scheint die Rezeptoren der SAI Faser stärker erregen als die kurz darauf folgende Kante (Siehe Abbildung 17).

#### 4.4. Umsetzung des Haptisch-zu-Visuell-Simulators

##### 4.4.1. Ansatz

Nachdem (Loomis et al. 1991) bereits einen Simulator<sup>9</sup> durch die Reduzierung des Sichtfeldes in Kombination mit einer unscharfen Darstellung der Stimuli umgesetzt und untersucht haben, wurde bei der Umsetzung innerhalb dieser Arbeit der Schwerpunkt auf die Visualisierung der Mechanorezeptoreigenschaften gelegt, anstatt die geringere räumliche Auflösung des Tastsinns durch Unschärfe dazustellen

##### 4.4.2. Technische Grundlagen

Der prototypische Simulator wurde unter Zuhilfenahme der „JavaScript library“ „p5.js“ entwickelt.

Um die Maßhaltigkeit der Größenverhältnisse bei der Darstellung auf dem in Versuch 2 verwendeten Samsung Monitor U28E590D LED zu gewährleisten, wurde ein Millimeter-Pixel-Verhältnis von einem Millimeter zu vier Pixeln ermittelt.

Die digitale Form, der in Versuch 1 verwendeten Stimuli sind JPG-Bilddateien, deren Dimensionen durch den Simulator so angepasst werden, dass sie auf dem in Versuch 2 verwendeten Monitor entsprechend der Dimensionen eines DIN-A4-Blatts angezeigt werden können. Die auf den taktilen Stimuli erhabenen Linien werden in der digitalen Version als schwarze Linien dargestellt. Die kategorischen Überschriften der sind nicht in Braille, sondern in Schwarzschrift umgesetzt. Die JPG-Bilddatei wird jedoch nicht angezeigt, sie dient lediglich als Datenquelle zur Reizvisualisierung, stattdessen ist die Displayfläche zunächst gänzlich schwarz.

##### 4.4.3. Definition der Variablen und Konstanten

Zunächst wurde die Größe und Form des Bereichs definiert, in welchem die Reizvisualisierung stattfinden sollte. Da dieser Bereich die Auflagefläche des Fingers repräsentieren soll, wurde eine elliptische Form festgelegt, die der Auflagefläche eines Fingers bei mäßigen Auflagedruck entspricht. Die Anzahl von Merkelzellen und Meissner-Körperchen ist unabhängig von der Größe des Fingers, deshalb wirkt sich die Größe des Fingers und damit der Auflagefläche unmittelbar auf das örtliche Auflösungsvermögen aus (Peters et al. 2009a). Darum soll die Variable der Fingergröße Eingang in die Entwicklung des zukünftigen Simulators finden. Um jedoch innerhalb dieser Arbeit vergleichbare Ergebnisse zu erzeugen, wurde die Höhe auf 18 mm und die Breite auf 13 mm festgelegt. Die Werte basieren auf der Arbeit von (Loomis et al. 1991, S. 171–172) wobei dort die Breite aus technischen Gründen auf 11 mm limitiert war.

Durch die Größe und undefinierten Grenzen der rezeptiven Felder von Ruffini- und Pacini-Körperchen bzw. der dazugehörigen Nervenfasern sind adäquate Visualisierungen dieser Mechanorezeptoren bisher nicht möglich, weshalb diese in der aktuellen Umsetzung des Simulators vernachlässigt werden.

Die **Abtastposition** des Visualisierungsbereichs wird über die Position des Cursors definiert, welcher durch die Nutzenden frei über die Anzeige bewegt werden kann.

Die **Berührung** des Stimulus entspricht dem Gedrückt halten der linken Maustaste. Wird die Maus bei gedrückter linker Maustaste bewegt, entspricht das dem Erkunden der taktilen Grafik mit dem Zeigefinger.

Die **Anzahl** der in diesem Bereich zu visualisierenden Mechanorezeptoren wurde der Literatur entnommen (siehe Tabelle 3). Durchschnittlich 70 Merkelzellen und 140 Meissner-Körperchen.

Die **Verteilung** der Rezeptoren orientiert sich an der Verteilung der Schweißdrüsen, die wiederum entlang der bei jedem Menschen individuell ausgeprägten Papillarleisten platziert sind (Peters et al. 2009a). Deshalb werden die Rezeptoren nach einem zufälligen Verteilungsmuster generiert.

Die **Form** der rezeptiven Felder kann als oval oder kreisförmig beschrieben werden (Vallbo und Johansson 1984, S. 6), für die Simulation wurde sie als kreisrund angenommen.

Da die **Größe** des **rezeptiven Feldes** von Merkelzellen und Meissner-Körperchen von der Intensität des ausgeübten Drucks auf den Stimulus abhängt (Vallbo und Johansson 1984, S. 5), dieser jedoch nicht durch die Eingabemöglichkeiten einer Computer-Maus repräsentiert werden kann, wurde die Größe der zu simulierenden rezeptiven Felder auf deren sensibelsten Bereich von 3 mm im Durchmesser reduziert. In Anbetracht der Beobachtungen aus Versuch 1 und den persönlichen Gesprächen mit den Teilnehmern und weiteren blinden Personen erscheint die Annahme eines geringen Fingerdrucks beim Erkunden taktiler Grafiken als plausibel, da es bei einem hohen Fingerdruck schneller zu Ermüdungserscheinungen der taktilen Wahrnehmung zu kommen scheint.

<sup>9</sup> Der Simulator ist im Abschnitt 4.1 näher beschrieben

### 4.4.4. Umsetzung der Wahrnehmungseigenschaften

Zur **Umsetzung der rezeptiven Felder** wird für jeden Pixel der hinterlegten JPG-Datei (digitaler Stimulus) im Umkreis von 3mm um die aktuelle Position der generierten Mechanorezeptoren der Helligkeitswert errechnet. Für Helligkeitswerte aller Pixel innerhalb eines rezeptiven Feldes wird der arithmetische Mittelwert bestimmt. Ein hoher Helligkeitswert bedeutet, dass der durch das generierte rezeptive Feld abgetastete Bereich der Bilddatei weiß ist und sich somit keine Linie in diesem Bereich befindet. Ein niedriger Helligkeitswert bedeutet, dass sich innerhalb des Bereichs eine Linie befindet, da diese in der JPG-Datei in Form von schwarzen Pixeln repräsentiert wird. Während beim Erkunden der taktilen Grafiken in Versuch 1 die Mechanorezeptoren der Teilnehmenden auf die mechanische Auslenkung der Haut im Bereich ihrer rezeptiven Felder reagiert haben, reagieren die durch den Simulator generierten „Mechanorezeptoren“ auf die Helligkeitswerte der Pixel innerhalb ihres rezeptiven Feldes.

Um die **Eigenschaft einer langsam adaptierenden Merkelzelle zu imitieren**, wird eine Reizvisualisierung an der aktuellen Position des künstlichen Mechanorezeptors in Form eines weißen Kreises mit dem Durchmesser von 0,5mm ausgelöst, sobald der für das jeweilige rezeptive Feld errechnete Mittelwert den festgelegten Schwellenwert unterschreitet. Das bedeutet, dass solange sich das rezeptive Feld über einer ausreichenden Menge von schwarzen Pixeln befindet, kontinuierlich Impulse visualisiert werden. In der Annahme, dass es durch die Eigenschaft des langsamen Adaptierens zu einer Reizverzögerung kommt und um die Visualisierung den „Spatial Event Plots“ von Phillips (Johnson und Phillips 1981; Phillips et al. 1990, 1992; Phillips et al. 1988) anzunähern, wird für das rezeptive Feld der Merkelzelle nur alle zwei Millisekunden der mittlere Helligkeitswert ermittelt. Damit verzögert sich auch die Anpassung der Visualisierung.

Um die **Eigenschaft eines schnell adaptierenden Meissner-Körperchens** zu imitieren, wird nur ein Impuls generiert, wenn sich der mittlere Helligkeitswert des rezeptiven Feldes für die aktuelle Position des Meissner-Körperchens von dem mittleren Helligkeitswert der vorherigen Position im Verhältnis zu einem festgelegten Schwellenwert unterscheidet. Das bedeutet, es wird nur dann ein Impuls visualisiert, wenn sich das generierte rezeptive Feld des Meissner-Körperchens über einen Bereich des digitalen Stimulus bewegt, welcher sowohl weiße als auch schwarze Pixel aufweist. Ein solcher Übergang von weiß zu schwarz innerhalb der digitalen Stimuli entspricht dem Übergang von ebenen zu erhabenen Flächen innerhalb der taktilen Grafiken aus Versuch 1. Wird die Maus und somit das rezeptive Feld des Meissner-Körperchens nicht bewegt, findet keine Reizvisualisierung statt.

# Versuch 2- Simulator

## 5. Versuch 2 - Simulator

Visuell simulierte Erkundung digitaler Vorlagen für taktile Grafiken durch nicht sehbeeinträchtigte Versuchspersonen

### 5.1. Teilnehmende

An dem Versuch nahmen insgesamt fünf weibliche Personen ohne visuelle Einschränkungen teil, von denen vier Schülerinnen im Alter von 11 bis 13 Jahren waren. Die fünfte Versuchsperson war eine 35-jährige wissenschaftliche Mitarbeiterin. Bei allen Teilnehmenden war Deutsch die Muttersprache.

### 5.2. Stimuli

Als Stimuli dieses Versuchs können die über den Simulator erkundeten JPG-Bilddateien verstanden werden. Es wurden grundsätzlich die gleichen Motive wie in Versuch 1 eingesetzt, jedoch wurde die Brailleschrift durch Schwarzschrift ersetzt, welche durch den Simulator gesondert hervorgehoben wird, um von den Teilnehmenden gelesen werden zu können. Dafür wurde in Vorversuchen untersucht, ob die so mögliche Lesegeschwindigkeit in etwa mit der Lesegeschwindigkeit der blinden Teilnehmenden aus Versuch 1 übereinstimmt.

### 5.3. Versuchsaufbau

Der Versuch fand an der Hochschule Magdeburg statt. Die Versuchspersonen wurden gebeten auf einem Stuhl an einem Tisch Platz zu nehmen, auf dem ein 28 Zoll LED Monitor und eine Lasermaus platziert wurden. Die Tastatur wurde vom Versuchsleiter genutzt, um zwischen den Stimuli zu wechseln. Während des Versuchs wurde ein Desktop-Video zur späteren Auswertung aufgezeichnet. Durch den Simulator wurden automatisiert Heatmaps erstellt, indem bei gedrückter linker Maustaste in einer Frequenz von 3 Hz an der aktuellen Cursorposition ein semitransparenter roter Kreis generiert und in einer nicht angezeigten Grafikdatei gesichert wurde.

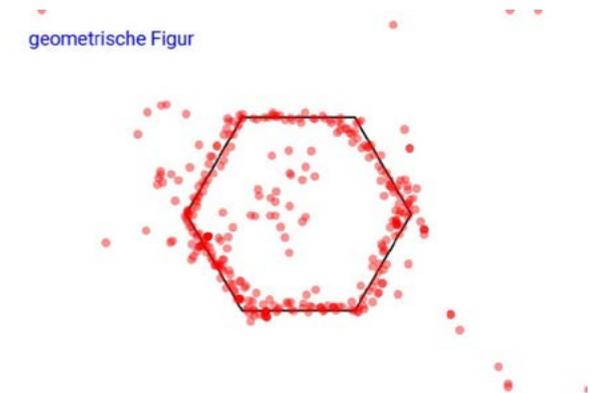


Abbildung 20: Zusammengetzte Heatmap Versuch 2



Abbildung 19: Versuchsaufbau Versuch 2 – Zu sehen ist der Monitor auf dem der Bereich der simulierten Reizvisualisierungen entsprechend der Mausbewegungen angezeigt wird. Die Tastatur diente dem Versuchsleiter dazu wischen den Stimuli zu wechseln. Die in der Teilnehmerposition abgebildete Person ist kein Proband, sondern der Kollege des Autors, welcher sich zur Darstellung des Versuchsaufbaus zur Verfügung gestellt hat.

### 5.4. Versuchsablauf

Zunächst wurden die Versuchspersonen über den Versuchsablauf in Kenntnis gesetzt und bei Interesse auch über das Ziel des Versuchs aufgeklärt. Danach wurden die personenbezogenen Daten vom Versuchsleiter aufgenommen. Den Versuchspersonen wurde erläutert wie der Simulator zu bedienen ist, also dass die Maus bei gedrückter linker Maustaste bewegt werden muss, um eine Visualisierung auf dem Computermonitor hervorzurufen. Aufgabe war es ebenfalls, die Grafiken zu erkunden, die Abbildungen zu erkennen und ihre Gedanken dabei kontinuierlich laut auszusprechen. Die Titel der jeweiligen Sets sowie das Vorhandensein weiterer Beschriftungen wurde den Versuchspersonen verbal mitgeteilt. Ihnen wurde das Ziel gesetzt sich innerhalb von maximal zwei Minuten auf eine finale Antwort festzulegen. Für die Diagramme wurde kein Zeitlimit gesetzt.

Festgehalten wurden die jeweilige Antwort, deren Korrektheit und die Zeit bis zur finalen Antwort. Den Versuchspersonen wurde zur Frustrationsvermeidung freigestellt, die Aufgabe auch schon vor Ablauf der zwei Minuten abbrechen, sofern nach eigener Einschätzung ein Erkennen nicht möglich war. Die Versuchspersonen erhielten nach dem Äußern korrekter Antworten die Bestätigung des Versuchsleiters und wurden bei Bedarf nach Nennen falscher Antworten ermuntert, die Grafik weiter zu erkunden. Die Erkundungsdauer wurde durch den Simulator aufgezeichnet und zusätzlich vom Versuchsleiter mit Hilfe einer Stoppuhr ermittelt. Nach jeder Grafik wurden die Teilnehmenden gebeten, den Schwierigkeitsgrad des Erkennens auf einer Skala von 1-6 (1 = sehr einfach, 6 = sehr schwer) anzugeben. Die Sets und Motive wurden in gleicher Reihenfolge wie in Versuch 1 angezeigt.

### 5.5. Beobachtungen und Ergebnisse

Tabelle 2: Protokollierte Daten und Messwerte – Versuch 2

Versuch 2 mit Simulator	V2P1	V2P2	V2P3	V2P4	V2P5
Alter	13	13	13	11	35
Geschlecht	w	w	w	w	w
Bildungsgrad	Gymnasium 7. Klasse	Gymnasium 7. Klasse	Sekundarstufe I 7. Klasse	Gymnasium 5. Klasse	Hochschulabschluss
Zeitpunkt der Erblindung					
Erfahrung mit Braille					
Erfahrung mit taktilen Grafiken					

		Reaktionszeit in Sekunden				
geometrische Formen	Stern (5)	24	40	17	28	7
	Quadrat (5)	19	59	21	35	0
	Sechseck (5)	21	19	37	32	14
	Oval (1)	12	32	15	19	14
	Kreis (5)	22	28	15	26	19
	Dreieck (5)	9	22	13	17	5
Alltagsgegenstände (ohne Perspektive)	Pullover (1)	66	103	92	83	91
	Bleistift (5)	24	63	34	12	15
	Kamm (4)	60	46	63	58	12
	Briefumschlag (2)	120	96	60	52	29
	Schlüssel (1)	120	120	77	90	120
	Tennisschläger (1)	120	94	75	84	58
Alltagsgegenstände (mit Perspektive)	Schüssel (2)	72	96	38	120	117
	Kerze (4)	47	75	36	120	15
	Schraubendreher (1)	120	120	70	76	86
	Tasse (4)	76	120	50	67	38
	Vorhängeschloss (0)	120	103	62	111	86
	Trillerpfeife (0)	120	88	79	81	120
<b>Säulendiagramm</b>						
Wer hat die meisten Arbeitsstunden? (4)		373	182	103	174	120
Wer hat die wenigsten Arbeitsstunden? (4)		379	183	100	175	124
Wie viele Arbeitsstunden hat Tim? (5)		399	204	126	198	160
<b>Liniendiagramm</b>						
Ab wann gab es in Deutschland mehr Spielfilmproduktionen als Kurzfilmproduktionen? (1)		377	289	164	159	280

= keine korrekte Antwort

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass auf Grund der geringen Teilnehmerzahl keine statistisch relevanten Ergebnisse erwartet werden können. Die ermittelten Daten stellen lediglich Tendenzen dar.

Wie in Versuch 1 folgte bei 4 von 5 Teilnehmenden die Darstellung des Kreises auf die Darstellung des Ovals. Durch die Beobachtungen während des Versuchs liegt die Vermutung nahe, dass das Oval bei umgekehrter Reihenfolge häufiger als solches erkannt worden wäre.

#### 5.5.1. Datenanalyse

Der mittlere Prozentsatz korrekt erkannter geometrischen Formen liegt bei 86,7% (SD = 32,7) bei einer mittleren Reaktionszeit von 21,4 Sekunden (SD = 11,8). Für die korrekte Erkennung der Alltagsgegenstände in einer perspektivfreien Darstellung wurde ein Wert von 46,7% (SD = 35) bei einer mittleren Reaktionszeit von 67,2 Sekunden (SD = 34,8) ermittelt, während die perspektivisch dargestellten Alltagsgegenstände im Mittel zu 36,7% (SD = 36,7) korrekt erkannt wurden. Die mittlere Reaktionszeit betrug dabei 84,3 Sekunden (SD = 31,0).

Unter den geometrischen Formen wurde das Dreieck mit einer mittleren Reaktionszeit von 13,2 Sekunden (SD = 6,6) am schnellsten und zu 100% korrekt erkannt. Die längste Zeit benötigten die Teilnehmenden um das Quadrat zu erkennen; im Mittel 26,8 Sekunden (SD = 21,9) bei 100% korrekten Antworten.

Innerhalb des Sets der nicht perspektivisch dargestellten Alltagsgegenstände wurde der Bleistift mit 29,6 Sekunden (SD = 20,5) und mit einer Rate an korrekten Antworten von 100% am schnellsten und häufigsten erkannt. Der Tennisschläger wurde mit durchschnittlich 86,2 Sekunden (SD = 23,1) am längsten erkundet und nur zu 20% korrekt erkannt.

Innerhalb des Sets der perspektivisch dargestellten Alltagsgegenstände konnte für die Kerze die schnellste mittlere Reaktionszeit von 58,6 Sekunden und ein Prozentsatz von 80% korrekter Antworten ermittelt werden. Die längste Reaktionszeit von 97,6 Sekunden (SD = 20,7) wurde bei der Trillerpfeife festgestellt, welche zusammen mit dem Vorhängeschloss von keinem der Teilnehmenden korrekt erkannt wurde.

Die Fragen zum Säulendiagramm konnten zu 93,3% in einer mittleren Reaktionszeit von 217,4 Sekunden (SD = 106,3) korrekt beantwortet werden.

Die Frage zum Liniendiagramm konnte innerhalb einer mittleren Reaktionszeit von 253,8 Sekunden (SD = 32,7) von 20% der Teilnehmenden korrekt beantwortet werden.

Die Einschätzungen der Schwierigkeitsgrade wurden wie erwartet in direkter Abhängigkeit von korrekter Erkennung und Erkendauer abgegeben.

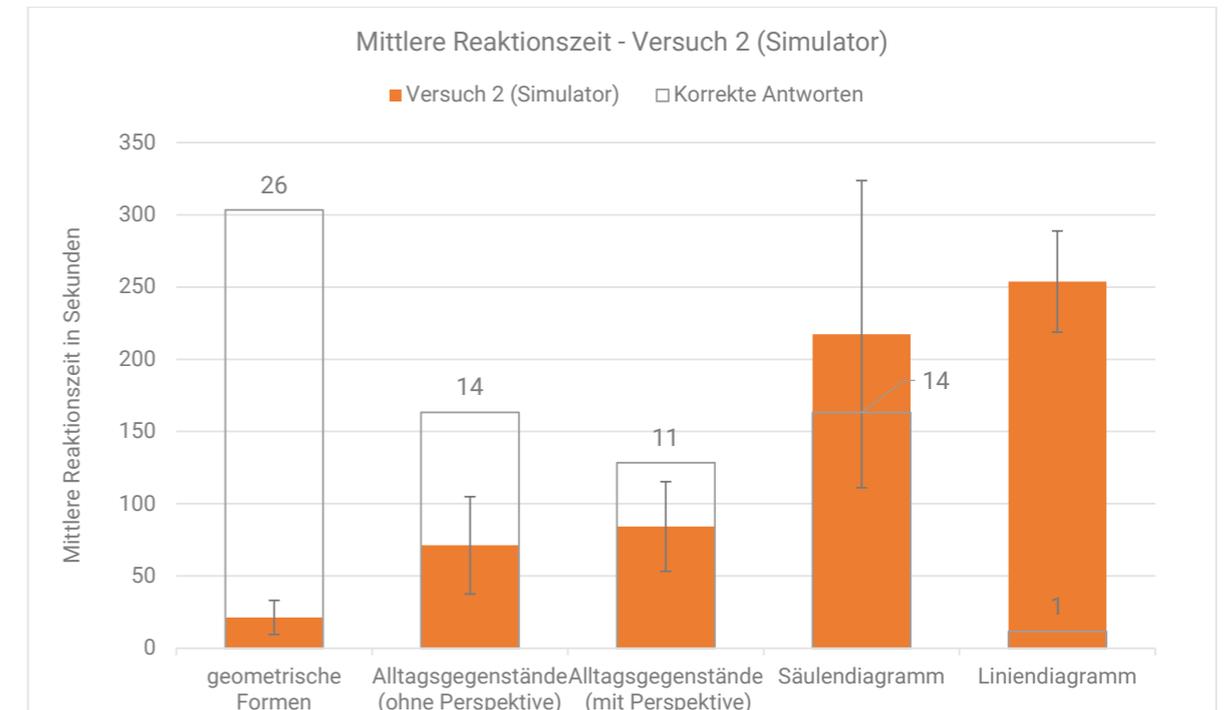


Diagramm 2: Mittlere Reaktionszeit und Anzahl korrekter Antworten - Versuch 2

### 5.5.2. Beobachtungen

Die Benutzung der Computer-Maus wirkte bei den Teilnehmenden eher ungewohnt. Es entstand der Eindruck, dass die kognitive Belastung durch die dafür aufzubringende Hand-Auge-Koordination höher war, als es bei Personen, die regelmäßiger eine Maus benutzen, der Fall gewesen wäre.

Die durch den Simulator hervorgehobene Schwarzschrift konnte von den Teilnehmenden in ähnlicher Geschwindigkeit gelesen werden, wie die Braille-Schrift in Versuch 1.

Das der Cursor eingeblendet wurde, sobald die Fläche der Stimuli verlassen wurde, konnte nicht intuitiv als äußere Grenze der taktilen Grafik interpretiert werden.

Die Linien und Konturen wurden konsequenter und langsamer verfolgt, als bei den Teilnehmenden aus Versuch 1. Die geometrischen Formen wurden meist komplett abgefahren, bevor eine Antwort geäußert wurde.

Die für das Set der geometrischen Formen beobachtete Tendenz aus Versuch 1, dass die Anzahl der Ecken bzw. die Anzahl der zum Erkennen relevanter Objektmerkmale mit der Reaktionszeit korreliert, konnte hier nicht beobachtet werden.

Innerhalb des Sets der nicht perspektivisch dargestellten Alltagsgegenstände, konnte beim Tennisschläger die Struktur der Schlagfläche nicht als solche erkannt werden. Diese Beobachtung überschneidet sich mit Versuch 1.

Dass der Bleistift von allen Teilnehmenden erkannt wurde, könnte womöglich daran liegen, dass er in der Breite noch innerhalb des begrenzten taktilen Wahrnehmungsfensters lag und dadurch mit einer linearen Bewegung komplett abgetastet werden konnte. Ähnliche Beobachtungen konnten bei der Darstellung der Kerze gemacht werden. Es liegt nahe, dass die Flamme der Kerze aufgrund der vorhandenen visuellen Erfahrung, verglichen mit den

Teilnehmenden aus Versuch 1, häufiger als solche identifiziert werden konnte.

Die Teilnehmenden gaben an, durch den Schulunterricht mit Säulendiagrammen vertraut zu sein. Überwiegend konnte beobachtet werden, dass die Säulen vor den Achsen und deren Beschriftungen erkundet wurden. Die versetzten Beschriftungen der Säulen haben bei allen Teilnehmern für Irritation gesorgt (ähnlich wie in Versuch 1), da sie mit der visualisierten Wahrnehmungsfläche zunächst nur auf Höhe einer Zeile entlanggefahren sind und dadurch nicht alle Säulen-Beschriftungen wahrnehmen konnten. Die breite, ausgefüllte Säule sorgte ebenfalls für Irritationen, es wurde teilweise mit einem Fortlaufen der Markierungslinie des Labels gerechnet.

Die vier teilnehmenden Schülerinnen äußerten, dass sie bisher keine Erfahrung mit der Interpretation von Liniendiagrammen hatten, daher konnten sie die Frage auch nicht beantworten, nachdem sie das Diagramm ohne die Einschränkungen des Simulators betrachtet hatten. Die nicht umrahmte und unbeschriftete Legende wurde von drei der Teilnehmenden nicht auf Anhieb als solche erkannt, sondern mit einem Beschriftungslabel verwechselt. Die verschiedenen Linien konnten jedoch gut unterschieden werden.

Die Aufgabe zur Darstellung des menschlichen Blutkreislaufs konnte von keiner Versuchsperson gänzlich erfüllt werden. Die Teilnehmenden konnten die gefüllten und ungefüllten Pfeilspitzen nur bedingt unterscheiden, jedoch konnten die Überschneidungen der Pfeilspitzen-Linien besser als in Versuch 1 interpretiert werden. Die umrahmte und beschriftete Legende wurde als solche erkannt, nachdem sie darauf hingewiesen wurden, den unteren Teil der Grafik durch Nutzen des Scrollrads zu erkunden. Die Labels wurden mehrheitlich entdeckt und konnten korrekt zugeordnet werden. Die Metapher der gefüllten und ungefüllten Seiten der symbolhaft dargestellten Organe wurde verstanden.

## Diskussion

## 6. Diskussion

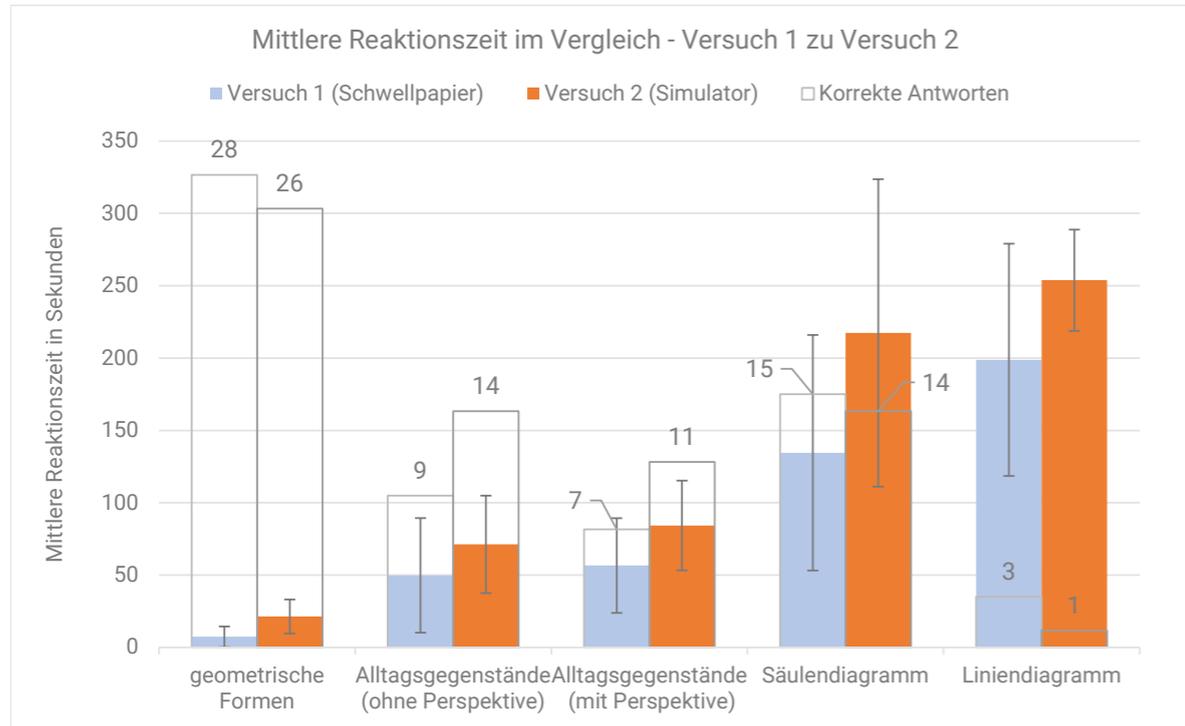


Diagramm 3: Mittlere Reaktionszeit und Anzahl korrekter Antworten von Versuch 1 und Versuch 2 im Vergleich

### 6.1. Vergleich der Beobachtungen aus Versuch 1 und Versuch 2

Einige Teilnehmende des Versuchs 1 erklärten die nicht erfolgreiche Erkennung der dargestellten Alltagsgegenstände damit, dass diese sich nicht anfühlen wie die realen Objekte bzw. nicht deren deutlichsten, haptischen Erkennungsmerkmale aufweisen. Also das z.B. ein Pullover keine klar tastbare Kontur aufweist, sondern sich in erster Linie durch seine Stofflichkeit und erst dann durch die Form auszeichnet. Der Vergleich der Daten zwischen den Teilnehmenden lässt erkennen, dass V1P4 im Set der nicht perspektivisch dargestellten Alltagsgegenstände in Bezug auf Erkennungsdauer und Erkennungsrate deutlich besser abgeschnitten hat, als die anderen Teilnehmer. Es liegt

nahe, dass dies auf die vorhandene visuelle Erfahrung zurückzuführen ist, da der Seher selbst beim Erkunden der taktilen Grafiken nicht eingesetzt werden konnte. Die visuelle Erfahrung scheint ein großer Faktor beim Dekodieren der symbolhaft abstrahierten Darstellungen von Alltagsgegenständen zu sein. Darauf weisen auch die Ergebnisse von (Heller et al. 1996, S. 319) hin. Eine andere Hypothese wäre, dass die Einschränkungen der haptischen Wahrnehmung und deren Simulation allein für die niedrige Erkennungsrate verantwortlich sind, was auch die ebenfalls niedrigere Erkennungsrate für die Alltagsgegenstände (ohne Perspektive) in Versuch 2 erklären würde. Dagegen sprechen die erzielten Werte von V1P4 und V2P5, da es beiden Teilnehmenden möglich

war acht von zwölf Alltagsgegenstände zu erkennen. In Anbetracht der im Vergleich zu den Werten für das Set der geometrischen Formen und der Diagramme niedrige Anzahl an korrekten Antworten, stellt sich die Frage, ob linienhafte Darstellungen mit Symbolcharakter, die beruhend auf der visuellen Erfahrung entstanden sind, haptisch umgesetzt werden sollten. Geburtsblinde Menschen könnten so früh in ihrer Entwicklung damit konfrontiert werden, sodass diese Symbole erlernt und verstanden werden können. Alternativ könnten eigens neue haptische Symbole entwickelt werden, um sie als Elemente in taktilen Grafiken einsetzen zu können.

Auch wenn das Säulendiagramm von allen Teilnehmenden erfolgreich interpretiert werden konnte, ist es fraglich ob die taktile Umsetzung eines Säulendiagramms blinden und sehingeschränkten Menschen gegenüber einer Braille-Tabelle einen praktischen Mehrwert bietet, da die Höhe der Säulen sequenziell abgetastet und verglichen werden muss, ähnlich wie die Werte aus einer Tabelle ertastet und miteinander verglichen werden müssen. In beiden Versuchen konnte beobachtet werden, dass die Teilnehmenden von den breiten, ausgefüllten Flächen der dargestellten Säulen irritiert wurden. Eine Reduktion der Säulenbreite könnte diesen Effekt eliminieren. Ein vergleichender Versuch zur Erkundung von optimierten Säulendiagrammen und Braille-Tabellen könnte diese Frage beantworten.

Die Äußerungen und Fingerbewegungen der Teilnehmenden aus Versuch 1 und 2, welche die Frage zum Liniendiagramm nicht korrekt beantworten konnten, lassen vermuten, dass nicht die Einschränkungen des Tastsinns oder die Modalität der taktilen Grafik Ursache für die inkorrekte Antwort war. Die Beobachtungen und Nachgespräche legen den Schluss nahe, dass die Ursache eher in der mangelnden Erfahrung mit Liniendiagrammen, also einem fehlenden mentalen Modell, liegt.

*Ein direkter Vergleich der Zahlenwerte aus Versuch 1 und 2 ist aufgrund der unterschiedlich großen Wahrnehmungsflächen (zehn Finger und beide Handflächen bei Versuch 1 und ein einzelner Bereich visuell simulierter Reizmuster in Versuch 2) wenig aussagekräftig und wird daher nicht angestellt. Ein Versuch unter vergleichbareren Voraussetzungen ist in Planung.*

## 6.2. Vergleich zu (Loomis et al. 1991)

### 6.2.1. Schwellpapier – Versuche

Das Diagramm 4 zeigt für die blinden Teilnehmenden des Versuch 1 und den verblindeten Versuchspersonen bei (Loomis et al. 1991) im Schwellpapierversuch grundsätzlich eine ähnliche mittlere Korrektheit. Lediglich bei der Darstellung der Schüssel gibt es einen auffallenden Unterschied. 100% der verblindeten Sehenden konnten die Schüssel identifizieren wobei nur 60% der blinden Teilnehmenden dazu in der Lage waren. Eine Erklärung hierfür könnte die mangelnde visuelle Erfahrung seitens der blinden Teilnehmenden sein, da die Darstellung der Schüssel stark von der visuellen Konvention der Perspektive geprägt ist. Ein Indiz für diese Erklärung besteht darin, dass die Teilnehmende mit leichtem Sehrest aus Versuch 1 ebenfalls in der Lage war, die Schüssel durch haptische Exploration zu erkennen, also das visuelle Prinzip der Perspektive auf die taktile Grafik übertragen konnte.

Das Diagramm Diagramm 5 zeigt, dass die verblindeten Sehenden bei (Loomis et al. 1991) im Schwellpapierversuch durchschnittlich eine etwas längere Reaktionszeit benötigten, dies könnte sich zum einen durch eine geringe Erfahrung im Ertasten taktiler Grafiken und zum anderen durch die Beschränkung auf einen Finger bei den Teilnehmenden von (Loomis et al. 1991) erklären lassen.

### 6.2.2. Simulator – Versuche

Die Diagramm 4 und Diagramm 5 zeigen für die ausgewählten Stimuli mit Ausnahme der Darstellung des Schraubendrehers keine eindeutigen Abweichungen zwischen der mittleren Korrektheit der Antworten oder der mittleren Reaktionszeit bei den visuell simulierten Versuchen. Das bedeutet, dass eine Erkundung durch ein reduziertes, fixiertes Sichtfenster in Kombination mit einer künstlichen Unschärfe wie im Hauptversuch bei (Loomis et al. 1991) und eine Erkundung durch einen reduzierten, beweglichen Bereich visuell simulierter Antwortreize der SA I und RA I Nervenfasern in

ähnlichen Messwerten resultieren. Eine unplausible Annahme ist, dass sowohl die Unschärfe als auch die visualisierten Reize gleichsam irrelevant für die Messergebnisse sind, da diese lediglich durch das reduzierte Sichtfenster respektive durch den reduzierten Visualisierungsbereich zustande kommen. Gegen diese Annahme sprechen die Werte des Nebenversuchs von (Loomis et al. 1991), welche nachweisen, dass ein bewegliches reduziertes Sichtfenster in Kombination mit einer künstlichen Unschärfe deutlich bessere Leistungen ermöglicht, als ein fixiertes Sichtfenster bei ansonsten gleichen Konditionen. Es besteht die Möglichkeit, dass sich die leistungsmindernden Effekte der simulierten Reizvisualisierungen und die leistungssteigernden Effekte des beweglichen Visualisierungsbereichs gegenseitig aufheben. Aufgrund der geringen Teilnehmerzahlen in beiden Studien sind die Ergebnisse nicht repräsentativ. Auch die Einflüsse wie Alter, Sprache und Bildungsgrad sind nur schwer abzuschätzen. Um herauszufinden, ob die Kombination aus beweglichem Sichtfenster und künstlicher Unschärfe im Vergleich mit einem beweglichen Bereich visuell simulierter Antwortreize eindeutig unterschiedliche Ergebnisse erzeugt, müsste ein entsprechender Versuch mit einer ausreichend großen Anzahl vergleichbarer Teilnehmenden durchgeführt werden.

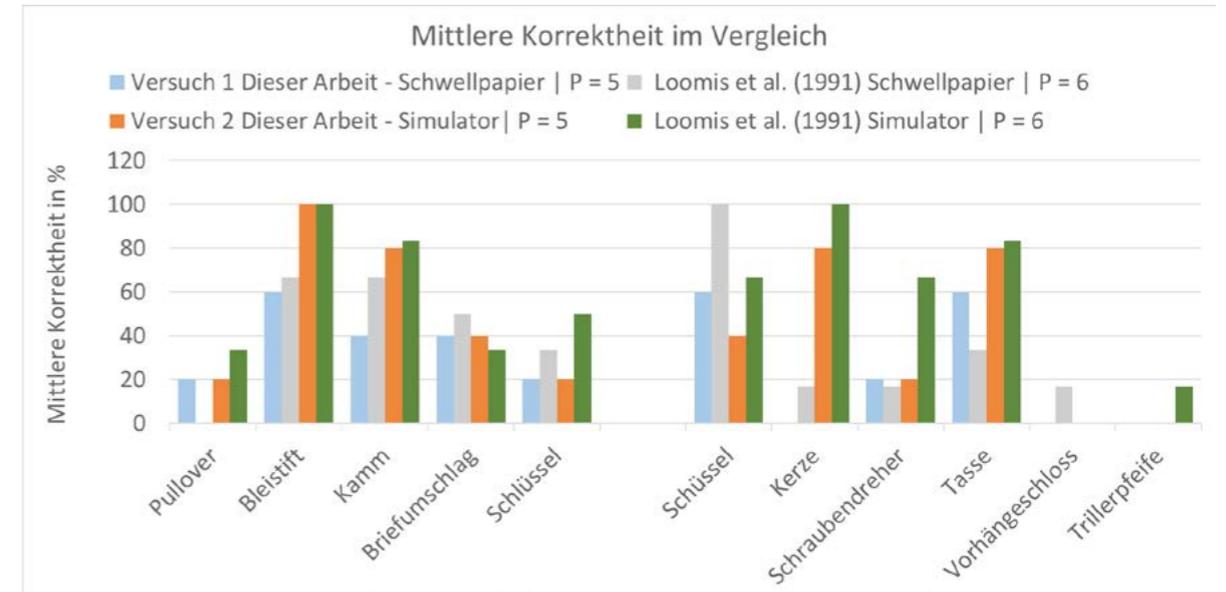


Diagramm 4: Mittlere Korrektheit im Vergleich (Werte aus Loomis et al. wurden vom vergleichbaren Versuch mit einer Wahrnehmungsfläche, die der Auflagefläche des Zeigefingers entspricht entnommen)

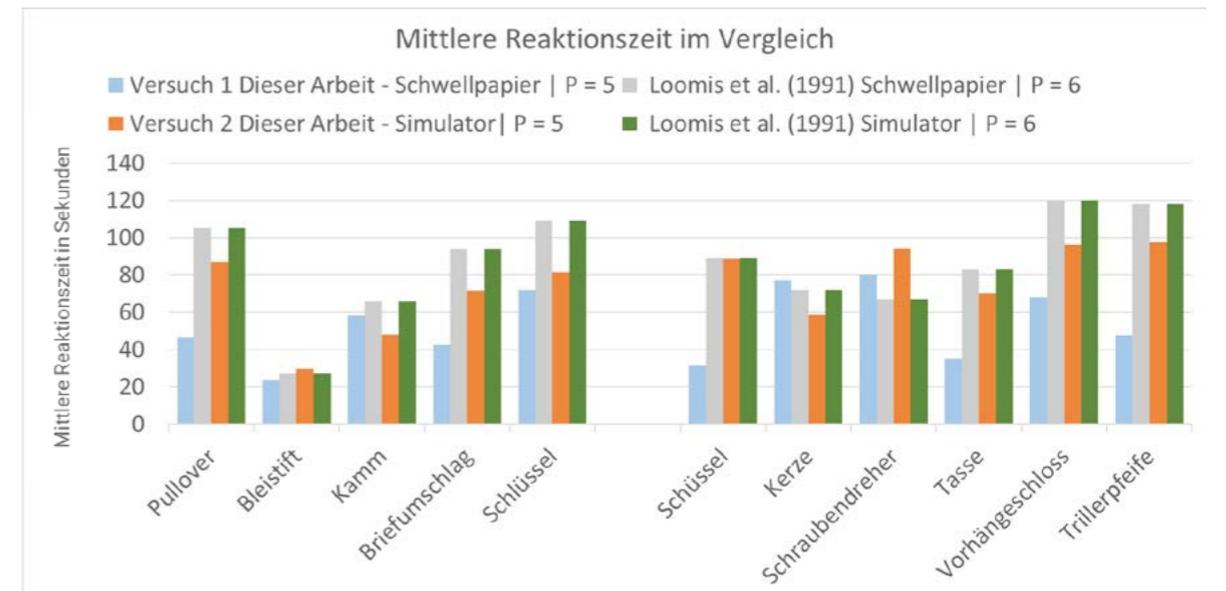


Diagramm 5: Mittlere Reaktionszeit im Vergleich (Werte aus Loomis et al. wurden vom vergleichbaren Versuch mit einer Wahrnehmungsfläche, die der Auflagefläche des Zeigefingers entspricht entnommen)

## 7. Fazit

In dieser Arbeit sollte untersucht werden, ob sich die grundlegenden Eigenheiten der haptischen Wahrnehmung in Bezug auf die Exploration taktiler Grafiken visuell auf einem Computermonitor simulieren lassen. Zu diesem Zweck wurde nach einer ersten qualitativen Untersuchung in Versuch 1, ein Simulator entwickelt, welcher in einem zweiten Versuch ebenfalls qualitativ untersucht wurde. Die Ergebnisse beider Versuche wurden sowohl untereinander, als auch mit bestehenden Versuchsergebnissen aus der Literatur verglichen.

Mit Hilfe von Versuch 1 konnten die in der Literatur beschriebenen, grundlegenden Grenzen und Möglichkeiten der haptischen Wahrnehmung bei der Exploration taktiler Grafiken in der Praxis beobachtet und analysiert werden. Es konnten sowohl weitere Kenntnisse zu haptischer Wahrnehmung und Fühlstrategien der blinden Teilnehmenden erlangt, als auch zu Gestaltungsgrundlagen und Kriterien für sinnvolle Darstellungsformen bei taktilen Grafiken gewonnen werden.

Auf Grundlage der intensiven Literaturrecherche und der Auswertung von Versuch 1 war es möglich, einen prototypischen, auf Webtechnologie basierenden Simulator zu entwickeln, der eine interaktive, visuell simulierte Exploration digitaler Vorlagen für taktile Grafiken gestattet.

Durch die Durchführung und Auswertung von Versuch 2 konnte anhand eines Vergleichs der Ergebnisse und Beobachtungen aus dem ersten Versuch festgestellt werden, welche im Simulator umgesetzten Interaktionsmetaphern funktionieren bzw. nicht funktionieren. Es konnte ebenfalls festgestellt werden, dass die Interpretation abstrakter Darstellungsformen wie Diagrammen – ob nun in Form von taktilen Grafiken, oder als visuelle Grafik – erlernt werden muss. Zudem konnte über einen Vergleich mit dem Simulator

des Hauptversuchs von (Loomis et al. 1991) ermittelt werden, welche tendenziellen Einflüsse die visuell imitierten haptischen Reizmuster auf die Exploration mit dem – im Zuge der vorliegenden Arbeit entwickelten – Simulator haben. Der Vergleich weist des Weiteren darauf hin, dass die geringere örtliche Auflösung des Tastsinns, durch die Einbeziehung des Bewegungs-Faktors in die Reizvisualisierung, annähernd adäquat umgesetzt wurde.

Insbesondere die in beiden Versuchen aufgetretenen, identischen Irritationen und Missverständnisse bei der Erkundung der Diagramme legen die Schlussfolgerung nahe, dass sich ein visuell simuliertes Erkunden digitaler Vorlagen für taktile Grafiken grundsätzlich als Kontrollwerkzeug eignet. Zusätzlich besteht das Potenzial, den Erstellenden subtil ein Grundverständnis über die Möglichkeiten und Grenzen der haptischen Wahrnehmung in Bezug auf taktile Grafiken zu vermitteln.

## 7.1. Optimierungspotenzial

### 7.1.1. Gebrauchstauglichkeit und technische Entwicklung

Um den intuitiven Einstieg in die Nutzung des Simulators zu fördern, könnten transparente Abbildungen oder Umriss von Händen in deren Fingerspitzen die Reizvisualisierung stattfindet, auf dem Monitor visualisiert werden.

In Anbetracht der Beobachtungen bezüglich der angespannten Maus-Nutzung der Teilnehmenden in Versuch 2 und dem Trend absteigender Verkaufszahlen von stationären Desktop-PCs (IDC 2019), sowie der Einschränkung der Maus nur eine Position eingeben zu können, sollten alternative Eingabemethoden für den Simulator entwickelt werden. Bei ausreichend großen Touch-Displays von mobilen Endgeräten könnte der Touch-Screen selbst genutzt werden, indem die taktilen Wahrnehmungsflächen versetzt über den bedienenden Fingern visualisiert werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Hände der Nutzenden per Webcam aufzunehmen und einen Computer-Vision-Algorithmus zur Detektion der Fingerpositionen einzusetzen, um die Wahrnehmungsfelder auf einem Monitor an den ermittelten Positionen zu visualisieren.

Um auch mit der Maus oder einem Trackpad den Eindruck einer Erkundung mehrerer Finger zu erzeugen, könnte während der Erkundung zwischen vordefinierten Hand- und Fingerhaltungen gewechselt werden.

Da der Simulator in die ‚taptic‘ Web-Plattform eingebettet werden soll, kann nicht von einer einheitlichen Displaygröße und Auflösung des Endgeräts ausgegangen werden. Die Darstellung sollte unabhängig von Auflösung und Größe des Displays die entsprechenden Größenverhältnisse der angelegten Endformate (DIN A4, DIN A3, Marburger Format 27x34cm) beibehalten. Um eine adäquate Simulation auf kleinen Endgeräten zu realisieren, ist es nötig, eine Möglichkeit zu finden, die taktile Wahrnehmungsfläche auf der

gesamten Darstellung zu verschieben, ohne den Charakter der Simulation grundlegend zu verändern.

Für den Einsatz als Fehleranalysewerkzeug, sollte eine Möglichkeit entwickelt werden, problematische Bereiche effizient und effektiv zu markieren, um die Fehlerquelle im Nachgang beseitigen zu können.

Sollte der Simulator Bestandteil der ‚taptic‘ Web-Plattform werden, scheint es erforderlich die Nutzenden dazu zu animieren, die von anderen erstellten Vorlagen zu analysieren, da davon ausgegangen werden muss, dass eine unbeeinflusste Analyse durch den Erstellenden selbst nur bedingt möglich ist.

### 7.1.2. Eigenschaften der Haptischen Wahrnehmung

Die Außenseiten der Vorlagen sollten durch den Simulator äquivalent zu den Papierkanten der physischen taktilen Grafik dargestellt werden, sodass sie wahrnehmbar sind, jedoch nicht dauerhaft angezeigt werden.

Sind unterschiedliche Schwellhöhen innerhalb einer taktilen Grafik durch Grauabstufungen in der digitalen Vorlage realisiert worden, sollte sich die Intensität der Reizvisualisierung des Simulators anpassen. Der Effekt könnte über eine Anpassung der Deckkraft bzw. Transparenz der visualisierten Punkte dargestellt werden.

Um die Reizvisualisierung weiter an die realen Peripherie-Prozesse des Tastsinns anzugleichen, sollte eine Methode gefunden werden, die Mechanorezeptoren zu clustern. Die Reize sollten, dem biologischen Vorbild entsprechend an den jeweiligen Nervenfasern visualisiert werden.

Da die verzögerte Reizvisualisierung der Merkelzellen bzw. der SA I Nervenfasern einen erheblichen Einfluss auf die Gestalt der Gesamtvisualisierung hat, sollte bezüglich des Reizantwortverhaltens dieser Mechanorezeptoren noch intensiver recherchiert und die ggf. erlangten Erkenntnisse umgesetzt werden.

Die Reizvisualisierung der Meissner-Körperchen bzw. der RA I Nervenfasern sollte dahingehend an das in der Literatur dokumentierte Antwortverhalten angepasst werden, sodass auch am Ende einer andauernden mechanischen Auslenkung eine Reizvisualisierung stattfindet.

### 7.2. Ausblick

Nach dem Ausschöpfen der genannten Optimierungspotenziale soll deren Auswirkung in weiteren Versuchen analysiert werden.

Zudem sind Untersuchungen im realen Nutzungskontext geplant. Nachdem in der vorliegenden Arbeit die grundlegende Eignung des Simulators zur Visualisierung von Eigenheiten und Grenzen der haptischen Wahrnehmung im Kontext taktiler Grafiken bestätigt wurde, gilt es herauszufinden, ob sich die Eignung auch auf den Einsatz als Fehleranalysewerkzeug erweitern lässt. Hierzu werden Vorlagen für taktile Grafiken mit dem Editor der Webplattform gestaltet und im Anschluss unter Zuhilfenahme des Simulators auf ihre haptische Wahrnehmbarkeit und eventuelle wahrnehmungsbedingte Fehler untersucht. Aufgrund derselben Vorlagen werden taktile Grafiken produziert und ebenfalls auf Fehler analysiert. Ein Vergleich der Ergebnisse beider Analysen sollte die Frage nach der Tauglichkeit des Simulators als Fehleranalysetool im realen Nutzungskontext beantworten.

Außerdem sind weitere vergleichende Versuche zur Erkundung von taktilen Diagrammen geplant. Zum Beispiel sollen optimierte Säulendiagramme gegen Braille-Tabellen getestet werden, um Vor- und Nachteile beider Darstellungsformen zu ermitteln. Durch den parallelen Einsatz des Simulators bei solchen Untersuchungen kann dessen Entwicklung weiter voranschreiten.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Ein besonderer Dank gilt allen Teilnehmenden meiner Versuche, ohne die diese Arbeit nicht hätte entstehen können.

Außerdem möchte ich Mara Brauer und Sebastian Göttel für das Korrekturlesen meiner Masterarbeit danken.

Ein besonderer Dank gilt meinen Projektpartnern Laura Evers und Robert Wlček.

Meiner Freundin Mara danke ich besonders für den starken emotionalen Rückhalt und das entgegen gebrachte Verständnis über die Dauer der Bearbeitung dieser Arbeit.

Ich bedanke mich bei der Investitionsbank Sachsen-Anhalt für die finanzielle Unterstützung des Projekts ‚tactic‘. Sowie bei dem ‚gründet‘-Team der Hochschule Magdeburg-Stendal für die Betreuung des Gesamtprojekts.

Abschließend gebührt mein Dank Dr. Michael Minge und Prof. Dominik Schumacher, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet haben. Für die hilfreichen Anregungen, die konstruktive Kritik und die Freiheiten bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

## 8. Literaturverzeichnis

- Bolanowski Jr., Stanley J.; Gescheider, George A.; Verrillo, Ronald T.; Checkosky, Christin M. (1988): Four channels mediate the mechanical aspects of touch. In: *The Journal of the Acoustical society of America* 84 (5), S. 1680–1694.
- Bornschein, Denise; Engel, Christin (2018): Erkunden taktiler Grafiken. Schulungsunterlagen für blinde und sehbehinderte Menschen. TUD, Fakultät Informatik, Institut für Angewandte Informatik, Professur. Online verfügbar unter [https://tu-dresden.de/ing/informatik/ai/mci/ressourcen/dateien/forschung/mosaik/Schulung\\_Erkundung\\_taktiler\\_Grafiken.pdf](https://tu-dresden.de/ing/informatik/ai/mci/ressourcen/dateien/forschung/mosaik/Schulung_Erkundung_taktiler_Grafiken.pdf), zuletzt geprüft am 11.06.2019.
- Bornschein, Jens; Prescher, Denise (2014): Collaborative Tactile Graphic Workstation for Touch-Sensitive Pin-Matrix Devices.
- Burdea, Grigore C.; Brooks, Frederick P. (1996): Force and touch feedback for virtual reality.
- Connor, C. E.; Hsiao, S. S.; Phillips, J. R.; Johnson, K. O. (1990): Tactile roughness: neural codes that account for psychophysical magnitude estimates. In: *J. Neurosci.* 10 (12), S. 3823–3836. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.10-12-03823.1990.
- Craig, James C. (1985): Attending to two fingers. Two hands are better than one. In: *Perception & Psychophysics* 38 (6), S. 496–511. DOI: 10.3758/BF03207059.
- Dargahi, J.; Najarian, S. (2004): Human tactile perception as a standard for artificial tactile sensing—A review. In: *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* 1 (1), S. 23–35.
- DIN EN ISO 9241-910:2011-11, Ergonomie der Mensch-System-Interaktion\_ Teil\_910: Rahmen für die taktile und haptische Interaktion (ISO\_9241-910:2011); Deutsche Fassung EN\_ISO\_9241-910:2011.
- Doerrer, Christoph: Entwurf eines elektromechanischen Systems für flexibel konfigurierbare Eingabefelder mit haptischer Rückmeldung. @Darmstadt, Techn. Univ., Diss, 2003. Online verfügbar unter [http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000435/diss\\_doerrer.pdf](http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000435/diss_doerrer.pdf).
- DWDS – Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache: Das Wortauskunftssystem zur deutschen Sprache in Geschichte und Gegenwart. Hg. v. Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, zuletzt geprüft am 04.06.2019.
- Evers, Laura; Wlcek, Robert; Förchler, Florentin (2018): tacpic - Entwicklung einer Onlineplattform für taktile Grafiken. In: *blind-sehbehindert* 138, S. 268–270. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/publication/329196332\\_tacpic\\_-\\_Entwicklung\\_einer\\_Onlineplattform\\_fur\\_taktile\\_Grafiken](https://www.researchgate.net/publication/329196332_tacpic_-_Entwicklung_einer_Onlineplattform_fur_taktile_Grafiken), zuletzt geprüft am 04.06.2019.
- Fakoo, Alexander (2018): Braille-Alphabet, Brailleschrift, Punktschrift für Blinde, Blindenschrift 1825 / [www.fakoo.de](http://www.fakoo.de).

- de. Alexander Fakoo. Online verfügbar unter <http://www.fakoo.de/braille.html>, zuletzt aktualisiert am 20.09.2018, zuletzt geprüft am 18.06.2019.
- Goldstein, E. Bruce; Ritter, Manfred (2002): Wahrnehmungspsychologie. 2. dt. Aufl. Stuttgart: Spectrum.
- Grunwald, Martin; Beyer, Lothar (Hg.) (2001): Der bewegte Sinn. Grundlagen und Anwendungen zur haptischen Wahrnehmung. Basel: Birkhäuser Basel.
- Grunwald, Martin; Müller, Stephanie (2017): Wissenschaftliche Grundlagen der Palpation. In: *Lehrbuch Osteopathische Medizin* 1.
- Hartridge, H.; Owen, H. B. (1922): TEST TYPES. In: *The British journal of ophthalmology* 6 (12), S. 543–549. DOI: 10.1136/bjo.6.12.543.
- Hatzfeld, Christian (2013): Experimentelle Analyse der menschlichen Kraftwahrnehmung als ingenieurtechnische Entwurfsgrundlage für haptische Systeme. Dissertation. Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt, Darmstadt.
- Helios, Dietmar (2001): Handbuch zur Erstellung taktiler Graphiken: Univ.(TH), Studienzentrum für Sehgeschädigte.
- Heller, Morton A.; Calcaterra, Jeffrey A.; Burson, Lynnetta L.; Tyler, Lisa A. (1996): Tactual picture identification by blind and sighted people. Effects of providing categorical information. In: *Perception & Psychophysics* 58 (2), S. 310–323. DOI: 10.3758/BF03211884.
- Howe, Robert D. (1993): Tactile sensing and control of robotic manipulation. In: *Advanced Robotics* 8 (3), S. 245–261.
- IDC (2019): Absatz von Tablets, PCs und Smartphones weltweit von 2010 bis 2018 und Prognose für 2019 und 2023 (in Millionen Stück). Hg. v. IDC. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/256337/umfrage/prognose-zum-weltweiten-absatz-von-tablets-pcs-und-smartphones/>, zuletzt geprüft am 23.06.2019.
- Jaworek, Gerhard (2014): Erkennen und Verstehen von taktilen Grafiken. Online verfügbar unter <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000040725>.
- Johansson, Roland S.; Vallbo, A. B. (1979): Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. In: *The Journal of Physiology* 286 (1), S. 283–300.
- Johansson, Roland S.; Vallbo, Åke B. (1983): Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. In: *Trends in Neurosciences* 6, S. 27–32. DOI: 10.1016/0166-2236(83)90011-5.

Johnson, K. O.; Lamb, G. D. (1981): Neural mechanisms of spatial tactile discrimination: neural patterns evoked by braille-like dot patterns in the monkey. In: *The Journal of Physiology* 310 (1), S. 117–144. DOI: 10.1113/jphysiol.1981.sp013540.

Johnson, K. O.; Phillips, J. R. (1981): Tactile spatial resolution. I. Two-point discrimination, gap detection, grating resolution, and letter recognition. In: *Journal of neurophysiology* 46 (6), S. 1177–1192. DOI: 10.1152/jn.1981.46.6.1177.

Joos, Markus; Velichkovsky, Boris (2003): Bewegungen des menschlichen Auges: Fakten, Methoden und innovative Anwendungen. In: *Handbuch der Psycholinguistik*.

Katz, David (1925): Der Aufbau der Tastwelt.

Klatzky, Roberta L.; Loomis, Jack M.; Lederman, Susan J.; Wake, Hiromi; Fujita, Naofumi (1993): Haptic identification of objects and their depictions. In: *Perception & Psychophysics* 54 (2), S. 170–178. DOI: 10.3758/BF03211752.

Kurze, Martin (1999): Methoden zur computergenerierten Darstellung räumlicher Gegenstände für Blinde auf taktilen Medien. Zugl.: Berlin, Freie Univ., Diss. Als Ms. gedr. Düsseldorf: VDI-Verl. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 10, Informatik / Kommunikationstechnik, 613).

Lederman, Susan J.; Chataway, Cynthia (1990): Visual mediation and the haptic recognition of two-dimensional pictures of common objects.

Lederman, Susan J.; Klatzky, Roberta L.; Barber, Paul O. (1985): Spatial and movement-based heuristics for encoding pattern information through touch. In: *Journal of experimental psychology: General* 114 (1), S. 33.

Loomis, J. M.; Klatzky, R. L.; Lederman, S. J. (1991): Similarity of tactual and visual picture recognition with limited field of view. In: *Perception* 20 (2), S. 167–177. DOI: 10.1068/p200167.

Loomis, Jack M. (1986): Scan-display of high-resolution images using the Apple II. In: *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 18 (1), S. 36–40. DOI: 10.3758/BF03200991.

Peters, Ryan M.; Hackeman, Erik; Goldreich, Daniel (2009a): Diminutive digits discern delicate details: fingertip size and the sex difference in tactile spatial acuity. In: *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience* 29 (50), S. 15756–15761. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3684-09.2009.

Peters, Ryan M.; Hackeman, Erik; Goldreich, Daniel (2009b): Diminutive digits discern delicate details: fingertip size and the sex difference in tactile spatial acuity. In: *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience* 29 (50), S. 15756–15761. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3684-09.2009.

Phillips, J. R.; Johansson, R. S.; Johnson, K. O. (1990): Representation of braille characters in human nerve fibres. In: *Exp Brain Res* 81 (3), S. 589–592. DOI: 10.1007/BF02423508.

Phillips, J. R.; Johansson, R. S.; Johnson, K. O. (1992): Responses of human mechanoreceptive afferents to embossed dot arrays scanned across fingerpad skin. In: *J. Neurosci.* 12 (3), S. 827–839. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.12-03-00827.1992.

Phillips, J. R. von; Johnson, K. O.; Hsiao, S. S. (1988): Spatial pattern representation and transformation in monkey somatosensory cortex. In: *PNAS* 85 (4), S. 1317–1321. DOI: 10.1073/pnas.85.4.1317.

Röder, Brigitte; Rösler, Frank (2001): Vergleich haptischer Wahrnehmungsleistungen zwischen blinden und sehenden Personen. In: *Der bewegte Sinn*: Springer, S. 89–98.

Schandry, Rainer (2011): Biologische Psychologie. Mit Online-Materialien. 3. Originalausgabe. Weinheim: Beltz.

Schmidt, Robert F.; Schaible, Hans-Georg (2006): Neuro-und sinnesphysiologie.

Schuenemann, M.; Widmann, H. (1998): Tactile actuators for tactile feedback systems. In: *Actuator* 98, S. 333–336.

Silbernagel, S.; Despopoulos, A. (1991): Taschenatlas der Physiologie. 4. Aufl. Stuttgart: Thieme Verlag.

Snodgrass, Joan G.; Vanderwart, Mary (1980): A standardized set of 260 pictures: Norms for name agreement, image agreement, familiarity, and visual complexity. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory* 6 (2), S. 174–215. DOI: 10.1037/0278-7393.6.2.174.

Treede, Rolf-Detlef (2007): Das somatosensorische System. In: *Physiologie des menschen*: Springer, S. 296–323.

Vallbo, Ake B.; Johansson, Roland S. (1984): Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. In: *Hum Neurobiol* 3 (1), S. 3–14.

Weber, Ernst Heinrich (1851): Die lehre vom tastsinne und gemeingefühle auf versuche gegründet: Friedrich Vieweg und Sohn.

Wijntjes, Maarten W. A.; van Lienen, Thijs; Verstijnen, Ilse M.; Kappers, Astrid M. L. (2008): The influence of picture size on recognition and exploratory behaviour in raised-line drawings. In: *Perception* 37 (4), S. 602–614. DOI: 10.1068/p5714.

Zimmermann, M. (2000): Das somatoviszzerale sensorische System. In: Robert F. Schmidt, Gerhard Thews und Florian Lang (Hg.): *Physiologie des Menschen*, Bd. 33. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch), S. 216–235.

Anhang

## 9.1. Heatmaps

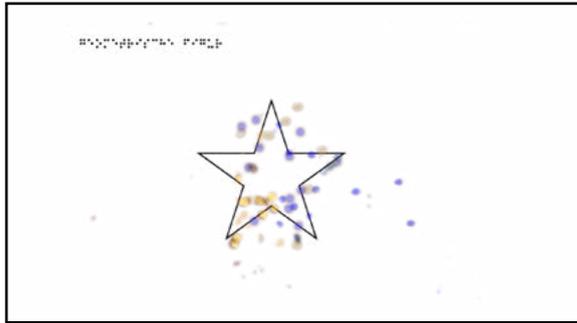


Abbildung 21: Stern Heatmap Versuch 1

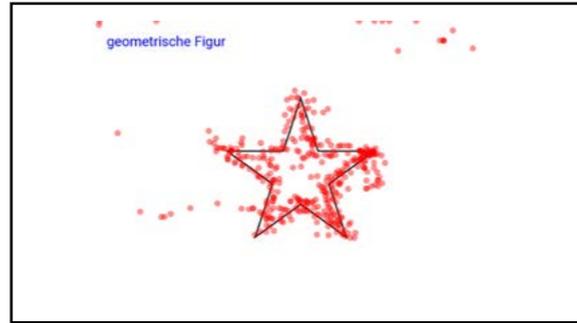


Abbildung 25: Stern Heatmap Versuch 2

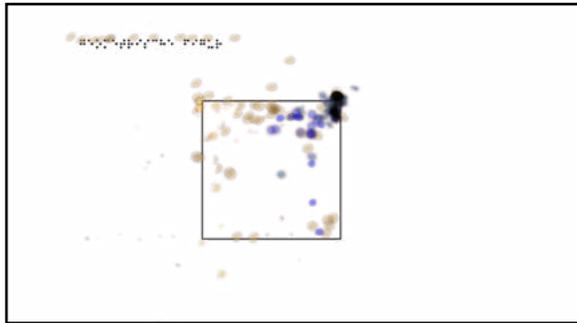


Abbildung 22: Quadrat Heatmap Versuch 1

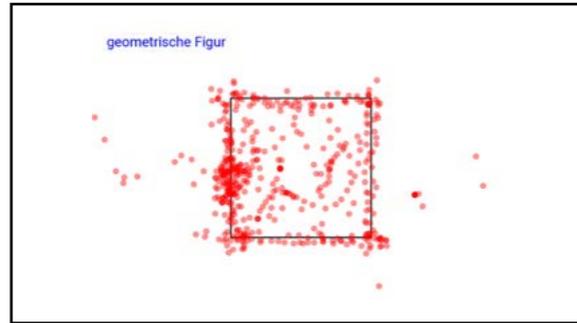


Abbildung 26: Quadrat Heatmap Versuch 2

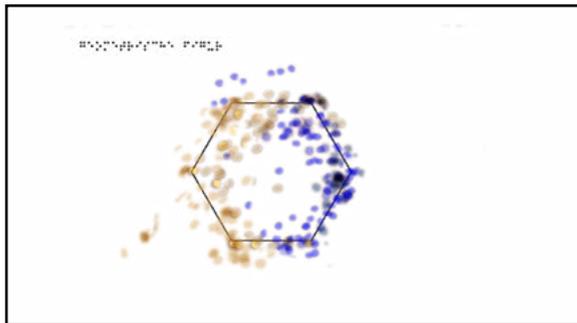


Abbildung 23: Sechseck Heatmap Versuch 1

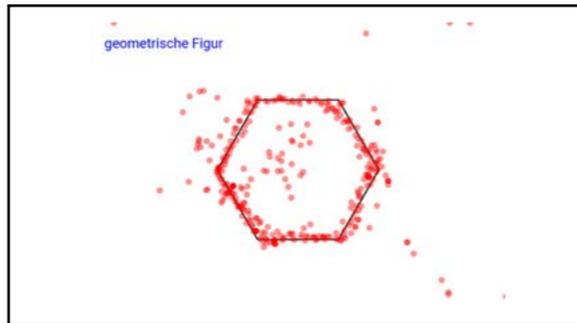


Abbildung 27: Sechseck Heatmap Versuch 2

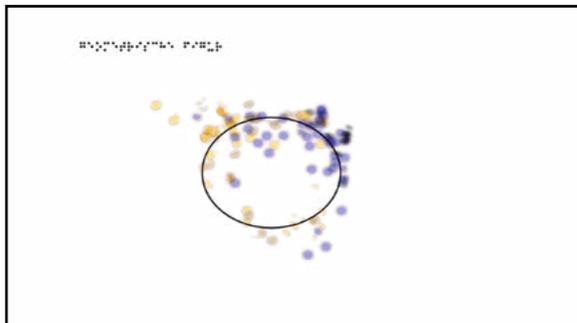


Abbildung 24: Oval Heatmap Versuch 1

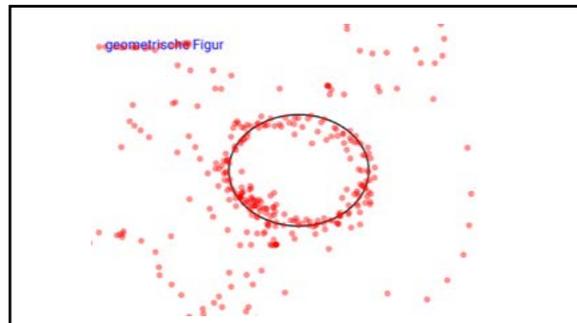


Abbildung 28: Oval Heatmap Versuch 2

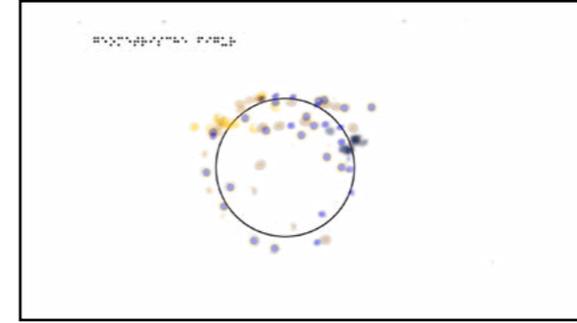


Abbildung 29: Kreis Heatmap Versuch 1

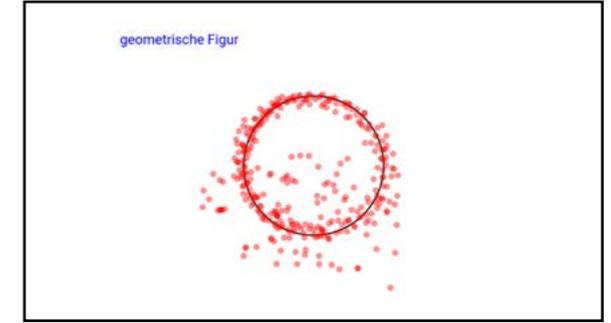


Abbildung 33: Kreis Heatmap Versuch 2

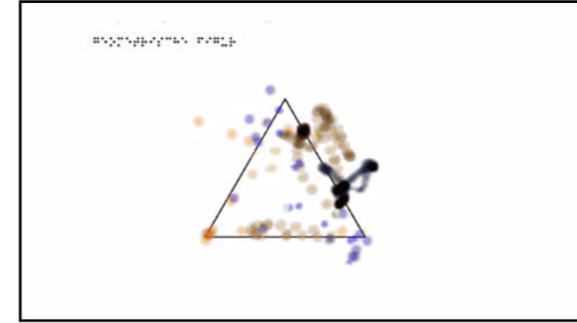


Abbildung 30: Dreieck Heatmap Versuch 1

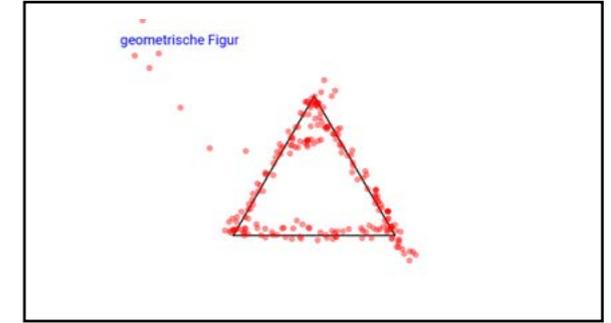


Abbildung 34: Dreieck Heatmap Versuch 2

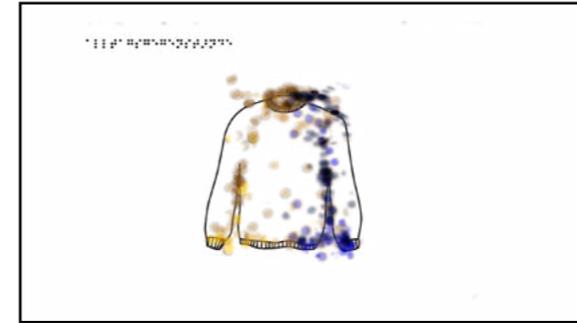


Abbildung 31: Pullover Heatmap Versuch 1

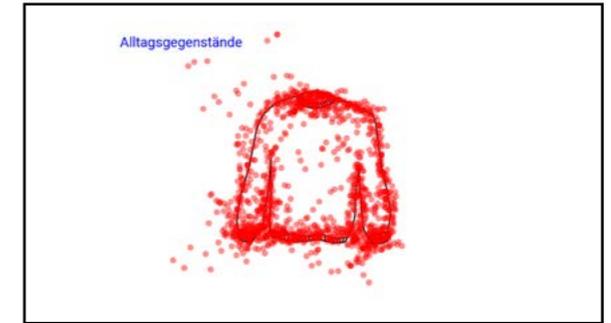


Abbildung 35: Pullover Heatmap Versuch 2

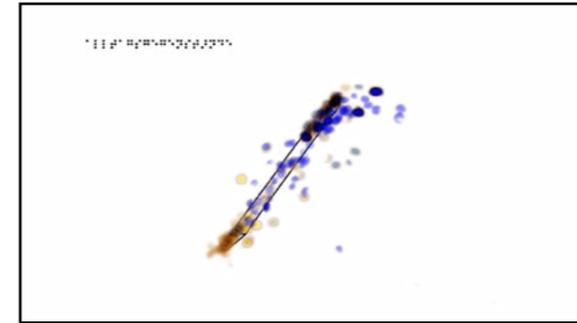


Abbildung 32: Bleistift Heatmap Versuch 1

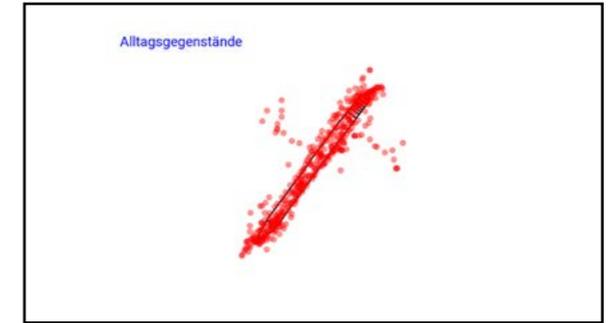


Abbildung 36: Bleistift Heatmap Versuch 2

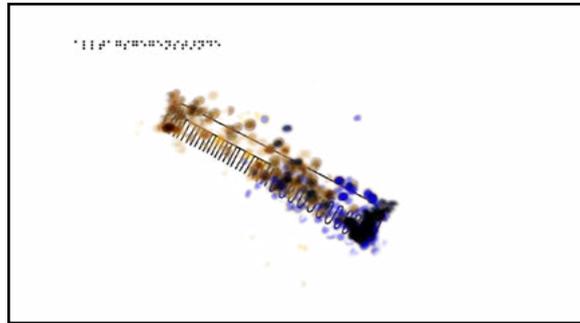


Abbildung 37: Kamm Heatmap Versuch 1

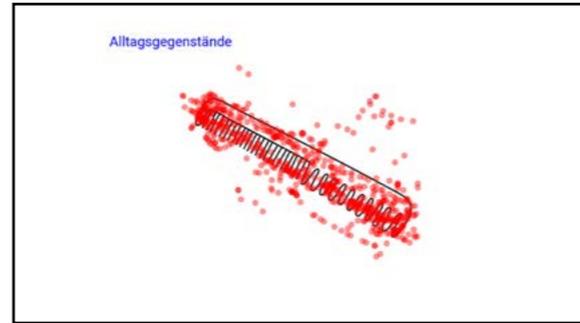


Abbildung 41: Kamm Versuch 2

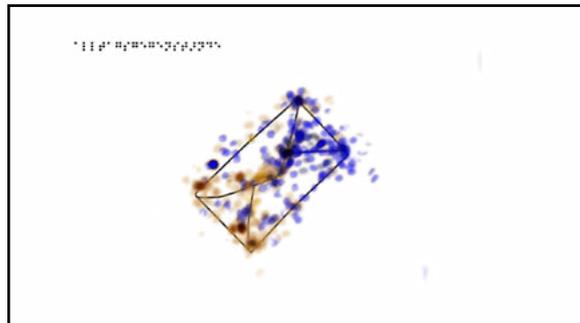


Abbildung 38: Briefumschlag Heatmap Versuch 1

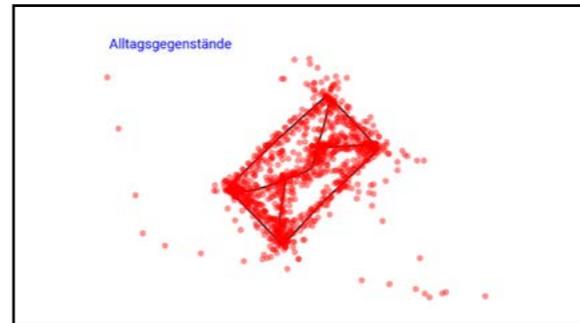


Abbildung 42: Briefumschlag Heatmap Versuch 2

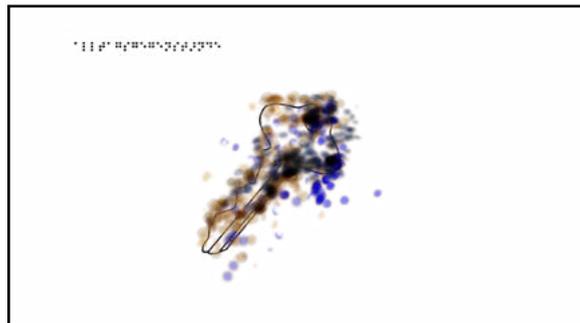


Abbildung 39: Schlüssel Heatmap Versuch 1

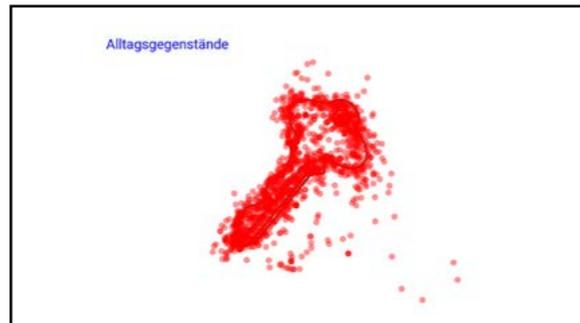


Abbildung 43: Schlüssel Heatmap Versuch 2

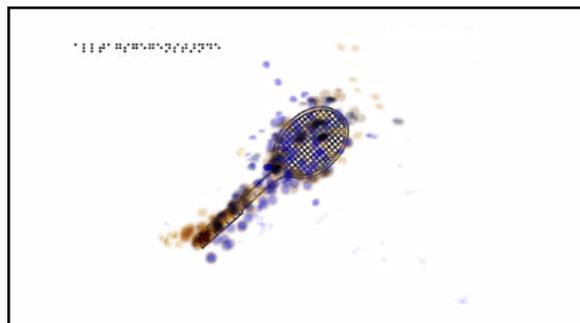


Abbildung 40: Tennisschläger Heatmap Versuch 1

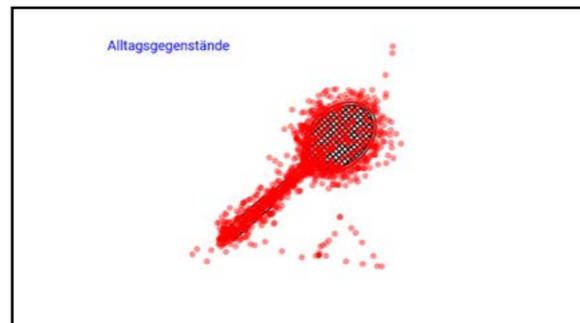


Abbildung 44: Tennisschläger Heatmap Versuch 2

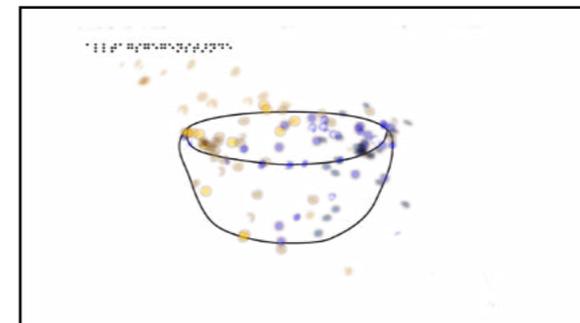


Abbildung 45: Schüssel Heatmap Versuch 1

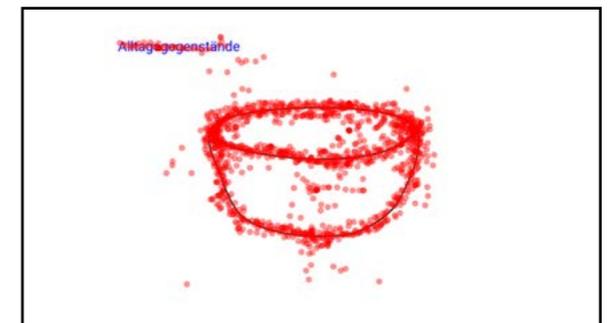


Abbildung 49: Schüssel Heatmap Versuch 2

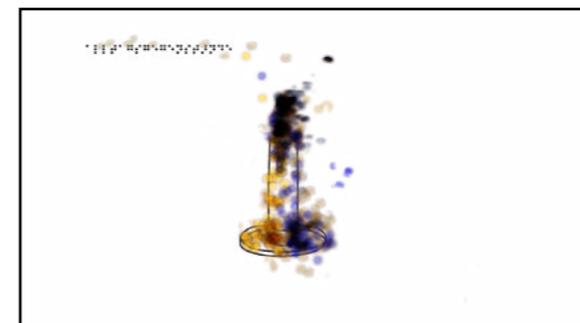


Abbildung 46: Kerze Heatmap Versuch 1

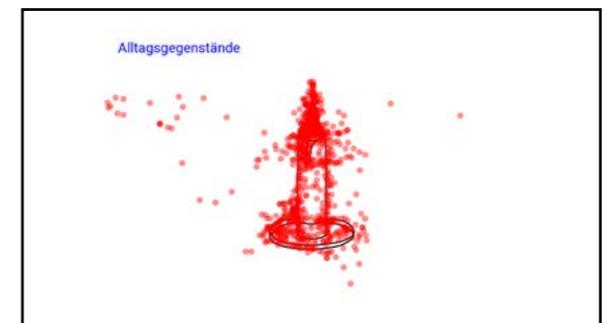


Abbildung 50: Kerze Heatmap Versuch 2

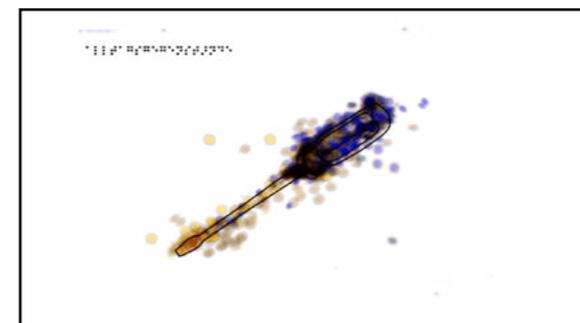


Abbildung 47: Schraubendreher Heatmap Versuch 1

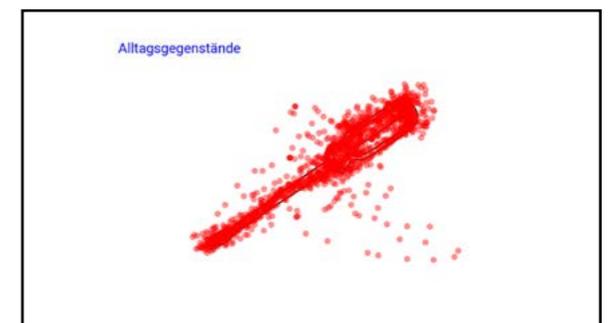


Abbildung 51: Schraubendreher Heatmap Versuch 2

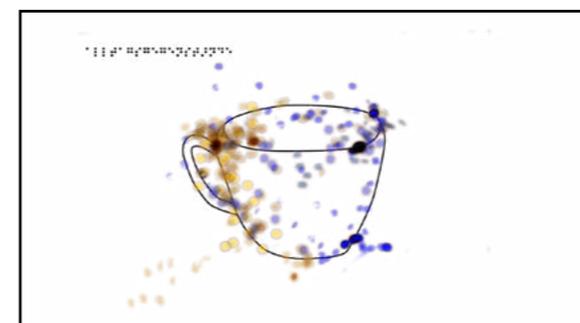


Abbildung 48: Tasse Heatmap Versuch 1

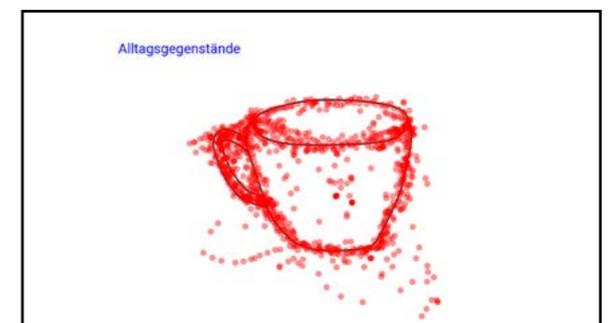


Abbildung 52: Tasse Heatmap Versuch 2

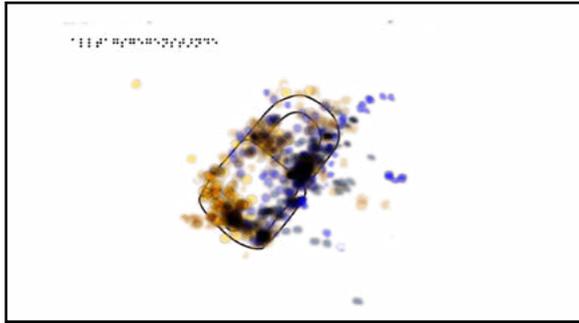


Abbildung 53: Vorhängeschloss Heatmap Versuch 1



Abbildung 55: Vorhängeschloss Heatmap Versuch 2

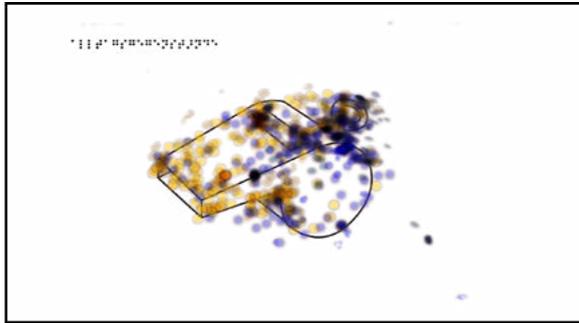


Abbildung 54: Trillerpfeife Heatmap Versuch 1

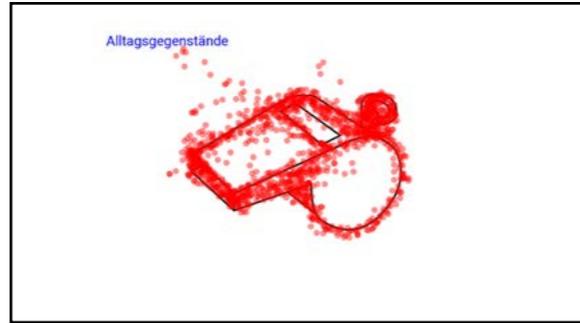


Abbildung 56: Trillerpfeife Heatmap Versuch 2

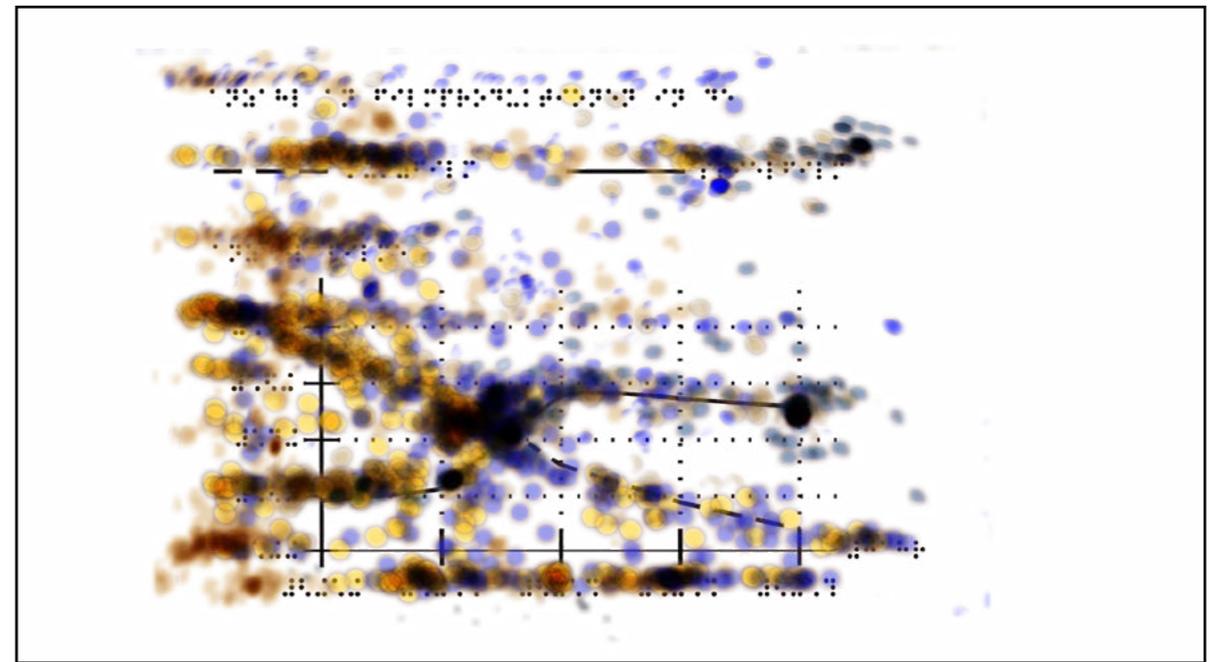


Abbildung 57: LiniendiagrammHeatmapVersuch1

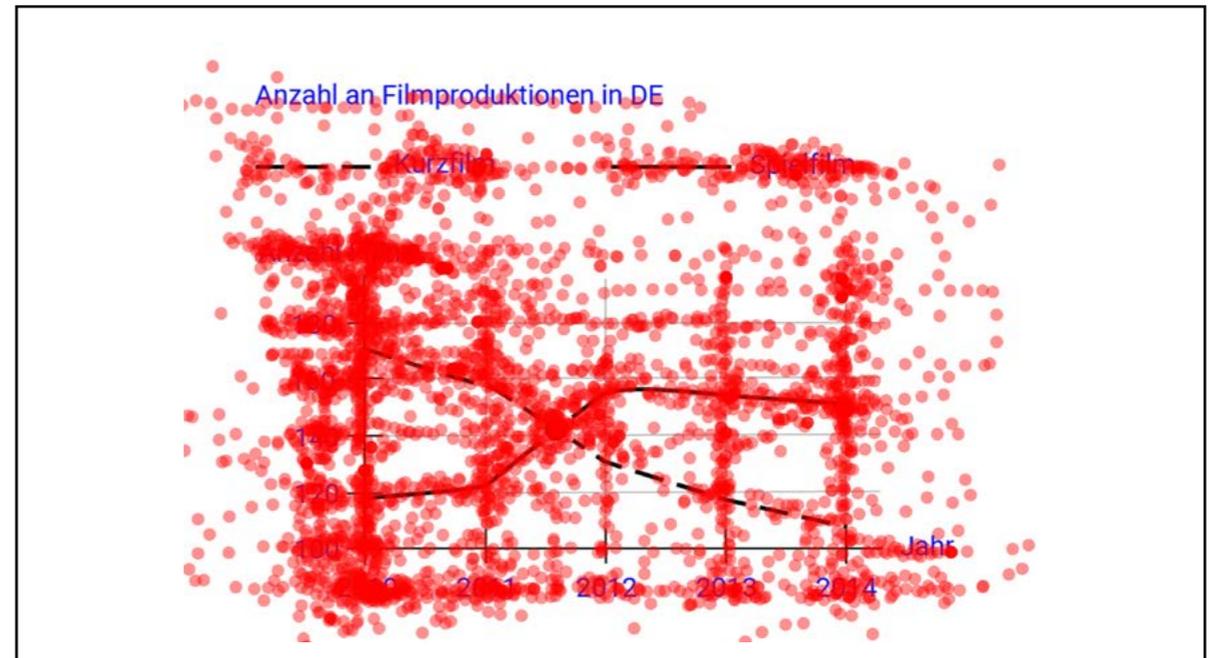


Abbildung 58: LiniendiagrammHeatmapVersuch2

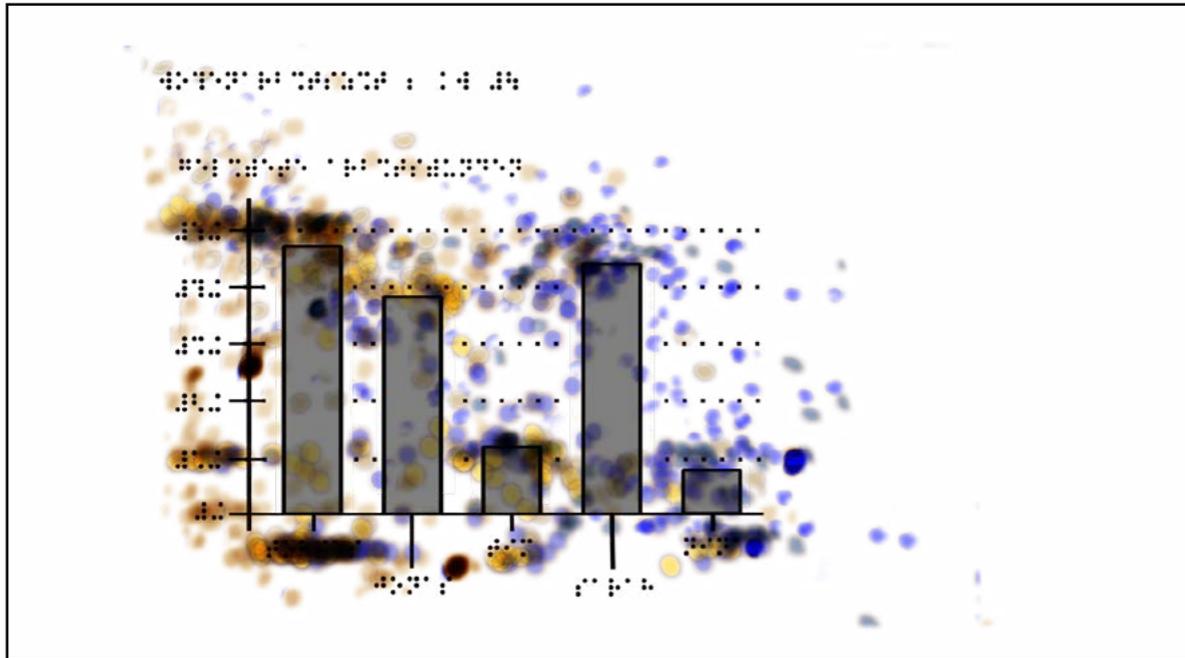


Abbildung 60: Säulendiagramm Heatmap Versuch 1

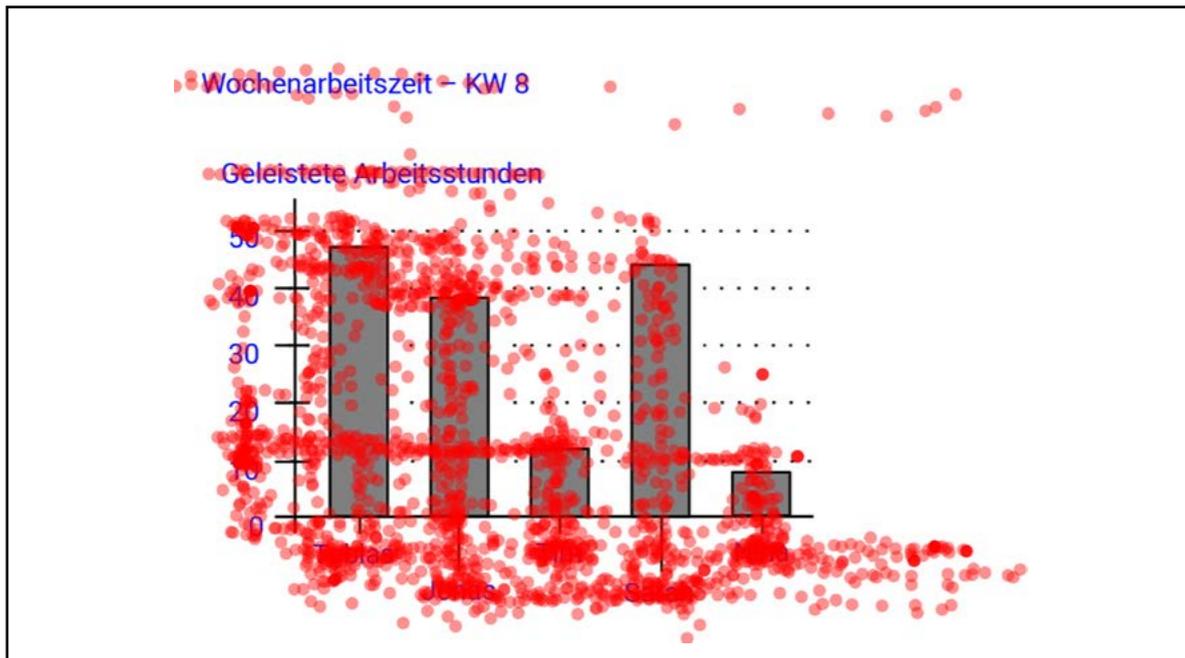


Abbildung 59: Säulendiagramm Heatmap Versuch 2

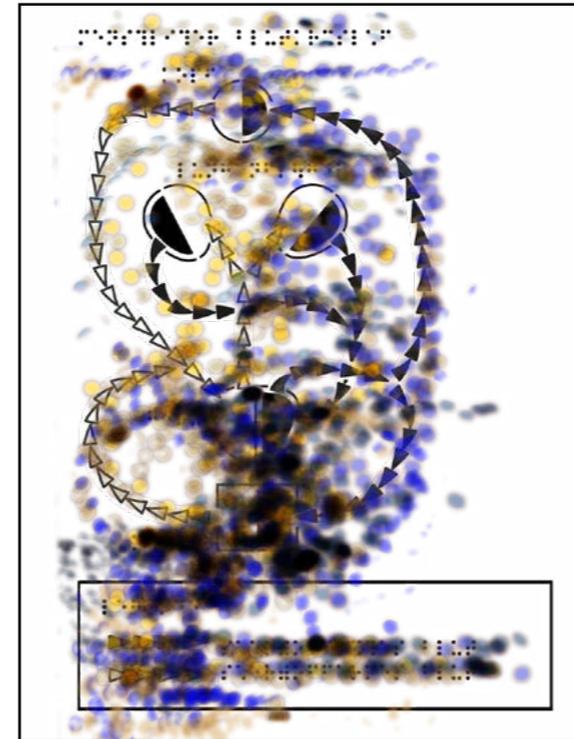


Abbildung 61: Blutkreislauf Heatmap Versuch 1

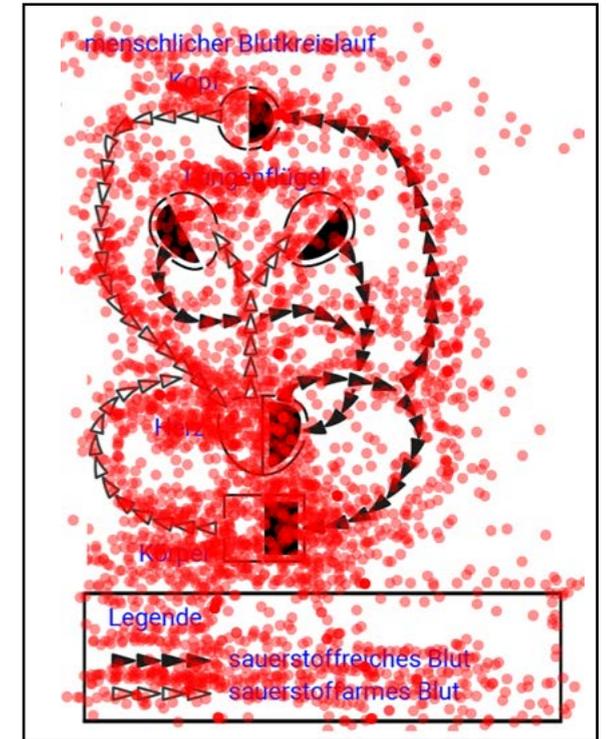
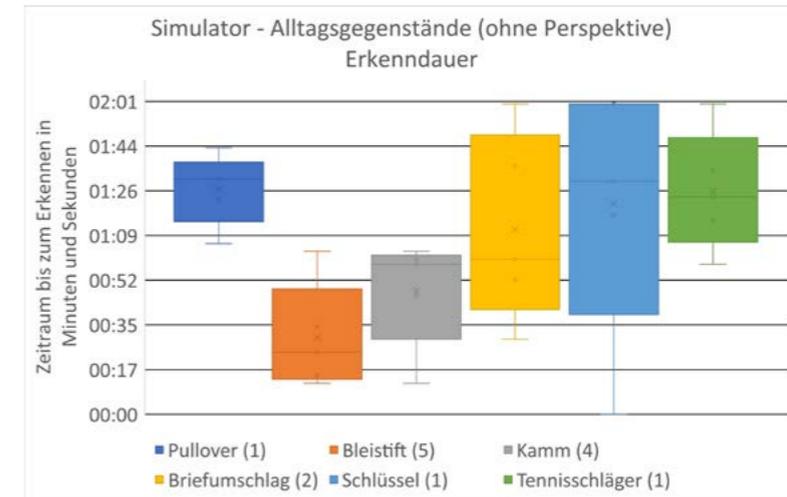
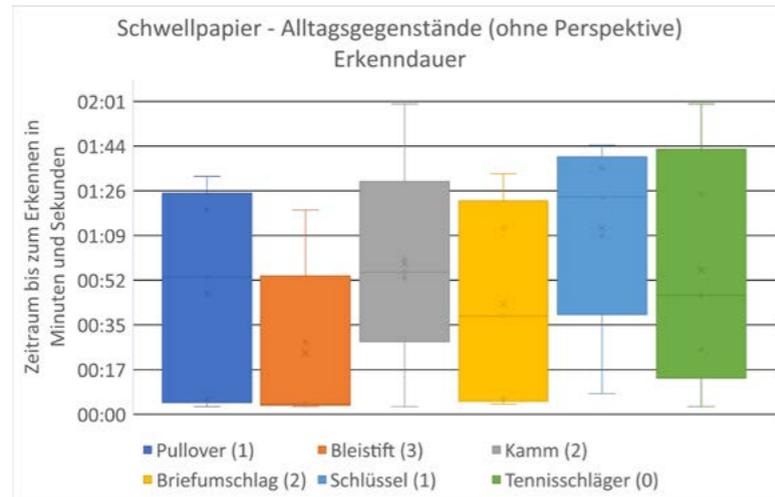
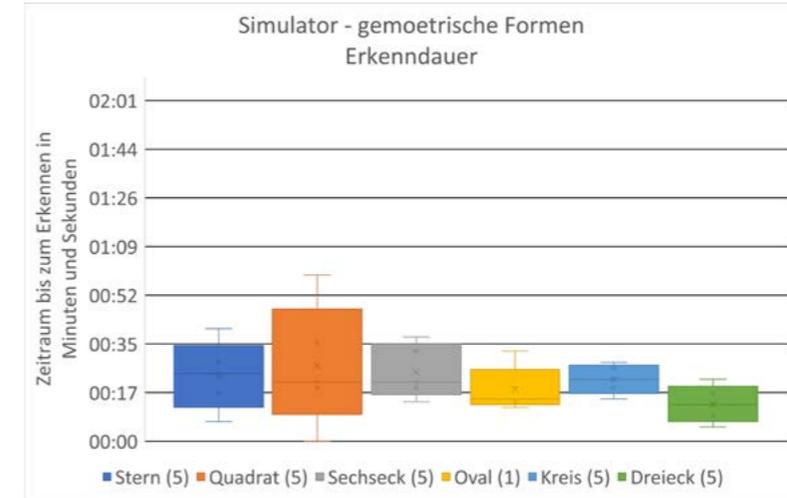
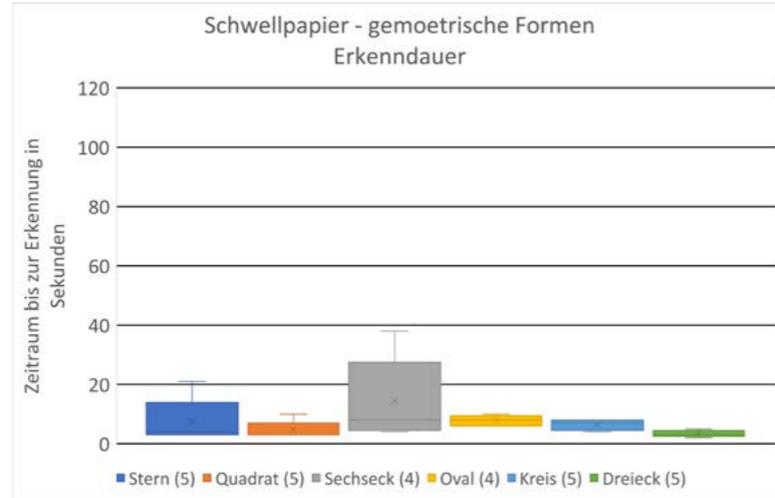
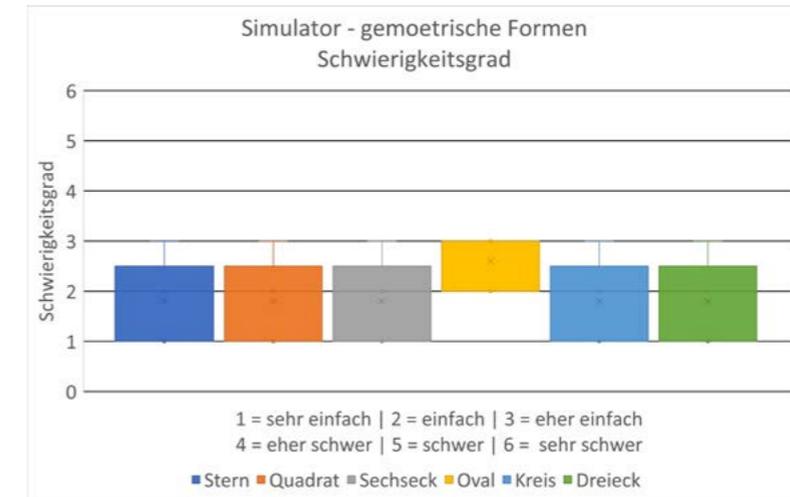
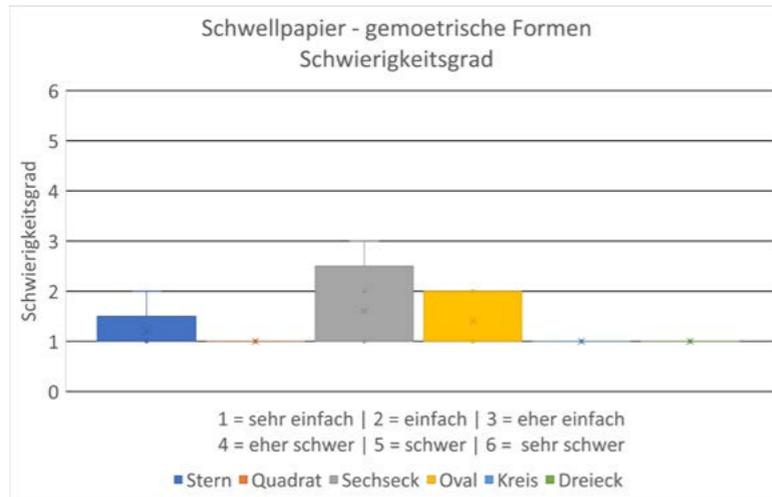
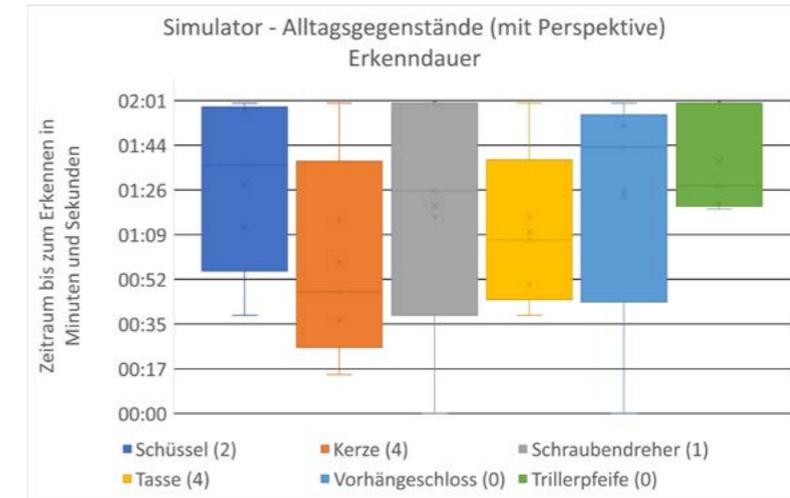
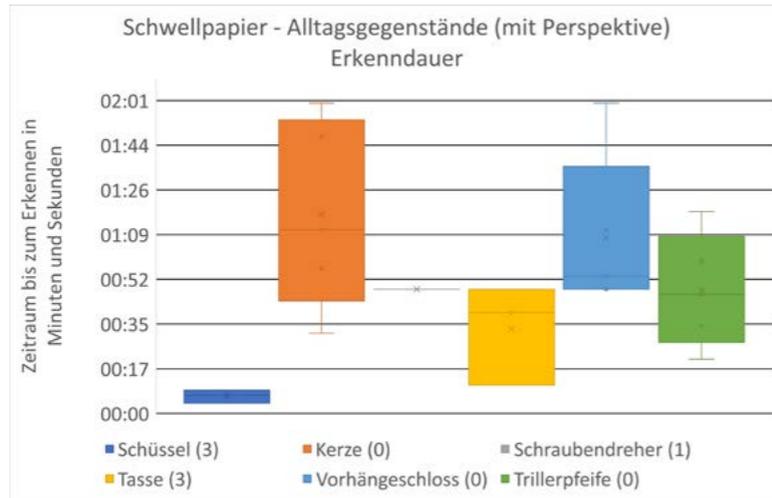
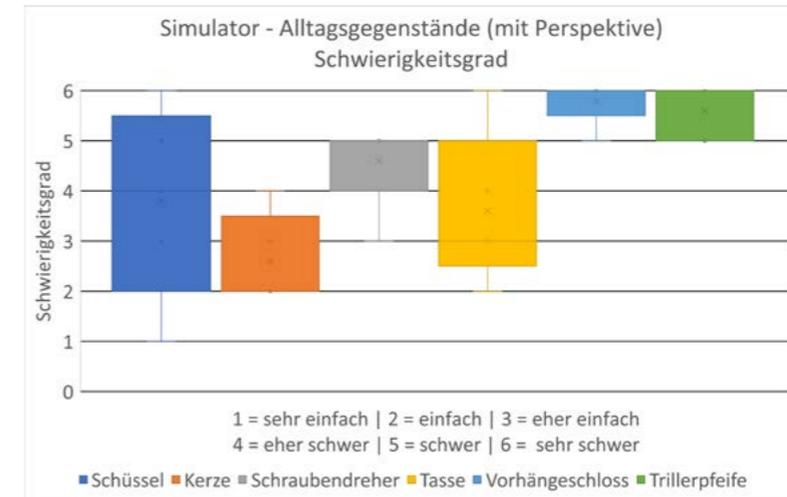
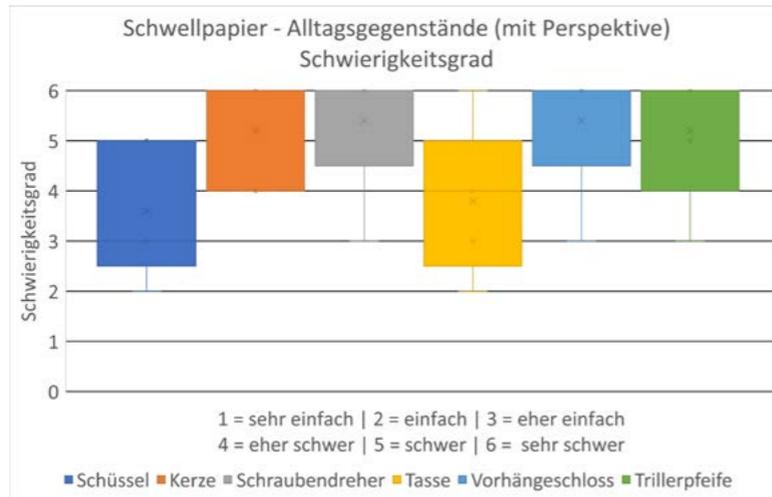
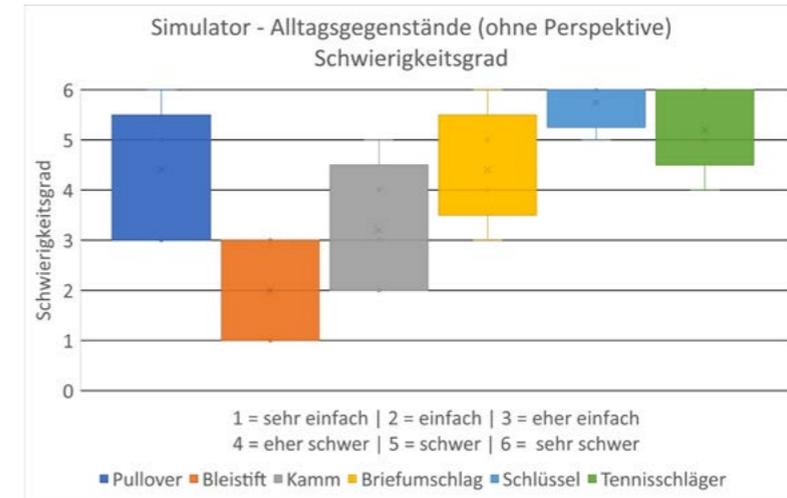
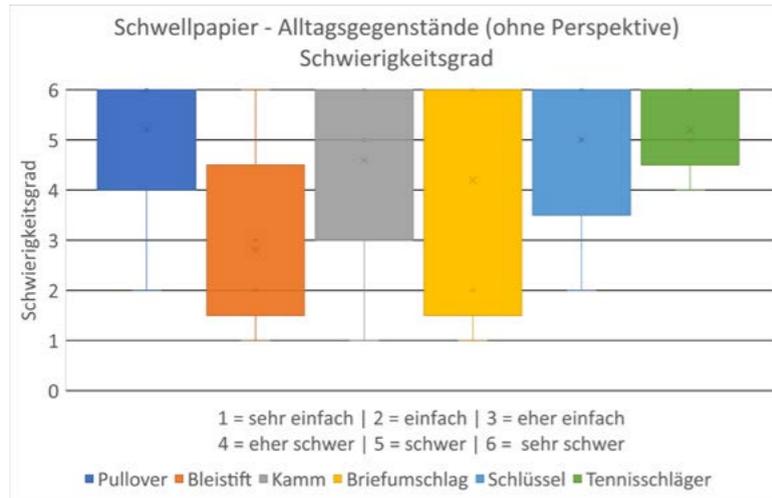


Abbildung 62: Blutkreislauf Heatmap Versuch 2

## 9.2. Diagramme Vergleich zwischen Versuch 1 und Versuch 2







## 9.3. Stimuli Versuch 1 und Versuch 2

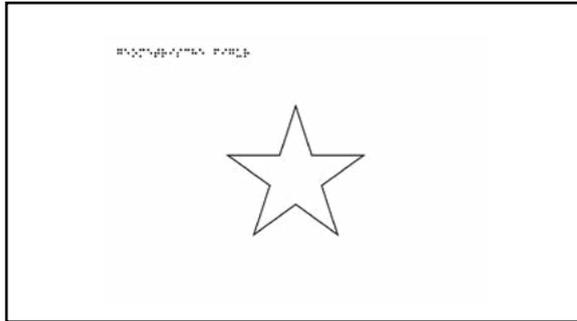


Abbildung 63: Stern Versuch 1

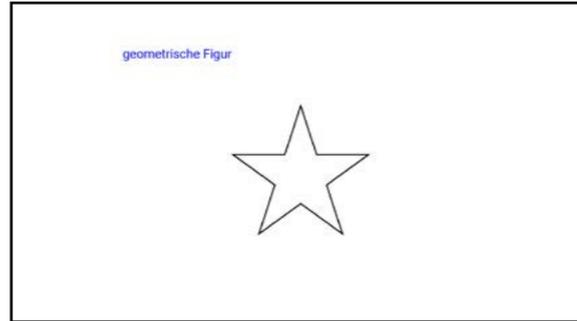


Abbildung 64: Stern Versuch 2

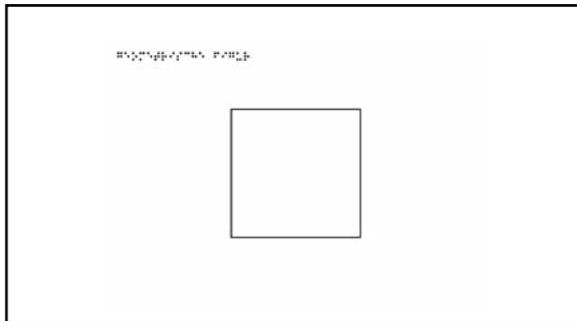


Abbildung 65: Quadrat Versuch 1

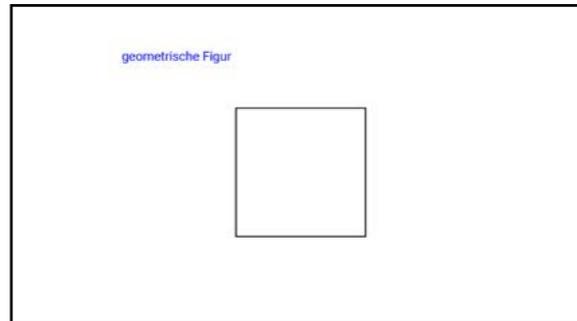


Abbildung 66: Quadrat Versuch 2

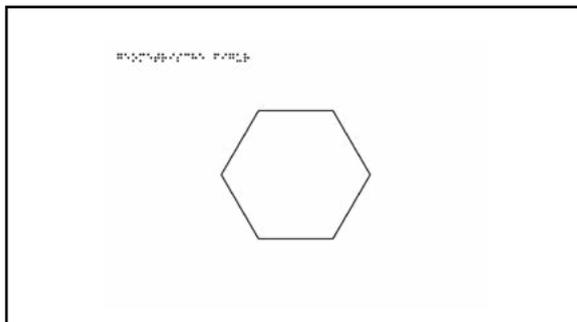


Abbildung 67: Sechseck Versuch 1

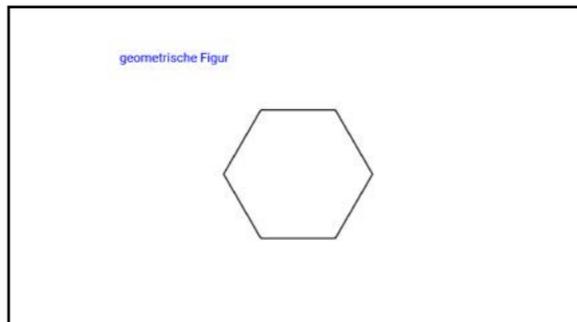


Abbildung 68: Sechseck Versuch 2

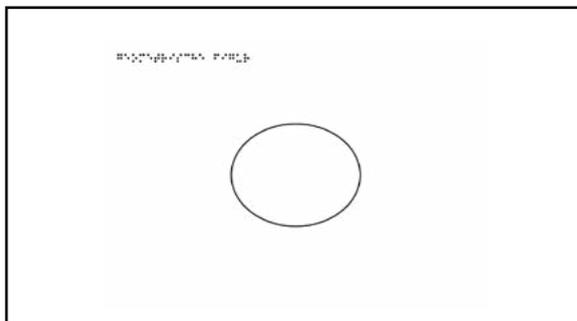


Abbildung 69: Oval Versuch 1

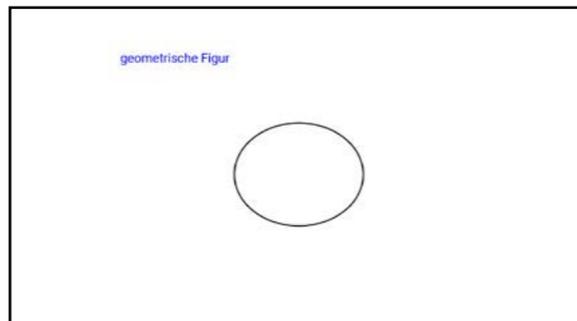


Abbildung 70: Oval Versuch 2

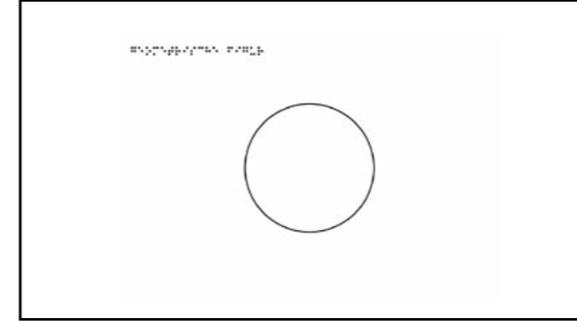


Abbildung 71: Kreis Versuch 1

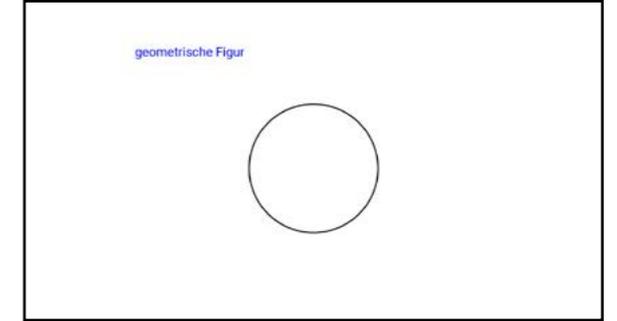


Abbildung 72: Kreis Versuch 2

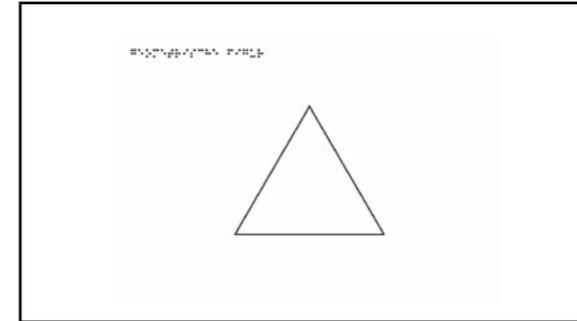


Abbildung 73: Dreieck Versuch 1

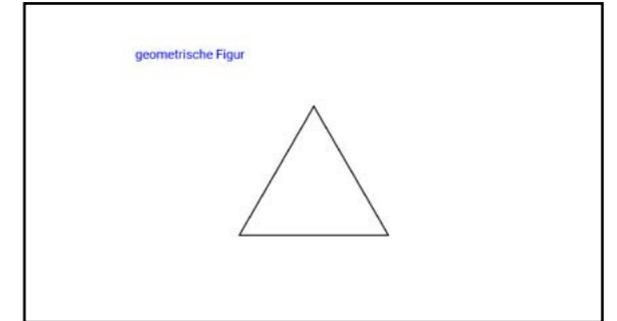


Abbildung 74: Dreieck Versuch 2

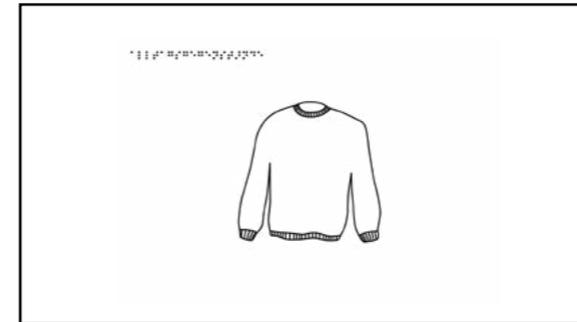


Abbildung 75: Pullover Versuch 1



Abbildung 76: Pullover Versuch 2

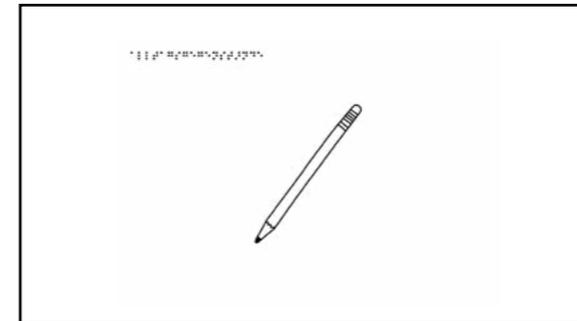


Abbildung 77: Bleistift Versuch 1

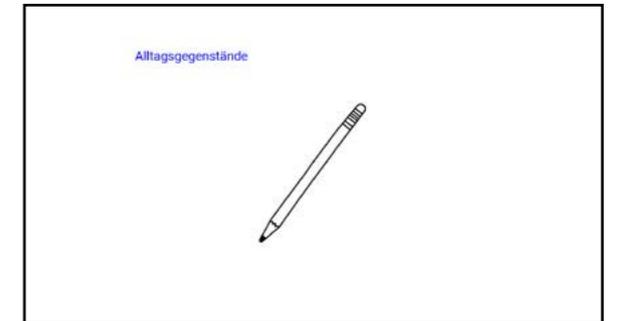


Abbildung 78: Bleistift Versuch 2

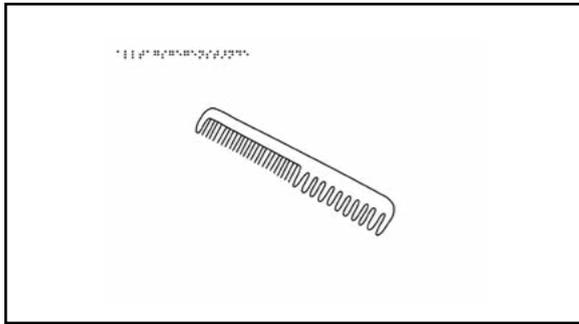


Abbildung 79: Kamm Versuch 1

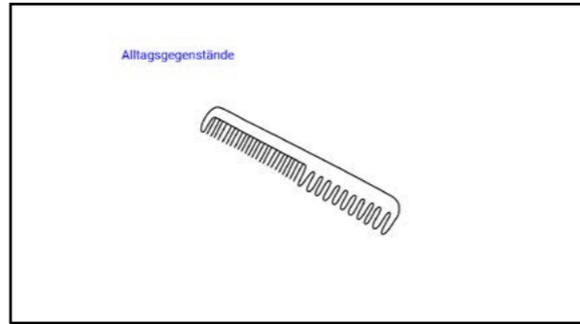


Abbildung 80: Kamm Versuch 2

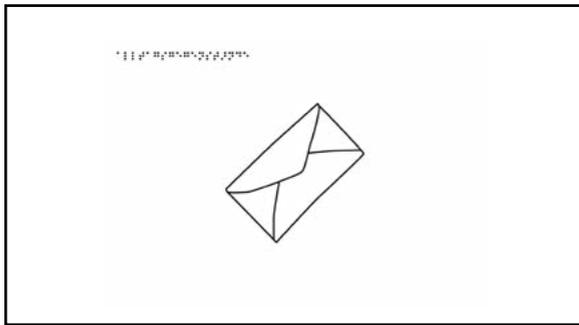


Abbildung 81: Briefumschlag Versuch 1

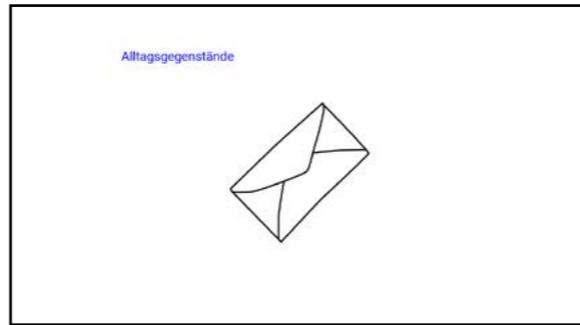


Abbildung 82: Briefumschlag Versuch 2

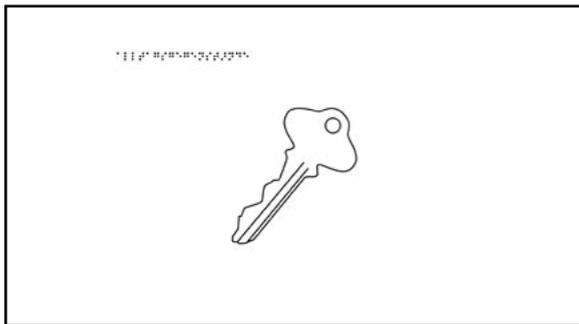


Abbildung 83: Schlüssel Versuch 1



Abbildung 84: Schlüssel Versuch 2

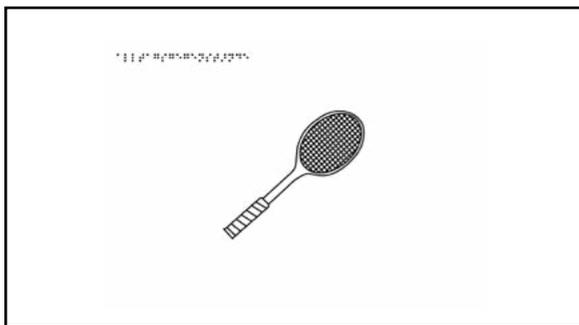


Abbildung 85: Tennisschläger Versuch 1



Abbildung 86: Tennisschläger Versuch 2

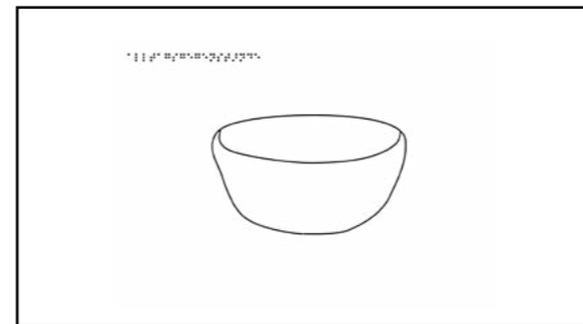


Abbildung 87: Schüssel Versuch 1

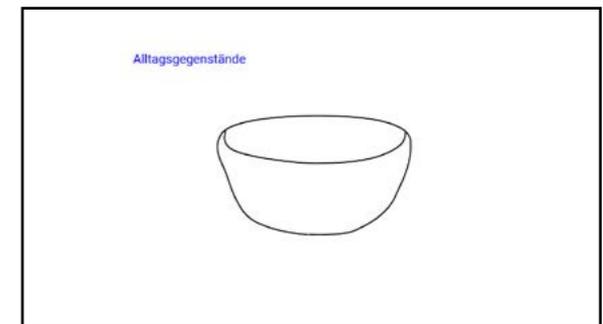


Abbildung 88: Schüssel Versuch 2

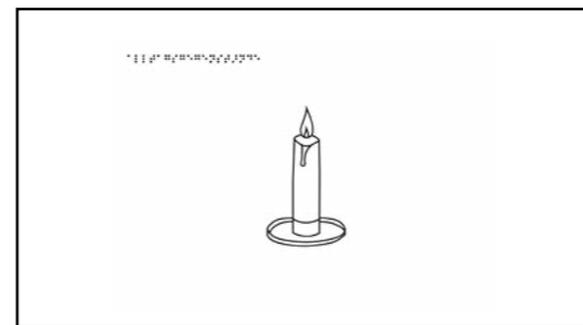


Abbildung 89: Kerze Versuch 1



Abbildung 90: Kerze Versuch 2

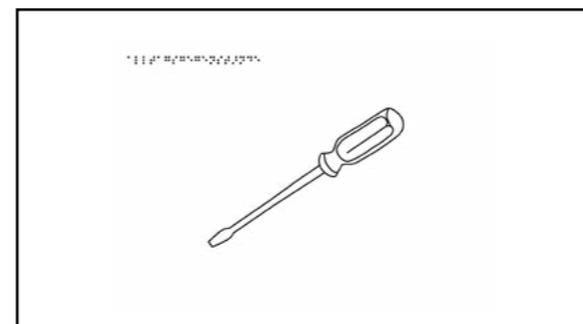


Abbildung 91: Schraubendreher Versuch 1

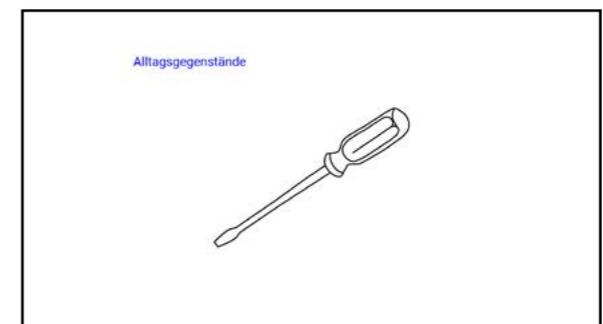


Abbildung 92: Schraubendreher Versuch 2

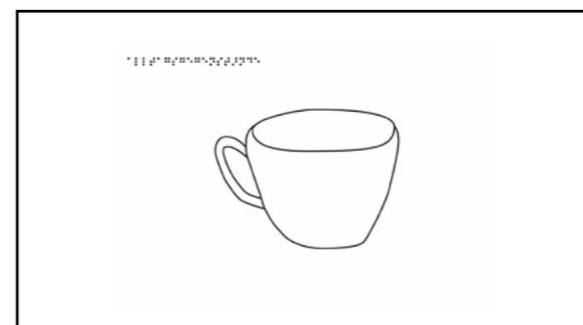


Abbildung 93: Tasse Versuch 1

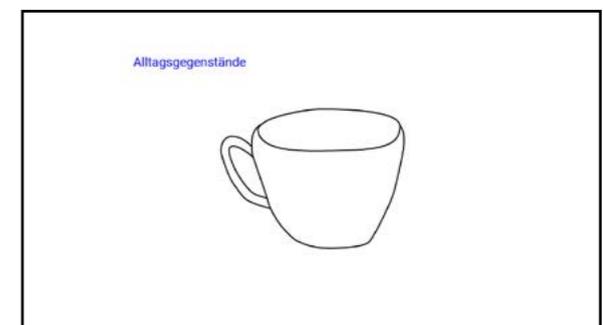


Abbildung 94: Tasse Versuch 2

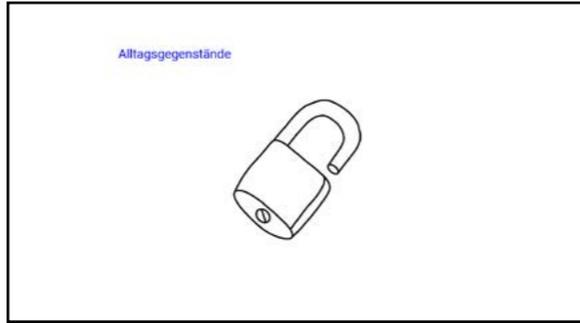
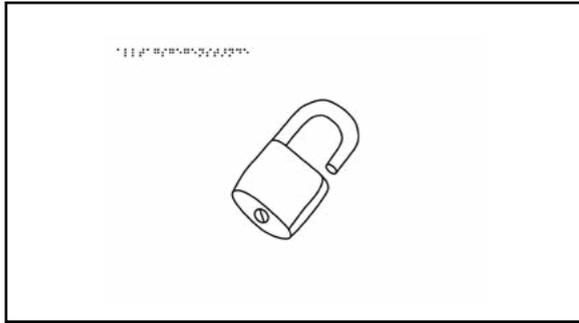


Abbildung 95: Vorhängeschloss Versuch 1

Abbildung 96: Vorhängeschloss Versuch 2

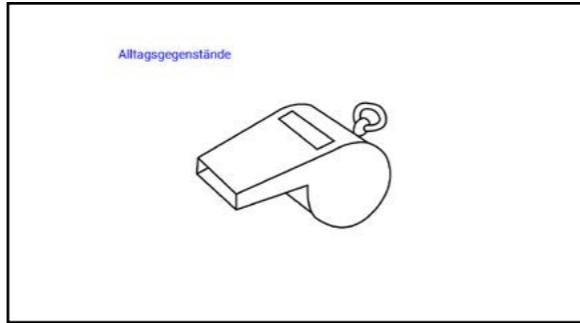
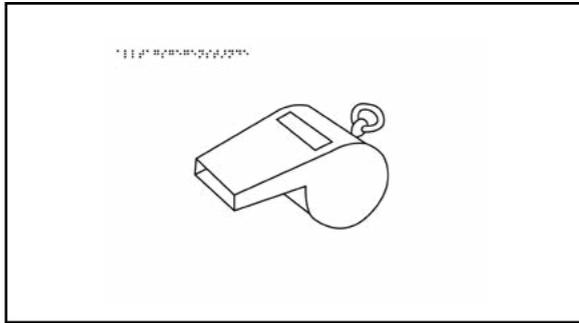


Abbildung 97: Trillerpfeife Versuch 1

Abbildung 98: Trillerpfeife Versuch 2

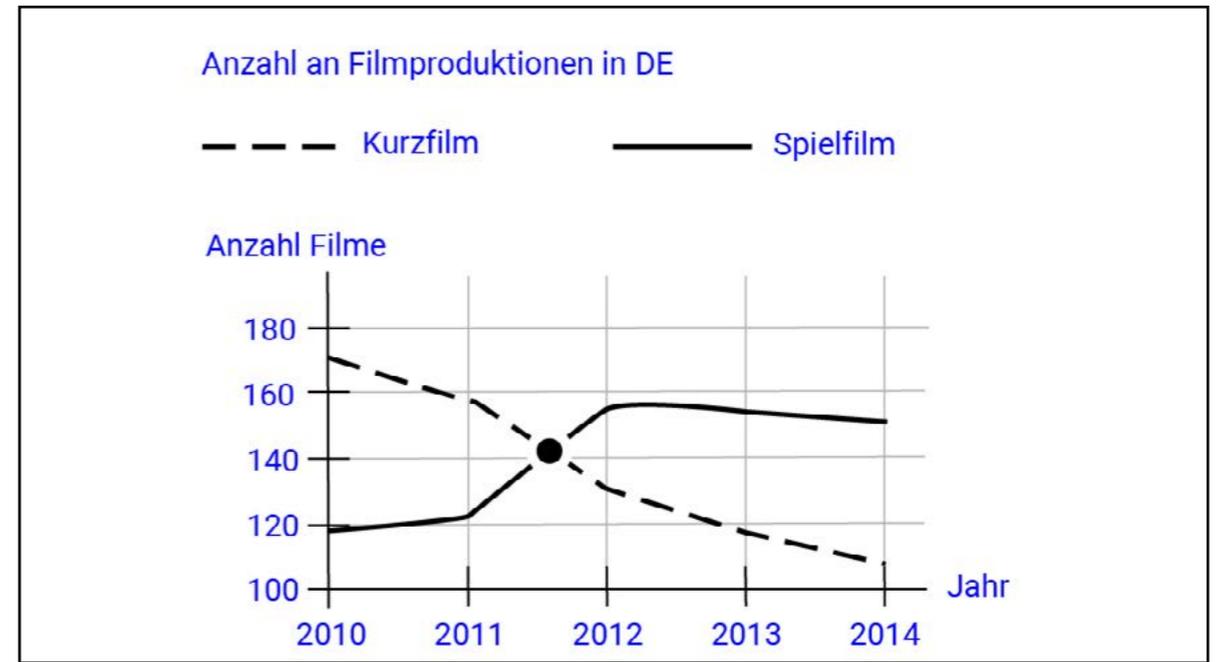


Abbildung 99: Liniendiagramm Versuchch 1

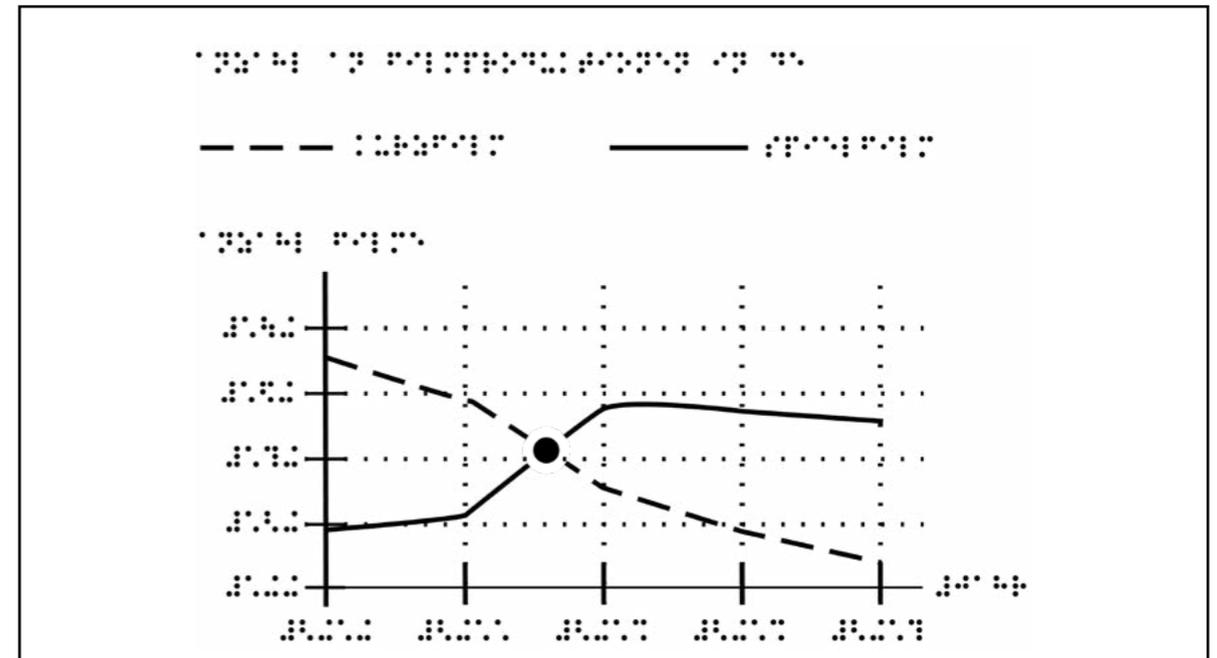


Abbildung 100: Liniendiagramm Versuch 2

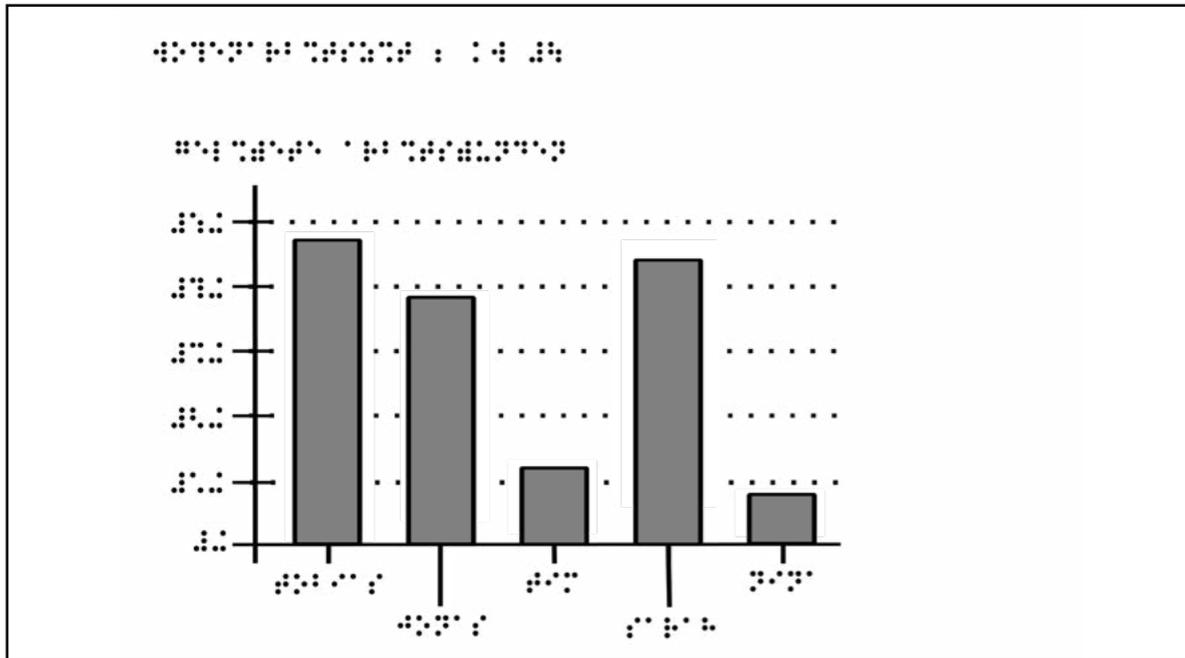


Abbildung 101: Säulendiagramm Versuch 1

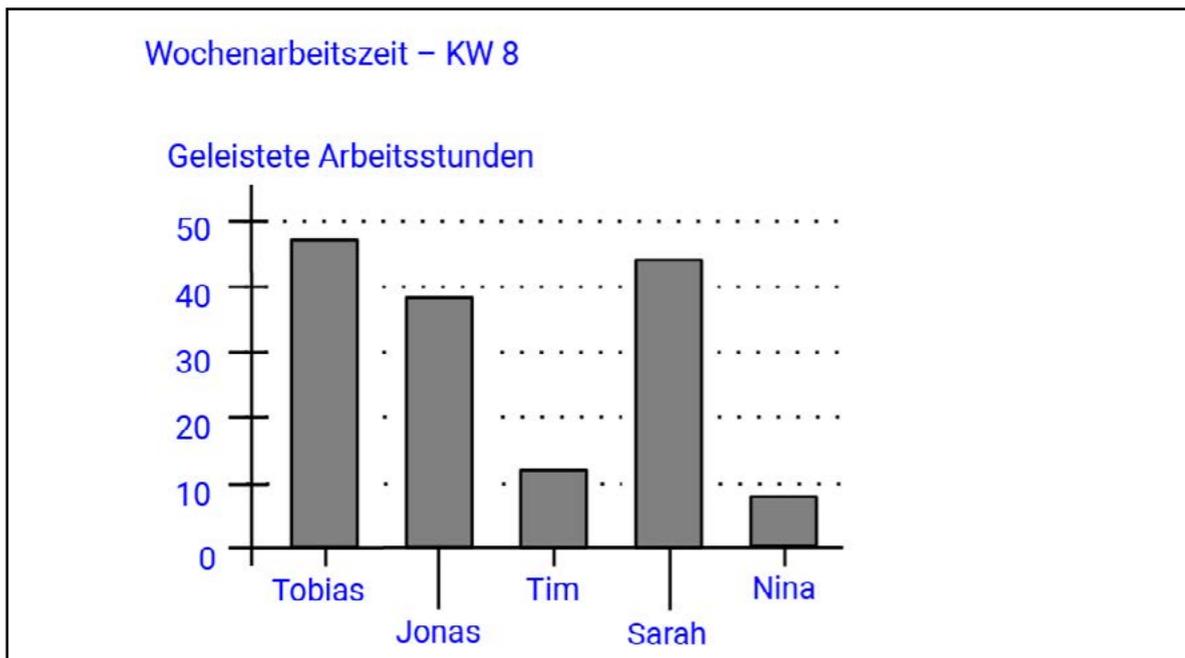


Abbildung 102: Säulendiagramm Versuch 2

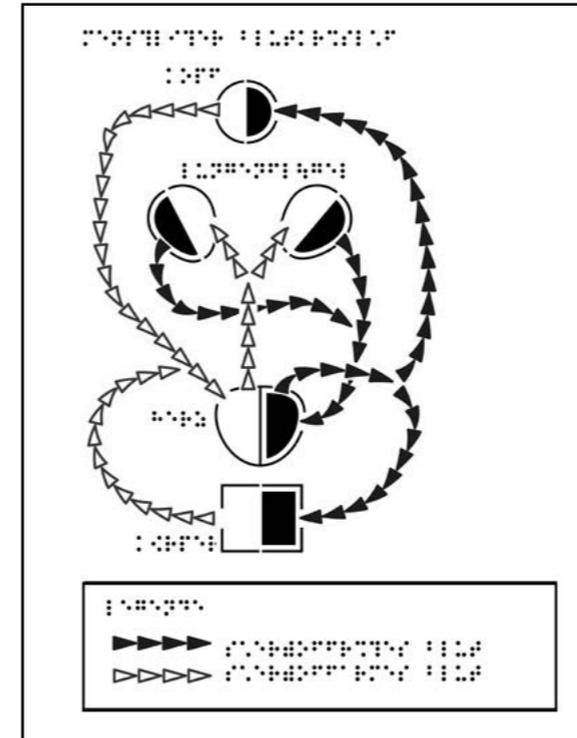


Abbildung 103: Blutkreislauf Versuch 1

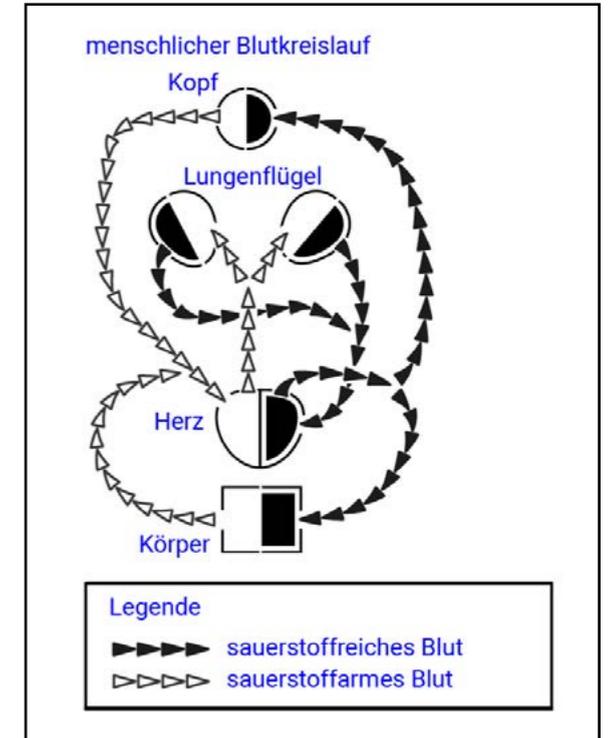


Abbildung 104: Blutkreislauf Versuch 2

**Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und dabei keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach Publikationen anderer Autoren entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder gesamt noch in Teilen einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

.....  
Ort, Datum.....  
Unterschrift

