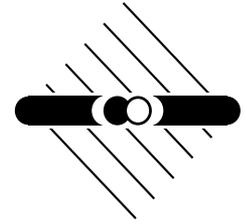




Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
Fakultät für Physik und Astronomie
Max - Planck - Institut für Kernphysik



HD-IHEP98-11
HD-ASIC-42-0998

Aufbau und Test eines taktilen Seh-Ersatzsystems

Thorsten Maucher



ASIC-Labor <http://wwwasic.uni-heidelberg.de>
Schröderstraße 90 D-69120 Heidelberg

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit
im Studiengang Physik
ausgeführt von
Thorsten Maucher
Oktober 1998

Tel: 06221/545607, Fax: 06221/544345
E-Mail: maucher@asic.uni-heidelberg.de
Institut für Hochenergiephysik, ASIC-Labor
Schröderstraße 90, D-69120 Heidelberg

Inhalt

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines elektronischen Seh-Ersatzsystems mit taktiler Ausgabe vorgestellt. Im Vergleich zu früheren Systemen ist es heute möglich, kleine und sehr leistungsfähige Komponenten zu verwenden.

Das vorgestellte System besteht aus einer Kamera, die speziell an die gesetzten Erfordernisse angepasst ist sowie einer taktilen Ausgabeeinheit, mit der über eine virtuelle Tastmatrix das durch verschiedene Bildverarbeitungsalgorithmen vorbereitete Bild als erhabenes Muster dargestellt wird. Der Aufbau der virtuellen Matrix wird detailliert beschrieben und das verwendete Bildverarbeitungskonzept vorgestellt.

Der zur Erprobung des Gerätes entwickelte Test wurde mit 4 sehenden und 6 blinden Personen durchgeführt. Die Auswertung beinhaltet sowohl Ergebnisse bezüglich des Seh-Ersatzsystems als auch Resultate hinsichtlich der Unterschiede bei der taktilen Wahrnehmung beider Gruppen. Mit farblich abgestuften Darstellungen werden die individuellen Strategien beim Abtasten der verschiedenen Figuren veranschaulicht.

Abstract

In this thesis the development of an electronic vision substitution system with tactile output is presented. Compared to earlier systems microelectronics and the high-performance computers enable the use of smaller and more efficient components.

The presented system consists of a camera specifically designed for the requirements of a substitution system and a tactile output unit. The output unit is given by a virtual tactile matrix which converts the picture prepared by different image processing algorithms in a pattern perceivable by touch. A detailed description of the virtual matrix and of the used image processing concept is given.

A test is developed and carried out with 4 seeing and 6 blind persons for studying the performance of the device. The analyses of the test covers results concerning the vision substitution system as well as the differences in tactile perception between the two groups. The individual scanning strategies are extensively illustrated by pseudo coloured plots.

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
1 Stand der Forschung	3
1.1 Bereits realisierte Seh-Ersatzsysteme	3
1.1.1 A tactile Vision Substitution System	3
1.1.2 Ultraschall-Systeme	5
1.1.3 MOVIS	5
1.2 Taktile Displays	7
1.2.1 Das <i>Optacon</i>	7
1.3 Entwicklungen im <i>Vision-Projekt</i>	9
1.3.1 Der pneumatische Ausgabegürtel	9
2 Grundlegende Funktionsweise des Seh-Ersatzsystems	11
2.1 Die Kamera	13
2.2 Funktion des <i>VTD</i>	13
3 Der Aufbau des <i>VTD</i>	17
3.1 Die mechanischen Komponenten	17
3.1.1 Das Grundgerüst	17
3.1.2 Die beweglichen Komponenten	18
3.1.3 Die Aufnahme für die Ausgabeeinheit	19
3.1.4 Die Ausgabematrix	20
3.2 Signalverarbeitung	22
3.2.1 Die Verteilung der Signale	22
3.2.2 Die Verkabelung	23
3.3 Der elektrische Aufbau	25
3.3.1 Stromversorgung	25
3.3.2 Schaltung für den Nullsensor	27
3.3.3 Verteilung der Signale auf dem Mainboard	28
3.4 Software	30
3.4.1 Module der Bildverarbeitung	31
3.4.2 Simulationsmodul <i>Pingpong</i>	33
3.4.3 Ausgabemodul <i>VTD-Out</i>	33

3.4.4	Das Aufzeichnen der Daten	35
3.5	Das Zeitmanagement der Daten	39
4	Einsatz des VTD	41
4.1	Die Fragestellung	41
4.2	Die Methode	42
4.2.1	Der Aufbau des Testverfahrens	42
4.2.2	Die Stichprobe	46
4.2.3	Der Ablauf	47
4.3	Auswertung der Daten	49
4.4	Ergebnisse	53
4.4.1	Übersicht	53
4.5	Ergebnisse in Bezug auf Verwendung des <i>HTVSS</i>	53
4.5.1	Erkennungszeit	53
4.5.2	Vergleich von Größen und diskretisieren einzelner Figuren auf dem <i>VTD</i>	55
4.5.3	Erkennen von Bewegungen	55
4.5.4	Auswirkung der geometrischen Abmessungen der Abtastmatrix	56
4.5.5	Einfluss der Linearführungen auf das Abtasten	58
4.5.6	Auflösungsvermögen des <i>VTD</i>	58
4.5.7	Erkennen unbekannter Figuren	59
4.6	Ergebnisse im Bereich der taktilen Wahrnehmung	60
4.6.1	Begriffsdefinition und Motivation	60
4.6.2	Beobachtungen zur Erkennungszeit	61
4.6.3	Beobachtungen zur Strategie	62
4.6.4	Beobachtung bei wiederholter Darstellung von identischen und kongruenten Figuren	64
4.7	Fehlerbetrachtung	66
4.7.1	Zeitfehler	66
4.7.2	Fehler der Geschwindigkeit	67
4.7.3	Fehler im Ort	68
	Zusammenfassung und Ausblicke	69
A	Technische Daten	73
B	Auswertungsbogen für die Testreihen	75
C	Die Bilder der Testreihen komplet	83
D	Vergleich der Leistungen der Probanden	85
D.1	Antworten der Probanden	85
D.2	Veranschaulichung der Antworten	88
D.3	Die Erkennungszeit	90
D.4	<i>r</i> -Werte	92

E	Abbildungen zur taktilen Wahrnehmung	93
F	Die Weg-Zeit-Plots	103
F.1	Testreihe 2–5	104
F.2	Testreihe 6–8	124
G	Ort-Zeit-Plots	135
G.1	Testreihe 2–5	136
G.2	Testreihe 7–8	158
	Literaturverzeichnis	169
	Abbildungsverzeichnis	172
	Tabellenverzeichnis	175

Einführung

Die Fortschritte in der Bildverarbeitung sowie die rasante Entwicklung der zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten bei immer weiter fortschreitender Miniaturisierung eröffnen vielfältige Möglichkeiten diese Innovationen für ein Seh-Ersatzsystems zu nutzen.

In der bisherigen Forschung wurden schon viele verschiedene konzeptuelle Ansätze verfolgt. Das Gemeinsame an allen Projekten ist, dass¹ versucht wird den Nutzern zusätzlich zu den traditionellen Hilfsmitteln weitere Informationen über die in der näheren Umgebung befindlichen Objekte zu vermitteln. Für die Aufnahme der Umgebungsinformation werden bei den einzelnen Projekten unterschiedliche Technologien verwendet wie Sonar, Laser, GPS² und optische Bildaufnahme. Die einzelnen Entwicklungen verfolgen unterschiedliche Konzepte bei der Benutzerschnittstelle. Zum Weiterleiten der Information wird zum einen der akustische Sinneskanal, z.B. durch Sprachausgabe und zum anderen der taktile Sinneskanal, z.B. durch Vibrationen oder elektrische Reize verwendet.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Seh-Ersatzsystem vorgestellt, bei dem die Informationen über die Umwelt mit einer speziellen, im Rahmen des *Vision-Projekts*³ entwickelten Kamera aufgenommen werden. Durch mehrere Bildverarbeitungsschritte, die von einem tragbaren Computer ausgeführt werden, wird das Bild für die Ausgabe vorbereitet.

Blinde Menschen mit gut ausgeprägtem Gehör nehmen sehr viele Informationen über die Geräusche des Verkehrsflusses auf den Straßen, ihre Schritte oder über die Echos, die der Langstock von einer Mauer reflektiert, auf. Ein Seh-Ersatzsystem sollte diese, für den Blinden wichtige auditive Wahrnehmung nicht durch eine zusätzliche Geräuschkulisse beeinträchtigen oder den akustischen Sinneskanal überfordern. Aus diesem Grund wird für dieses Projekt eine taktile Ausgabe als Benutzerschnittstelle gewählt, in dem das weiterverarbeitete Bild auf einer Fläche mit einzelnen Stiften als Reliefbild dargestellt wird. Die Abtastfläche wird durch eine virtuelle Matrix repräsentiert, d.h. dass jeweils nur die Teile des Bildes angezeigt werden, an denen sich der Benutzer beim Abtasten befindet.

Bei der Entwicklung der virtuellen Matrix und der anschließenden Erprobung hat sich gezeigt, dass mit Hilfe des Systems weiterführende Untersuchungen zur taktilen Wahrnehmung vorgenommen werden können. Die festgestellten Differenzen in der taktilen Wahrnehmung bei sehenden und blinden Personen wurden herausgearbeitet und analysiert.

¹Die Arbeit ist nach den Regeln der „neuen“ Rechtschreibung verfasst.

²Global Positioning (satellite) System

³Das *Vision-Projekt* wird unterstützt durch das Forschungsförderungsprogramm des Landes Baden-Württemberg.

Kapitel 1

Stand der Forschung

1.1 Bereits realisierte Seh-Ersatzsysteme

1.1.1 A tactile Vision Substitution System

In den 70-er Jahren ist von Bach-y-Rita und seinen Mitarbeitern in San Francisco ein System entwickelt worden, das blinden Personen die Orientierung im Raum ermöglichen sollte [Bach-y-Rita 69, Bach-y-Rita 71, Bach-y-Rita 95]. Sie entwickelten einen Versuchsaufbau, bei dem das Bild verschiedener Gegenstände mit einer TV-Kamera¹ aufgenommen wird, um anschließend auf unterschiedlichen Ausgabegeräten über mechanische bzw. elektrische Reize auf die Haut der Probanden übertragen zu werden.

Für die Ausgabe - auf der Basis von mechanischen Reizen - ist eine Matrix von 20×20 elektromechanisch angetriebenen Aktuatoren, die im Abstand von 12.5 mm angeordnet sind aufgebaut. Die Bildinformation wird durch Vibration von Teflonstäbchen mit ca. 1 mm Länge und 1.2 mm Durchmesser auf den Rücken der Probanden übertragen. Aus anatomischen Gründen muss die Matrix in 4 Blöcke mit je 100 Pixel aufgeteilt werden, die aus Stabilitätsgründen auf die Rückseite eines Zahnarztstuhles montiert wurden (vgl. Abbildung 1.1).

Um ein mobiles System zu erhalten, wurde in einer zweiten Versuchsreihe eine Matrix von 256 Silberelektroden, die im Abstand von 1.25 mm angeordnet sind und eine Ausgabematrix von $16 \times 16 \text{ Pixel}^2$ bilden (vgl. Abbildung 1.1), entwickelt. Die Bildinformation wurde über elektrische Reize übertragen, wobei mit einer Regelschaltung das Tastverhältnis und die Stromstärke der einzelnen elektrischen Stimuli variiert werden konnten.

Bei der Transformation der Bildinformation auf die Ausgabematrix unterschieden sich die mechanische und die elektrische Ausgabe deutlich. So zeigte sich, dass es nicht möglich ist, Bilder von Gegenständen wiederzuerkennen, wenn bei der Ausgabe die Vibrationsfrequenz mit dem Grauwert des entsprechenden Bildpunktes modelliert wird. Erst nach einer Binarisierung, d.h. die Grauwerte, die über einem einstellbaren Binarisierungslevel liegen, sind logisch „high“, die anderen entsprechend „low“, ist es den Probanden möglich, die entsprechende Figuren wieder

¹Der aktuelle Begriff ist Videokamera.

²Ein Pixel (picture element) bezeichnet jeweils einen Punkt des Gesamtbildes.

zu erkennen [Bach-y-Rita 71]. Das binarisierte Bild wird dargestellt indem, alle Pixel, die „high“ sind, mit einer Frequenz von 60 Hz vibrieren, so dass der Proband den Gegenstand als Reliefbild auf dem Rücken spürt.

Bei der Ausgabe mit elektrischen Stimuli beschreibt Bach-y-Rita [Bach-y-Rita 72], dass es möglich ist, 16 Grauwertstufen durch Veränderung der Signalform und der Stromstärke des elektrischen Reizes darzustellen. Er verwendet dabei Reize mit einer konstanten Stromstärke von 0.5 – 10 mA und einer Reizdauer von 1 – 500 μ s. Nach seinen Angaben werden die Stimuli bei dieser geringen Stromstärke von den Probanden noch nicht als schmerzhaft bzw. unangenehm empfunden [Collins 71].

Das Ziel der Arbeitsgruppe war nicht nur, ein mobiles Seh-Ersatzsystem aufzubauen, sondern das System sollte zusätzlich noch der Erforschung der Plastizität des Gehirns dienen. Bach-y-Rita wollte beweisen, dass es möglich ist, bei Ausfall des visuellen Sinneskanals dessen Kapazität über die haptische Wahrnehmung zu nutzen. Er versuchte, durch kontinuierliches Training blinden Probanden die Möglichkeit zu geben, für die Wahrnehmung der taktil dargebotenen Figuren eine ähnliche Wahrnehmungsstrategie zu entwickeln, wie es Sehende von Kindheit an durch Training ihres visuellen Sinneskanals erreichen. Es zeigte sich, dass es nach einer Trainingszeit von 40 bis 160 Stunden den Versuchspersonen möglich ist, Gegenstände, die sie während der Trainingsphase kennengelernt haben, in einem Zeitrahmen wieder zu erkennen, der etwa der Größenordnung der Vergleichsgruppe entspricht. Die Aufgabe der Vergleichsgruppe bestand darin, dieselben Gegenstände, die mit der TV-Kamera aufgenommen wurden, auf einem Monitorbild wieder zu erkennen, das auf die Auflösung der Ausgabematrix reduziert wurde.

Leider ist es nicht möglich, durch die Arbeiten von Bach-y-Rita Rückschlüsse auf die Schwierigkeit des Erkennens verschiedener Muster zu ziehen, da die von ihm verwendeten Gegenstände nicht ohne Probleme zu katalogisieren bzw. zu reproduzieren sind.

Der Vergleich der Ergebnisse mit den Gegebenheiten im mobilen Einsatz ist sehr schwer, da Bach-y-Rita zwar behauptet, dass seine Versuchspersonen die Figuren auch dann noch erkennen können, wenn sie durch eine andere Kameraeinstellung oder durch Okklusion verändert dargestellt werden, doch leider liegen keine Daten vor, in welcher Zeitspanne das Wiedererkennen von Figuren, die nicht in der Standardeinstellung dargeboten worden sind, erfolgte.

Für die Verwendung als mobiles TVSS³ ist der Aufbau, wie Abbildung 1.1 unschwer erkennen lässt, nicht geeignet. Der elektromechanische Antrieb macht es notwendig, einen geeigneten Stuhl, der den Vibrationen genügend Widerstand bietet, mitzuführen. Ebenso ist es nicht möglich, bedingt durch die hohe Leistungsaufnahme der Spulen, das Gerät netzunabhängig zu betreiben. Über die Erfahrungen mit der Ausgabematrix, die als Reiz einen elektrischen Stimulus benutzt, ist leider in den Arbeiten nichts erwähnt.

Um 1970 war es den Technikern der Gruppe um Bach-y-Rita auch nicht möglich, das System weiter zu vereinfachen oder aufwendige Bildverarbeitungsschritte zu implementieren, da die Entwicklung der Elektronik bei weitem noch nicht so fortgeschritten war. Man bedenke, dass der erste Transistor erst 1948 erfunden und die ersten integrierten Schaltkreise 1968 vermarktet wurden.

³Tactile Vision Substitution System

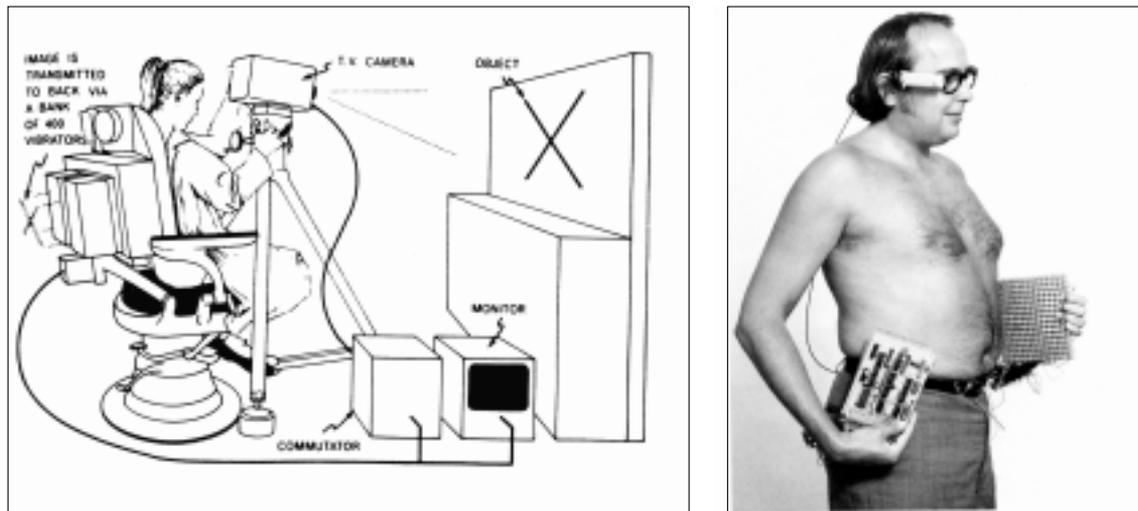


Abbildung 1.1: links: Skizze des TVSS mit mechanischer Ausgabe (entnommen aus [Craig 82]).

rechts: Abbildung des TVSS mit der Matrix aus 16×16 Elektroden als mobiler Aufbau (entnommen aus [Bach-y-Rita 72]).

1.1.2 Ultraschall-Systeme

Die zur Zeit im Handel erhältlichen Orientierungs-Hilfs-Systeme, die auch unter dem Schlagwort ETA⁴ bekannt sind, basieren ausschließlich auf Ultraschallortung von Hindernissen und übertragen deren Entfernung akustisch oder taktile mittels Vibratoren. Ein komplexes Abbild der Umgebung liefert nur der *Sonic Guide* und dessen Weiterentwicklung der *Sonic Pathfinder* (siehe Abbildung 1.2), welcher über zwei Ultraschallsysteme räumliche Informationen durch ein stereophones Klangbild vermittelt [Koy-Oberthür 87]. Beim *Sonic Guide* wird das von den beiden Ultraschallempfängern aufgenommene Signal in hörbare Frequenzen umgewandelt und dem Benutzer mittels in die Brille eingebauter Kopfhörer vermittelt.

Beim *Sonic Pathfinder*, der am Blind Mobility Research Unit der Nottingham University in England entwickelt wurde, wird mit Hilfe eines Mikroprozessors das stereophone Klangbild ausgewertet und der Benutzer erhält nur kurze, in Töne konvertierte Informationen. In erster Linie sollen die so gewonnenen Informationen dazu dienen, den Benutzer vor Hindernissen zu warnen. Der *Sonic Pathfinder* ist somit als ergänzendes Hilfsmittel zum Langstock und/oder Blindenhund konzipiert.

1.1.3 MOVIS

Das MOVIS ("Mobiles Optoelektronisches Visuell Interpretatives System") ist eine Navigationshilfe für Blinde, die im gleichnamigen Projekt MOVIS, derzeit als Kooperation zwischen dem

⁴Elektronic Travel Aid



Abbildung 1.2: Das Bild zeigt die Entwicklungen bei den Sonargeräten (entnommen aus [Sonic 98]).

oben links: den *Sonic Guide*

unten links: die Weiterentwicklung des *Sonic Guide*

rechts: die neueste Entwicklung, der *Sonic Pathfinder*

LKI⁵ der Uni Hamburg und der TU Harburg, entwickelt wird.

Das MOVIS-Vorhaben umfasste in seiner ursprünglichen Form drei Funktionen:

- Freiwegfinder
- Landmarkenfinder
- Zeichenleser.

Nach Reduzierung des Projektumfanges sollte die MOVIS-Realisierung eine Landmarken-Suchhilfe sein [MOVIS 95]. Landmarken sind charakteristische Ansichten von Orten, die die blinden Personen für ihre Navigation brauchten. Beispiele hierfür sind Haltestellen, Bahnhöfe, Wegkreuzungen usw.

Für die Ausgabe soll beim MOVIS eine sogenannte sprechende Brille zum Einsatz kommen. Die Stereoaufnahmen von zwei Kameras werden in einem tragbaren Rechner weiterverarbeitet und das Ergebnis anschließend mit Hilfe einer Sprachausgabe dem Träger mitgeteilt.

⁵Labor für Künstliche Intelligenz

Das Projekt ist seit 1995 in der Entwicklung und soll zur *expo2000* (siehe Abbildung 1.3) in Hannover vorgestellt werden [expo2000].

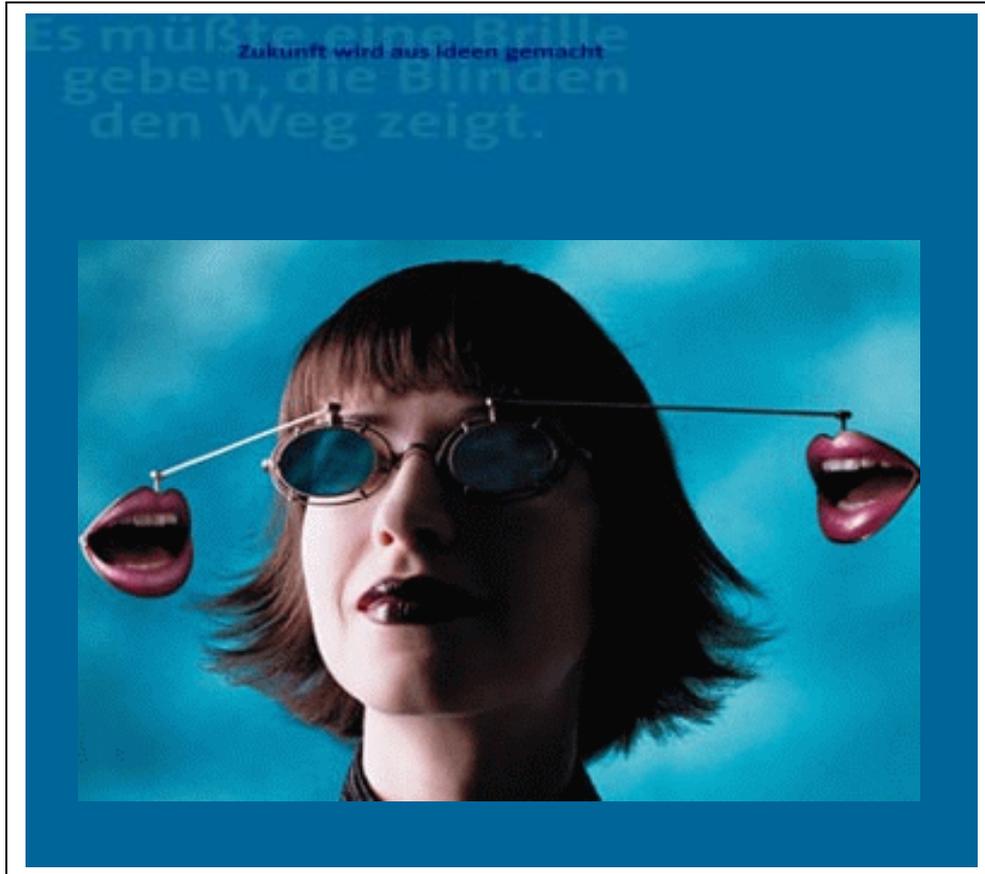


Abbildung 1.3: Vorstellung des MOVIS-Projektes in der *expo2000* (entnommen aus [expo2000]).

1.2 Taktile Displays

1.2.1 Das *Optacon*

Das *Optacon*⁶ gehört zu den klassischen, dynamischen, taktilen Displays. Es wurde von Bliss um 1968 entwickelt, um blinden Personen die Möglichkeit zu geben gedruckte Texte zu lesen, ohne Umweg über die Umkodierung in Brailleschrift. Es besteht aus einem kleinen Handsensor mit 144 Photodioden und einer 6×24 großen Ausgabematrix, die mit ihrer Abmessung von $1.1 \times 2.7 \text{ mm}$ ungefähr die Fläche der Fingerkuppe einnimmt (vgl. Abbildung 1.4). Die 144

⁶*Optacon*: optical-to tactile conversion

einzelnen Stäbchen werden von den entsprechenden 144 Photodioden gesteuert und vibrieren bei Ansteuerung mit etwa 200 Hz. Beim Lesen wird der Sensor von Hand über die zu lesende Zeile geführt, wobei die schwarzen Buchstaben durch das Vibrieren der Stäbchen der Tastmatrix mit dem Finger der anderen Hand zu erkennen sind.

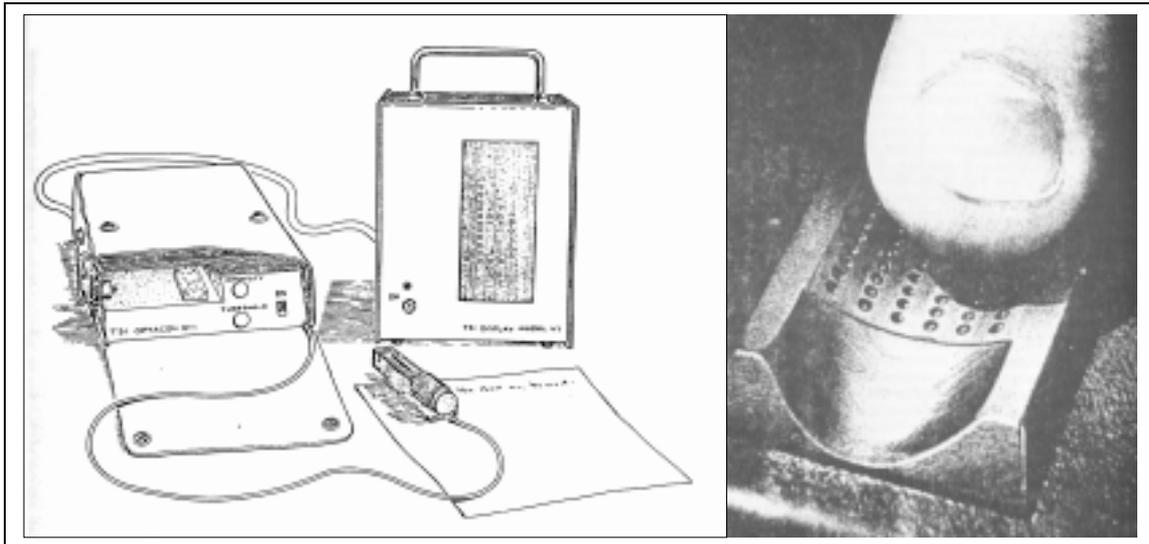


Abbildung 1.4: links: Die Skizze des *Optacon* mit Handsensor und optischer Ausgabe. rechts: Großaufnahme des Tastfeldes des *Optacons* (entnommen aus [Craig 82]).

Nach neun Tagen Training ist es den Benutzern möglich mit einer Geschwindigkeit von 10–12 wmp⁷ gedruckte Texte zu lesen. Geübte *Optacon*-Leser sollen 30 bis 50 wpm erreichen. Dies entspricht etwa 50 % der Lesegeschwindigkeit eines geübten Brailleschriftlesers [Craig 82, Kosa 95]. Zum Vergleich: „Ein geübter sehender Leser“ kann „ca. 250 bis 300 Worte pro Minute leise lesen“ [Perfetti 85].

Bach-y-Rita entwickelte mit Hilfe der Ausgabetechnik des *Optacons* ein leichtes, tragbares Seh-Ersatzsystem, in dem die Bildaufnahme durch eine kleine auf einem Helm befestigte Kamera erfolgt und das aufgenommene Bild in einem Rechner zwischengespeichert wird. Für die Ausgabe wird dieses Bild binarisiert und anschließend die schwarzen Pixel als Vibrationen der entsprechenden Stifte des *Optacons* zeilenweise ausgegeben, so dass die Benutzer keinen Einfluss darauf hatten, wann welcher Teil des Bildes ausgegeben wird. Die Arbeitsgruppe weist darauf hin, dass die Probanden mit dem modifizierten *Optacon* zu ähnlichen Ergebnissen gelangen wie mit dem schon angesprochenen TVSS [Bach-y-Rita 84].

⁷wpm: words per minute, wobei die Wörter im Durchschnitt 5,5 Buchstaben besitzen.

1.3 Entwicklungen im *Vision-Projekt*

1.3.1 Der pneumatische Ausgabegürtel

Im *Vision-Projekt* ist in der ersten Phase bei der Entwicklung eines taktilen Ausgabegerätes ein pneumatischer Ausgabegürtel⁸ entwickelt worden. Der von R. Jeschke [Jeschke 96] entwickelte Gürtel besteht aus 64 in einer 8×8 Matrix angebrachten einzeln ansteuerbaren Stimulatoren. Durch die zwischen Schaumstoff und Bauch auströmende Luft wird ein lokaler Überdruck erzeugt, der als taktiler Stimulus wahrgenommen wird (vgl. Abbildung 1.5).

Die Gesamtmatrix deckt ein Areal von $15 \times 15 \text{ cm}$ ab, wobei das System durch die aufwendige Pneumatik 20 cm aufträgt. Dieses System ermöglicht es, 60 Bilder pro Minute anzuzeigen, wobei die Bilddarstellung zeilenweise erfolgt.

Zur Bildaufnahme dient ein Vorläufer, der in Kapitel 2.1 näher beschriebenen Kamera (siehe auch [Schemmel 97]). Jedoch mit dem Unterschied, dass die Kamera ein adaptives Verhalten aufweist, d.h. die Pixel reagieren nur auf Änderungen der Lichtintensität somit führen statische Bilder nicht zu einem Ansprechen der Pixel.

Das System wird nicht weiterverfolgt, da es sich gezeigt hat, dass es nicht möglich ist den pneumatischen Aufbau so zu verändern, dass eine Akzeptanz bei den Benutzern zu erwarten gewesen wäre, zudem benötigt der Aufbau in der vorliegenden Implementation mehr als 15l Druckluft pro Minute. Das Kamerakzept mit den adaptiven Pixeln erwies sich für dieses Projekt als nicht optimal. Da sich zum einen der Benutzer mitbewegt, was eine kontinuierliche Änderung der Lichtintensität zur Folge hat und zum anderen ist es selbst dem sehenden Beobachter sehr schwer möglich die Ausgabe der Kamera zu interpretieren.

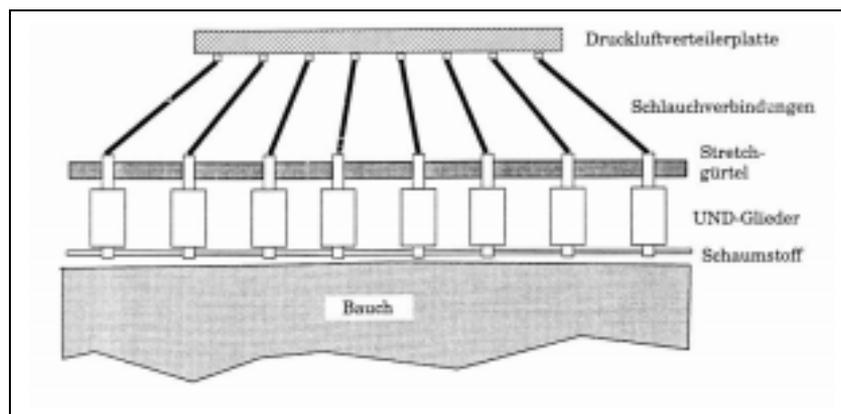


Abbildung 1.5: Nicht maßstäbliche Skizze des pneumatischen Ausgabegürtels. Mit den UND-Gliedern wird mit Hilfe von Pressluft ein taktiler Reiz auf den Bauch des Benutzers gegeben (entnommen aus [Jeschke 96]).

⁸In der Arbeit von R. Jeschke wird auch der Name Stimulatorgürtel verwendet.

Kapitel 2

Grundlegende Funktionsweise des Seh-Ersatzsystems

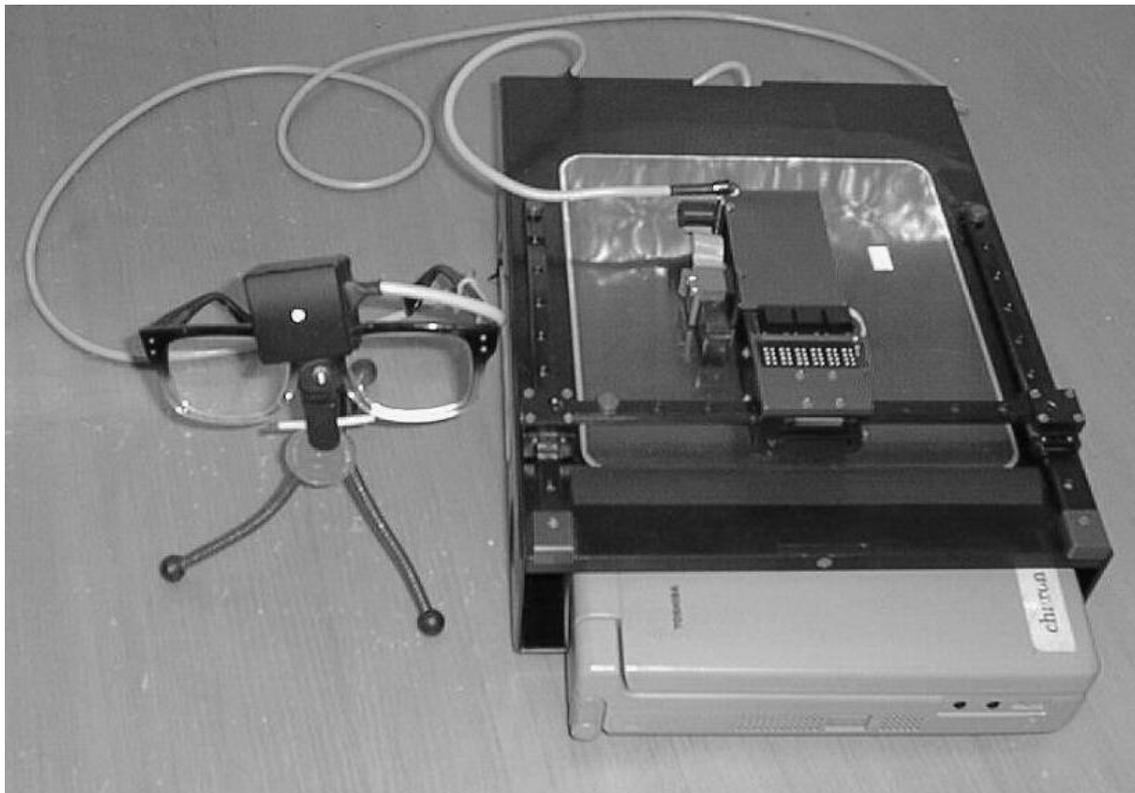


Abbildung 2.1: Das *HTVSS* als Gesamtsystem. Man erkennt das Notebook, welches in das *VTD* eingeschoben wurde, links im Bild die auf eine Brille montierte Kamera.

Die Abbildung 2.1 zeigt das komplette Sehersatzsystem mit dem Namen *HTVSS*¹. Der Name orientiert sich an die Arbeiten von [Bach-y-Rita 69], er soll ausdrücken, dass es sich wie damals erst um einen Vorläufer eines Prototypen für eine elektronische Orientierungshilfe handelt. Wie aus Abbildung 2.2 ersichtlich ist, besteht das *HTVSS* aus zwei Hauptbestandteilen.

- Bildaufnahme
- Bildverarbeitung und -ausgabe

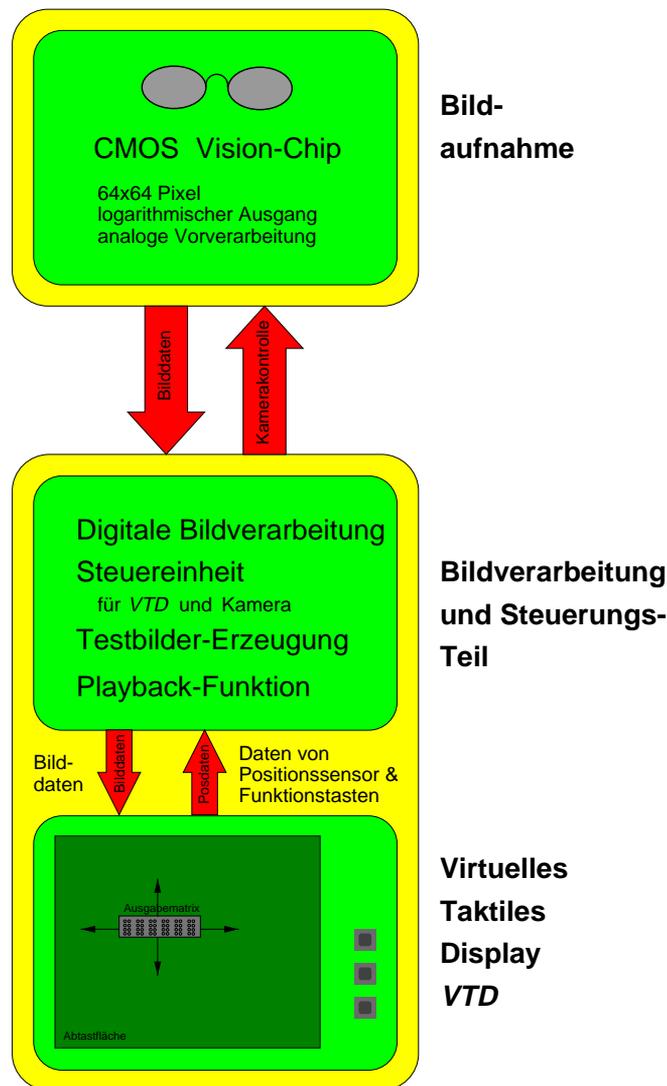


Abbildung 2.2: Das VTD und seine Funktionselemente

¹HTVSS steht für Heidelberg Tactile Vision Substitution System.

In den folgenden Abschnitten wird kurz auf die Funktion der Kamera, welche die Bildaufnahme übernimmt und auf das *VTD*², das den zweitenteil des *HTVSS* beinhaltet, eingegangen.

2.1 Die Kamera

Für das Projekt wird eine von M. Loose [Loose 98] im ASIC-Labor in Heidelberg für das *Vision-Projekt* entwickelte CMOS³-Kamera eingesetzt. Durch den Aufbau der Kamera in CMOS-Technologie wird ein Dynamikbereich von ca. sechs Dekaden erreicht. Der Dynamikbereich von ungefähr sechs Dekaden ermöglicht Bildaufnahmen in einem Helligkeitsbereich, in dem man auch als normal Sehender noch Gegenstände erkennen könnte. Zum Vergleich, zwischen der Solarkonstante (10^3 W/m^2) und der durchschnittlichen Lichtintensität bei Mondschein (10^{-3} W/m^2) liegen genau sechs Dekaden. Zu den lichtsensitiven Elementen kann zusätzlich noch weitere Elektronik auf den Kamera-Chip integriert werden. Die Kamera besitzt als zusätzlich Elektronik „on Chip“ eine Komprimierung des Ausgangsspannungshubs durch einen Verstärker, der das zur Lichtintensität proportionale Signal der Fotodioden logarithmiert und verstärkt. Eine interne Kalibrierung sorgt für eine Reduzierung des „fixed pattern noise“⁴ und eine automatische Blenden-Regelung gleicht den ausgegebenen Grauwertbereich den Lichtverhältnissen an.

Der große Dynamikbereich ist ausschlaggebend für die Verwendung dieser Kamera im *HTVSS*. Sie erlaubt (wie Abbildung 2.3 zeigt), Bildaufnahmen in dem natürlichen Helligkeitsbereichen in dem wir uns bewegen. Durch die automatische Blendenregelung werden zudem keine zusätzlichen mechanischen Bauteile benötigt. Die kompakte Bauform erlaubt es, die Kamera auf einem handelsüblichen Brillengestell zu befestigen. Mit einer Auflösung von 64×64 Pixeln ist die Kamera allerdings noch ein Prototyp.

Für die Optik wird eine Linse mit einer Brennweite von $f = 5 \text{ mm}$ und einem Durchmesser von $d = 5 \text{ mm}$ verwendet. Durch die Größe der lichtempfindlichen Chipfläche von $2.1 \times 2.1 \text{ mm}$ ergibt sich ein Raumwinkel Ω von $\Omega = 0.176 \text{ sr}$ und daraus ein Öffnungswinkel θ von $\theta = 27.2^\circ$. Das gesunde menschliche Auge hat im Vergleich dazu ein binokulares⁵ Deckungsfeld von $\approx 120^\circ$ und einen Gesamtöffnungswinkel in horizontaler Richtung von 180° . Um bei einem 170 cm großen Benutzer im Abstand von 1 m den Fußboden abzubilden, muss die Kamera in einem Winkel von 78° zum Lot angebracht werden.

Das zukünftige Kamerakonzept sieht zu den obengenannten Optionen noch einen wahlfreien Zugriff auf beliebige Pixelbereiche und die Mittelung über mehrerer Pixel vor.

2.2 Funktion des *VTD*

Das *VTD* bildet das Ausgabegerät für das im *Vision-Projekt* entwickelte *HTVSS*. Die Funktion des *VTD* gliedert sich wie in Abbildung 2.2 ersichtlich in zwei Teilbereiche:

²Virtual Tactile Display

³Complementary Metal-Oxid-Semiconductor technology

⁴Als fixed pattern noise bezeichnet man die Konstante, durch das mismatching der in der CMOS-Technologie benutzten Transistoren erzeugten Grauwertverteilung, bei homogener Beleuchtung.

⁵Binokular bedeutet mit beiden Augen,

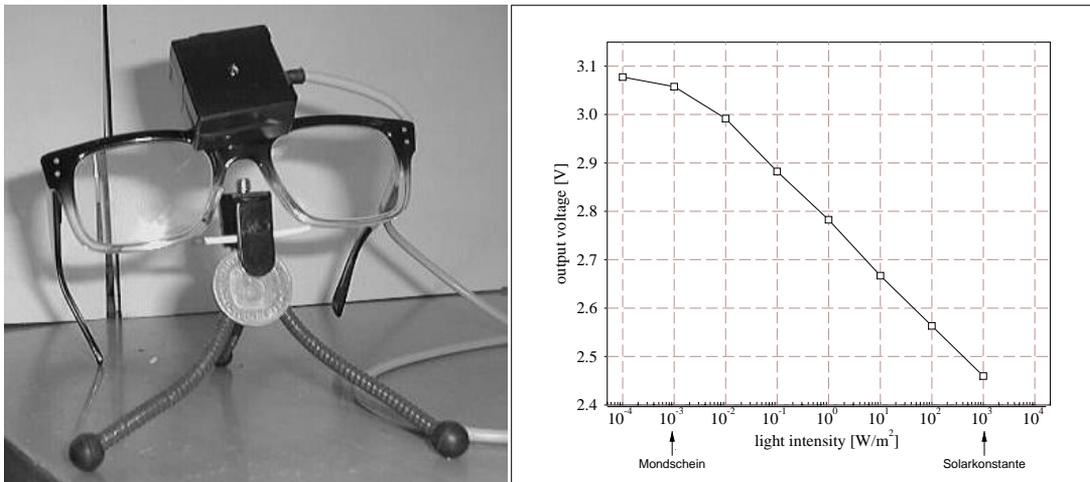


Abbildung 2.3: links: Der Kamera-Chip im Gehäuse auf das Brillengestell montiert. rechts: Das logarithmische Antwortverhalten eines Pixels (entnommen aus [Loose 98]).

- Bildverarbeitung
- Bildausgabe

Das von der Kamera aufgenommene Bild wird im Bildverarbeitungsteil weiterverarbeitet. Durch Algorithmen der digitalen Bildverarbeitung wie Kantendetektion, Rauschfilterung und Binarisierung wird das Bild für die Ausgabe auf dem *VTD* vorbereitet.

Das durch Bildverarbeitungsschritte vorbereitete Bild wird auf dem *VTD* als Reliefbild auf einer virtuellen Matrix ausgegeben. Unter einem Reliefbild muss man sich ein aus schwarzen und weißen Pixeln bestehendes Bild vorstellen, bei dem alle weißen Pixel mit Hilfe von kleinen Pins (sogenannten Dots) leicht erhaben dargestellt werden, während die schwarzen Pixel in Ruhe bleiben. Bei einer Ausgabe von 48 auf 60 Pixeln und einem Abstand der einzelnen Dots von 2.45 mm wie beim *VTD*, müssten auf einer Fläche von $12.1 \times 14\text{ cm}$ 2600 Dots integriert werden. Bei jeder Änderung des Bildes müssten sich die entsprechenden Dots heben oder senken, was zu einer Matrix von 2600 einzelnsteuerbaren Stiften führen würde. Aus unserer Sicht würde die Realisierung mit den heutigen technischen Möglichkeiten zu einem sehr hohen Gewicht führen. Zudem wären pneumatisch oder elektromagnetisch angetriebene Aktuatoren zu langsam und die Leistungsaufnahme würde einen mobilen Einsatz unmöglich machen.

Da sich die Finger beim Abtasten immer nur auf einer kleinen Fläche des Reliefbilds befinden, wurde auf dem *VTD* eine virtuelle Matrix aufgebaut. Die in xy -Richtung bewegliche Ausgabematrix besteht aus einer Fläche von $4.3 \times 1.6\text{ cm}$ mit 48 Dots, welche in einer 4×12 Matrix angeordnet sind. Beim Verfahren der Abtastmatrix wird über einen Positionssensor die absolute Position der Abtastmatrix festgestellt. Aus der Position und der Größe der Abtastmatrix wird errechnet, welcher Dot welchem Pixel des auszugebenden Bildes entspricht. Je nach Grauwert des entsprechenden Pixels wird der Dot angehoben oder abgesenkt. Dem Benutzer werden immer nur 2 % der Gesamtmatrix gleichzeitig dargeboten, die Informationen über das Restbild erhält er durch kontinuierliches Verfahren der Ausgabematrix auf dem *VTD*.

Die Position wird über eine optische Maus bestimmt und im Rechner auf die Bildkoordinaten umgerechnet. Die Signale für die Ausgabematrix werden über eine IO-Karte seriell an die passenden Module der Abtastmatrix, der aktuellen Position entsprechend, weitergeleitet.

Kapitel 3

Der Aufbau des *VTD*

In diesem Kapitel werden der mechanische und elektrische Aufbau des *VTD* erläutert sowie die Software vorgestellt.

3.1 Die mechanischen Komponenten

3.1.1 Das Grundgerüst

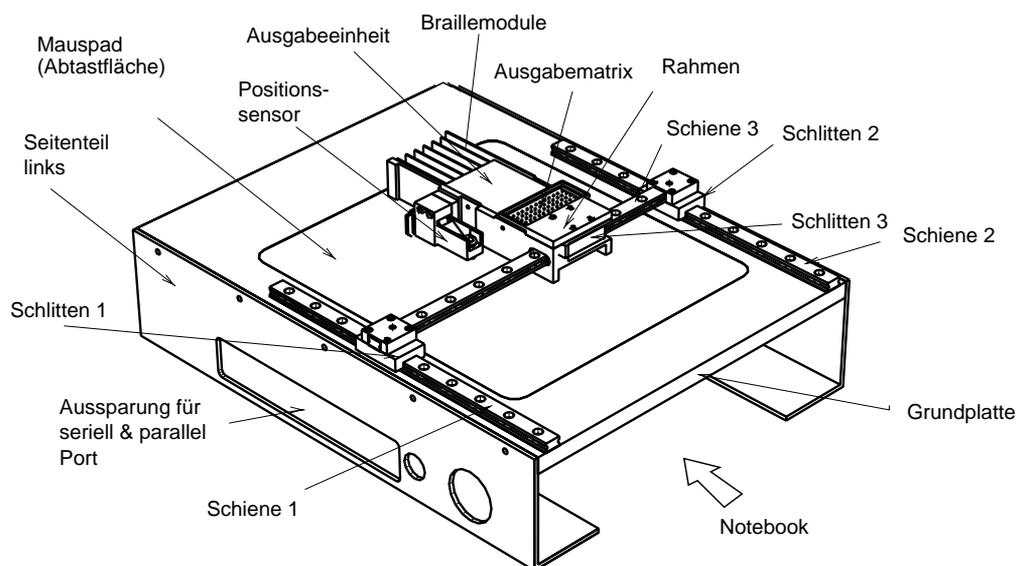


Abbildung 3.1: Das *VTD* und seine mechanischen Komponenten im Maßstab 1 : 4

Um ein kompaktes System mit möglichst wenig Einzelteilen herzustellen, ist die Mechanik des *VTD* so konzipiert, dass auf der Unterseite das für die Stromversorgung und die Ansteuerung wichtige Notebook integriert werden kann. Die Seitenteile und die Grundplatte bilden den

Rahmen, in den das Notebook eingeschoben werden kann. Durch die Aussparung auf der linken Seite hat man Zugang zum parallelen und seriellen Port. Die Ausgänge der IO-Karte und der Netzwerkkarte befinden sich auf der Rückseite und können durch eine Öffnung im Mainboard (vgl. Kapitel 3.3) erreicht werden. Die Abmessungen sind durch den Einschub des Computers somit größtenteils vorbestimmt, die Außenmaße betragen $230 \times 305 \times 105 \text{ mm}$.

Die Grundplatte ist der Träger des Gesamtsystems und darf sich auch im Einsatz nicht verwinden, um einen Leichtlauf der auf der Oberseite montierten Schienen gewährleisten zu können. So musste ein Kompromiss zwischen mechanischer Stabilität und Gewicht getroffen werden, was durch den Einsatz einer 10 mm dicken Aluminiumplatte erreicht wurde. Durch entsprechende Ausfräsungen auf der Unterseite konnte das Gewicht ohne nennenswerte Einbußen in der Stabilität um 42 % gesenkt werden.

3.1.2 Die beweglichen Komponenten

Für das Verfahren in y-Richtung sind zwei Linearführungen auf der Grundplatte befestigt. Mit Hilfe der Linearführungen kann die Ausgabematrix nicht verdreht werden und die Ausgabematrix hat ein festes Bezugssystem zum Gesamtaufbau. Auf Schlitten 1 und Schlitten 2 ist für die x-Richtung die längere Schiene 3 aufgesetzt. Man hat somit die Möglichkeit, den Schlitten 3 frei in xy-Richtung zu bewegen. Für eine virtuelle Matrix ist es wichtig, dass der Benutzer beim Abfahren den Eindruck hat, er würde die Hand frei in xy-Richtung bewegen können und nicht wie ein Scanner das „Bild“ in festen Schritten „abrastern“. Durch den Einsatz spezieller leichtlaufender Linearführungen KUME 09¹ der Firma INA (siehe Abbildung 3.2) sollte der Unterschied zwischen Gleit- und Haftreibung auch bei wechselnden Belastungen so gering wie möglich gehalten werden.

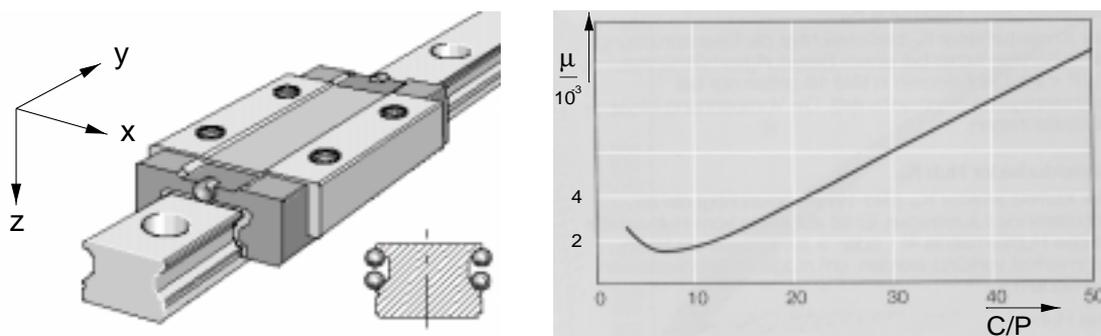


Abbildung 3.2: rechts: Linearführung KUME 09 der Firma INA.

links: Verlauf des Reibungskoeffizienten über das Belastungsverhältnis C/P aus [INA 96].

Nach Herstellerangaben gilt für den Reibungskoeffizienten μ bei der verwendeten Linearführung $\mu = 2 \cdot 10^{-3}$ bis $4 \cdot 10^{-3}$ bei einem Belastungsverhältnis von $C/P = 4$ bis $C/P = 20$.

¹KUME Miniatur-Kugelumlaufeinheit

Das Belastungsverhältnis ergibt sich aus den Quotienten zwischen maximaler dynamischer Tragzahl C in $[N]$ und dem Kennwert für die dynamische äquivalente Belastung P in $[N]$. Für die verwendeten Linearführungen KUME 09 gilt $C = 1340 N$, wobei die Vorspannung² ab Werk auf $\pm 2 \mu m$ voreingestellt worden ist. Bei einem Gewicht der Abtastmatrix von $160 g$, die aus Aktuatorhalter, Rahmen, Braillemodule und Kleinteilen besteht, und einer abgeschätzten Auflagekraft der Finger von $\approx 4 N$, ergibt sich ein Belastungsverhältnis von $C/P \approx 239$, was bei Extrapolierung der von [INA 96] angegebenen Werte zu einem μ von ≈ 0.048 führt. Somit errechnet sich in x-Richtung mit $F_r = \mu \cdot F_N$ ein $F_r \approx 0.27 N$. In y-Richtung ergibt sich durch das zusätzliche Gewicht der Schiene 3 und des Schlitten 3 eine Gesamtbelastung von $F_N \approx 6.5 N$, die sich auf zwei Schienen aufteilt, daraus folgt ein $C/P \approx 415$ je Schlitten mit $\mu \approx 0.083$ ergibt sich ein Reibungswiderstand von $F_r \approx 0.53 N$. Die Größen stimmen mit denen durch einfache Messungen mit einer Belastungswaage ermittelten Größen überein. Zusätzlich zu den Reibungswiderständen ergibt sich das Problem des Verkantens der vertikalen Schlitten. Durch schwimmende Lagerung der Schiene 3 und leichtem Spiel bei der Befestigung von Schiene 2 konnte das Verkanten jedoch stark verringert werden.

Bei einer zusätzlichen Schmierung mit Öl ist darauf zu achten, dass das Öl den Anforderungen des Herstellers entspricht. Außerdem müssen dann die Schienen wegen der erhöhten Verschmutzung regelmäßig, d.h. alle ein bis zwei Tage, gereinigt werden.

3.1.3 Die Aufnahme für die Ausgabeinheit

Die Ausgabeinheit besteht aus den Braillemodulen und dem Positionssensor. Die Halterung (vgl. Abbildung 3.3), mit der die Ausgabeinheit auf dem Schlitten 3 befestigt wird, muss folgenden Anforderungen gerecht werden:

- geringes Gewicht
- Stabilität gegen Verwinden durch die Länge der Braillemodule
- Korrosionsbeständigkeit, da er immer im Kontakt mit den Händen ist
- so wenig wie möglich mechanische Teile

Um die Anzahl der Teile zu reduzieren, ist der Halter aus einem Teil (siehe Abbildung 3.3) gefertigt. Für die Fertigung aus Aluminium spricht zum einen, dass es sich gut bearbeiten lässt, zum anderen das geringe Gewicht. Durch das gewählte Profil besitzt der Halter, obwohl Aluminium relativ weich ist, dennoch die nötige Festigkeit. Vom Hersteller der Linearführungen sind für die Befestigung am Schlitten 3 nur Befestigungen mit M2 Gewinde vorgesehen, so dass durch die U-Form es möglich ist, in x-Richtung zusätzliche Stabilisierungen anzubringen.

²Die Vorspannung gibt an wie weit der Schlitten sich bei Belastung nach oben oder unten bewegt kann, um die Position mit dem geringsten Reibungskoeffizienten zu erreichen. Die Einheit für die Vorspannung ist aus diesen Gründen μm .

Zwischen Schiene und Grundplatte ist der im Kapitel 3.3.2 auf Seite 27 näher beschriebene Nullpunktsensor montiert. Der durch das Auflegen der Hand lichtgeschützten Bereich gewährleistet ein von der Umgebungsbeleuchtung unabhängiger und sicherer Betrieb des Nullpunktsensors.

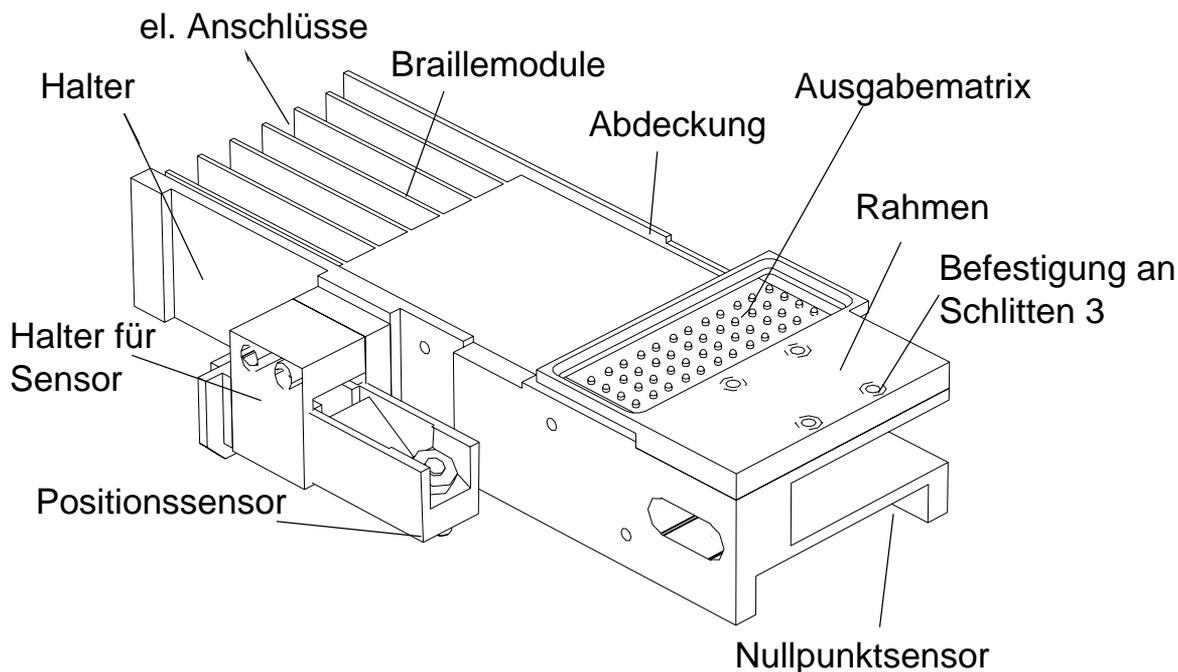


Abbildung 3.3: Die Ausgabereinheit im Maßstab 1 : 1

3.1.4 Die Ausgabematrix

Für die Ausgabematrix finden sechs kommerziell erhältliche Braillemodule der Firma METEC aus Stuttgart Verwendung. Jedes der sechs Module beinhaltet 8 Dots, die in einer 2×4 Matrix angeordnet sind. Durch Biegung von zwei piezoelektrischen Kristallplättchen (siehe Abbildung 3.4) können sie um 0.7 mm angehoben werden. Die Dots befinden sich im Abstand von 2.45 mm , was dem für Brailleschrift üblichen Abstand entspricht. Entsprechend des Standards der Brailleschrift befindet sich zwischen jedem Buchstaben, d.h. zwischen jedem Modul, ein zusätzlicher Abstand von 2 mm , so dass durch Aneinanderreihung der Module eine Matrix mit 48 Dots entsteht, deren Abstand in Abbildung 3.4 ersichtlich ist. Die ungleichmäßige Verteilung der Dots über die Fläche führt zu einer Streckung der Darstellung in x-Richtung. Bei den Tests musste dieser Effekt berücksichtigt werden. Ein Ausgleich der Matrix war nicht möglich, da der mechanische Aufbau der Module eine Verringerung des Abstandes nicht zulässt und eine Neuentwicklung der Matrix aus Zeit- und Kostengründen als nicht sinnvoll erschien. Es ergibt sich somit eine mittlerer Dot-Abstand in x-Richtung von 3.21 mm und in y-Richtung von 2.45 mm .

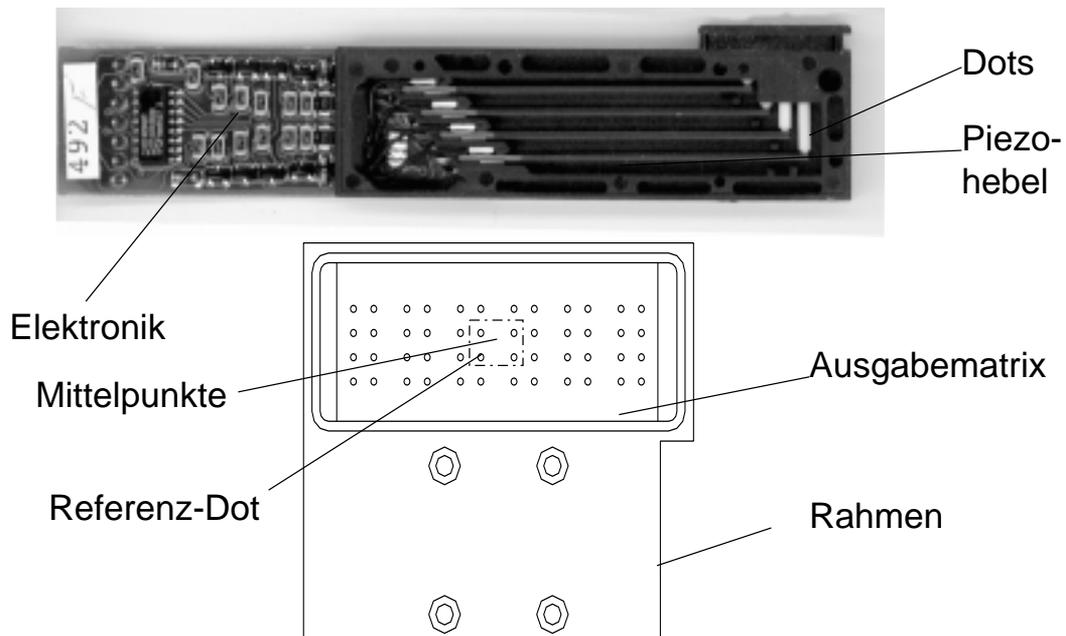


Abbildung 3.4: oben: Braillemodul der Firma MEDEC,
unten: die Ausgabematrix mit dem Rahmen; je im Masstab 1 : 1

Beim Abtasten ist es notwendig, dass der Benutzer die Grenzen der Matrix wahrnimmt. Durch den Rahmen, der die Matrix umschließt, kann auch der sehbehinderte Mensch schnell erfassen, wo sich die Finger befinden müssen. So kommt es nicht zu Fehlinterpretationen, wenn die Finger nicht auf der Matrix aufliegen und der Benutzer annehmen könnte, es würde nichts angezeigt.

Die Versuche mit zwei verschiedenen Rahmendicken vom 2 mm bzw. 4 mm haben gezeigt, dass bei einem 2 mm -Rahmen der Benutzer nicht durch den Rand behindert wird und alle Dots ertasten kann.

3.2 Signalverarbeitung

3.2.1 Die Verteilung der Signale

Im *HTVSS* sind viele Datenleitungen vorhanden, deren Verteilung Abbildung 3.5 veranschaulicht. Für den Datentransfer stehen im Notebook der serielle und der parallele Port sowie eine IO-Karte zur Verfügung. Die IO-Karte wird von der Firma National Instruments hergestellt und trägt die Typenbezeichnung DIO-24, sie wird im Notebook den PCMCIA³-Slots eingeschoben. Auf der Karte befinden sich je nach Konfiguration bis zu 24 Ein- bzw. Ausgänge. Die Karte wird zum Ansteuern der Braillemodule und für die Ausgabe der Steuersignale für die Kamera verwendet.

Zur IO-Karte wurde ein Softwarepaket mitgeliefert, das es ermöglicht mit speziellen Befehlen im laufenden Programm einzelne Eingänge oder ganze Ports⁴ anzusprechen, um die entsprechenden Signale ein- oder auszugeben. Bei der Messung der maximalen Datenrate zeigt sich, dass es nicht möglich ist über die IO-Karte die Bilddaten einzulesen. Die maximale Ausgabe-geschwindigkeit variiert je nach Rechner und CPU, wobei für uns die Datenrate, die mit dem Notebook erreicht werden kann ausschlaggebend ist. Für das mit einem P90-Prozessor von Intel ausgestatteten Notebook ergibt sich eine maximale Datenausgaberate im Blockmodus⁵ von 95.9 kByte/s . Zum Erreichen dieser Ausgabegeschwindigkeit werden die Leitungen für das Handshake überbrückt, so dass alle Daten ohne Zeitverzögerung ausgegeben werden können. Zwischen jedem DIG_Block_Out Befehl ergibt sich ein Software-Delay von 1.86 ms . Beim Zugriff auf einzelne Datenleitungen durch den Befehl DIG_Line_Out können Daten maximal mit einer Rate von 5.37 kBits/s Bitweise ausgegeben werden.

Zum Einlesen eines Bilds von der Kamera werden bei der Auflösung von 64×64 Pixeln mindestens 4096 Bytes benötigt, plus zusätzliche Steuer- und Kontrollsignale. Beim Einlesen der Bildinformation über die Karte würde man pro Bild etwa 43 ms benötigen und könnte somit maximal 23 Bilder pro Sekunde einlesen. In der Zeit die nötig ist die Bilder „aufzunehmen“, hätte man nicht die Möglichkeit weitere Signale wie z.B. Daten für die Abtastmatrix auszugeben. Um ein schnelleres Einlesen der Bilddaten zu ermöglichen, werden die Daten über den parallelen Port des Notebooks eingelesen. Zur Zeit wird mit den zur Verfügung stehenden Softwaretreibern eine maximale Datenrate von 500 kByte/s erreichen.

Für das Auslesen der Daten des Positionssensors wird der serielle Port verwendet. Der Positionssensor ist eine für diesen Zweck entsprechend weiterentwickelte optische Maus. Somit liegt ein Anschluss an den seriellen Port nahe. Der digitale Ausgang des Nullpunktsensors wird über eine der drei Maustasten an den Rechner weitergegeben.

Die Abbildung 3.5 veranschaulicht zusätzlich noch einmal die Verteilung der Daten. Alle digitalen Datenleitungen werden in der Abbildung rot dargestellt. Die blauen Linien kennzeichnen die Leitungen für die Stromversorgung und die grüne Leitung ist die analoge Verbindung zwi-

³Personal Computer Memory Card International Association

⁴Die 24 Kanäle der IO-Karte sind in 3 Ports mit je 8 Ein-/Ausgängen angeordnet, die je nach Konfiguration einzeln oder als Block angesprochen werden können.

⁵Blockmodus bedeutet, dass die auszugebenden Daten in einem Block durch Übergabe eines Pointers mit einer Anweisung übergeben werden.

schen dem Kameramodul und der Kamera. Analog bedeutet, dass die Daten die den Grauwerten des Pixels entsprechen als proportionale Spannungswerte auf das Modul übertragen werden.

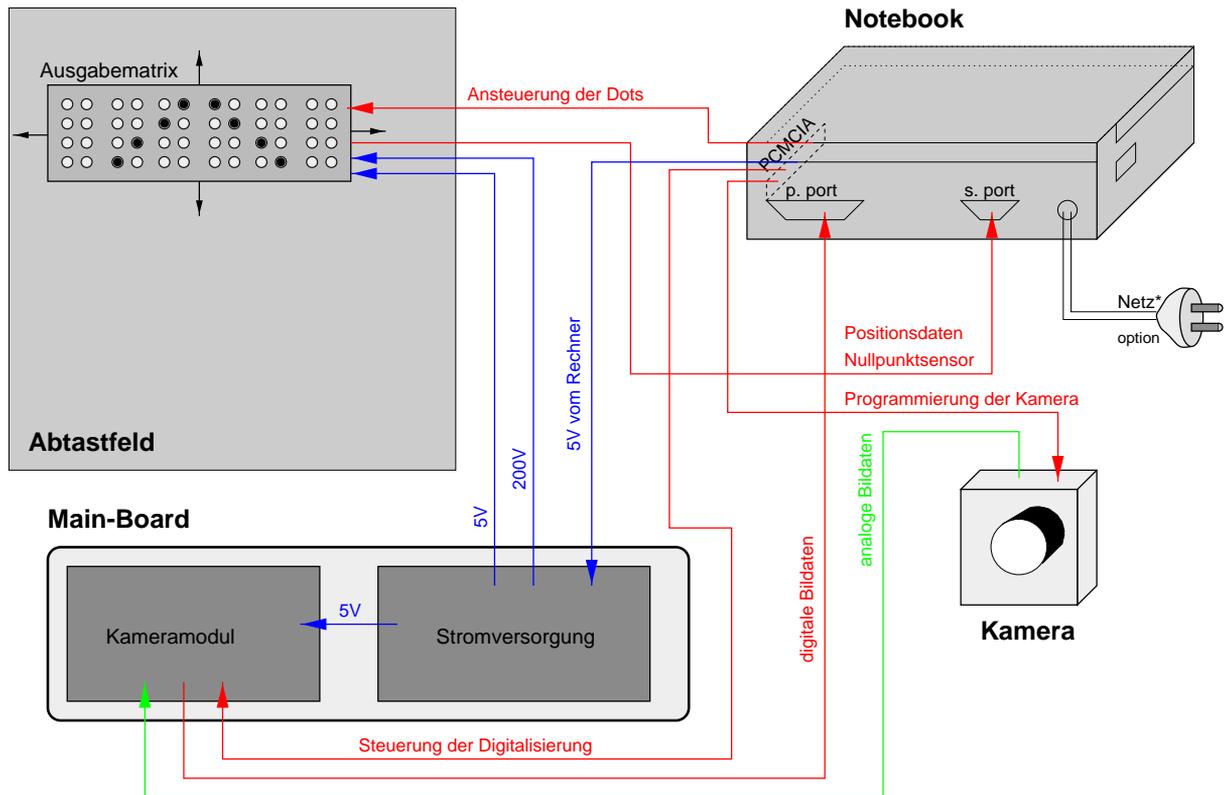


Abbildung 3.5: Die Verteilung der verschiedenen Signalleitungen auf dem VTD.

3.2.2 Die Verkabelung

Für die Verbindung zwischen Mainboard und parallelem Port sowie zum seriellen Port des Rechners werden Kabel mit besonders hochflexiblen Litzen verwendet. Für die Zugentlastung werden die Kabel von vorne durch die zur Gewichtsersparnis eingefrästen Nuten gesteckt. Auf der Oberseite sind sie über Pfostenverbinder elektrisch mit dem Mainboard verbunden und können somit jederzeit ausgetauscht oder geändert werden. Die geplante Verwendung von Flachbandkabeln ist verworfen worden, da es zu Kabelbrüchen durch die Bewegungen an den Lötstellen kam. Die oben angesprochene Verbindung ermöglicht es das VTD mit der gleichen Verkabelung sowohl im stationären Betrieb mit externem Notebook als auch im mobilen Betrieb mit integriertem Rechner zu betreiben.

Für die Verbindung zwischen Abtastmatrix und Mainboard ist ein spezielles Folienkabel entwickelt worden. Ein Folienkabel wird wie ein PCB⁶ entworfen. Der Unterschied zwischen einem

⁶Printed Circuit Board

PCB und einem Folienkabel besteht in dem wesentlich dünneren und flexibleren Trägermaterial. Für die Anwendung kam nur Kaptonfolie als Trägermaterial in Frage, da für die Anschlüsse der Braillemodule und des Positionssensors Stecker aufgelötet werden mussten. Die Abbildung 3.6

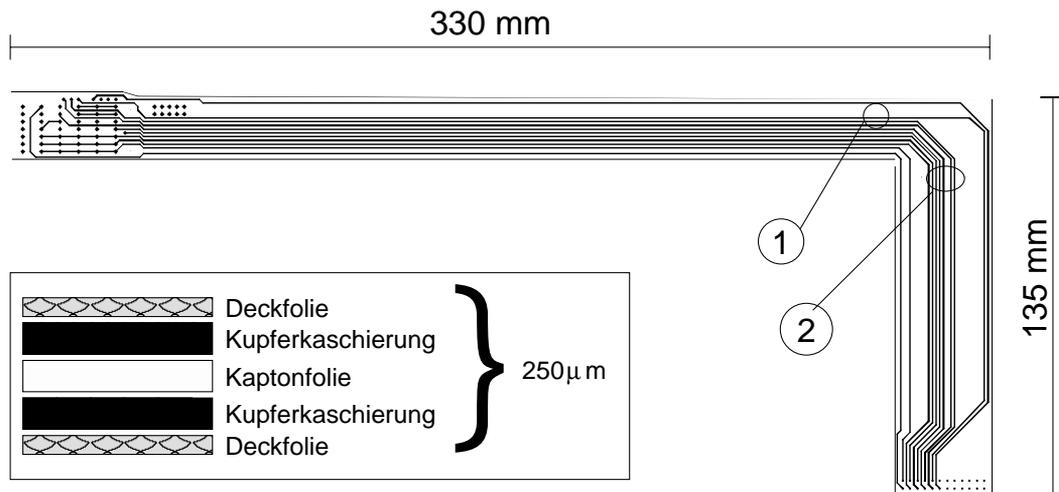


Abbildung 3.6: Das speziell für die Verbindung zwischen Abtastmatrix und Mainboard entwickelte Folienkabel. Auf dem unteren Bild ist der Aufbau eines Folienkabels nochmals erläutert.

zeigt den grundsätzlichen Aufbau. Die Deckfolie über der Kupferkaschierung ist notwendig, damit sich bei Biegung des Folienkabels die Kupferleiterbahnen in der neutralen Ader der Biegung befinden.

Im eingebautem Zustand führt das lange Ende des Folienkabels in einem Bogen zu der Abtastmatrix und der kurze Schenkel wird über Steckverbinder mit dem Mainboard kontaktiert. Um den Druck beim Befestigen auf der Grundplatte gleichmäßig zu verteilen, ist das Kabel zwischen zwei Plastikplättchen eingeklemmt.

Nach dem Einbau zeigte sich, dass es nach wenigen Bewegungen des Kabels zu Brüchen der Leiterbahnen kam. Besonders häufig brechen die Leiterbahnen an den Stellen, die in Abbildung 3.6 mit 1 und 2 gekennzeichnet sind. Nach der Untersuchung des Kabels unter dem Mikroskop und Gesprächen mit dem Hersteller zeigte sich, dass es sich größtenteils um Produktionsmängel handelte. An der Verbindungsstelle zwischen langem und kurzem Schenkel könnte es zur Torsion des Kabels kommen. Die Torsion würde die Haltbarkeit des Kabels beeinflussen, nicht aber das Versagen der Funktion innerhalb von wenigen Betriebsminuten erklären. Nach der zweiten Überarbeitung ist die Weiterentwicklung gestoppt worden, da es sich zeigte, dass es nicht zu einem signifikanten Unterschied beim Verfahrenswiderstand der Ausgabeinheit kommt, wenn das Folienkabel durch ein Kabel mit hochflexiblen Litzen ersetzt wird.

3.3 Der elektrische Aufbau

Für die Spannungsversorgung von Abtastmatrix und Kamera sowie für die Verteilung der Signale ist es nötig gewesen ein PCB⁷ zu entwerfen, auf dem auch alle zusätzliche Elektronik integriert werden konnte. Dieses PCB befindet sich auf der Rückseite des VTD und wird als Mainboard bezeichnet. Als zusätzliche Elektronik ist eine Schaltung für den Nullsensor und eine Digitalisierungsschaltung für das Kamerasignal nötig.

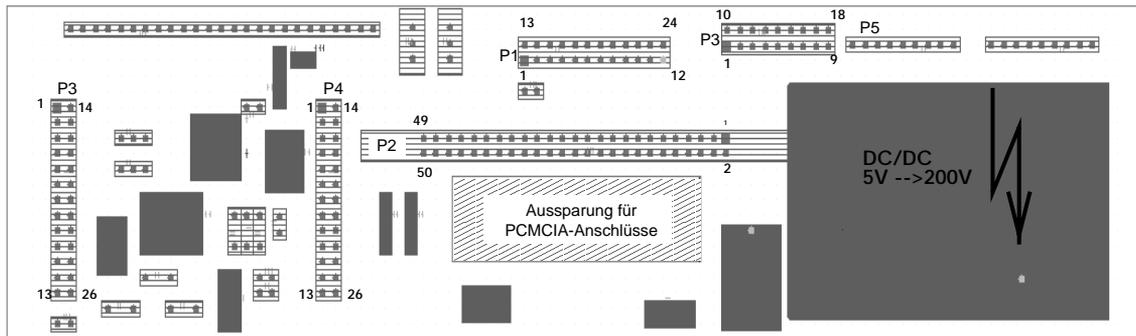


Abbildung 3.7: Mainboard

3.3.1 Stromversorgung

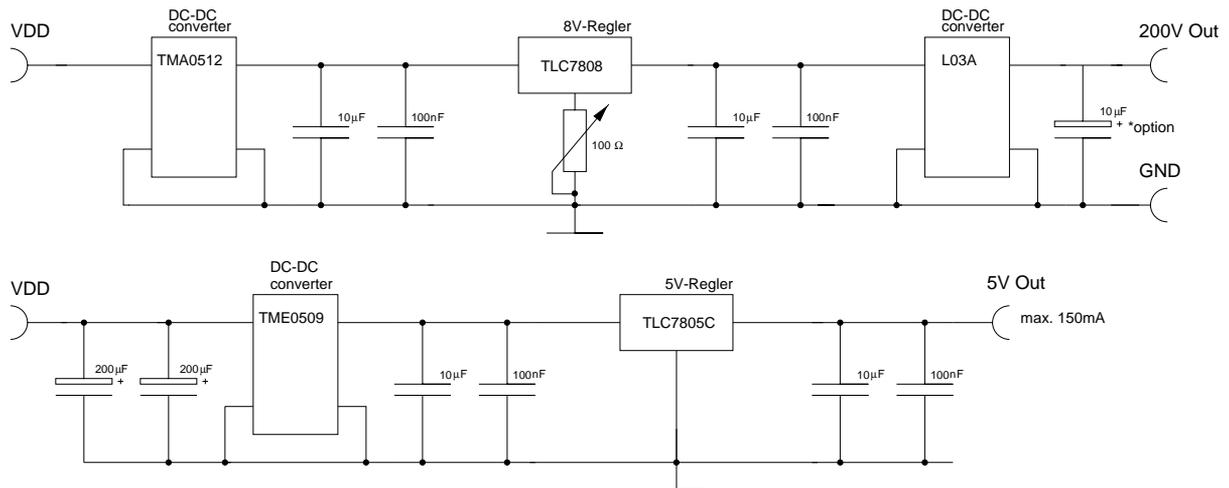


Abbildung 3.8: oben: Schaltung für die Stromversorgung der Piezomodule.
unten: Der Stromlaufplan der 5V Glättungsschaltung.

⁷Printed Circuit Board

Für eine netzunabhängige Stromversorgung steht nur der 5 V Ausgang der PCMCIA-Karte zur Verfügung, der Piezoantrieb der Braillemodule benötigt allerdings 200 V. Für die empfindliche AD⁸-Wandlung des Kamerasignales wird zudem eine stabilisierte mit einem möglichst kleinen Rauschanteil versehene Stromversorgung benötigt. Zur Filterung wird die in Abbildung 3.8 dargestellte Schaltung verwendet. Durch Transformieren der Spannung auf 9 V mit einem DC/DC-Wandler und anschließendem Stabilisieren und Glätten auf 5 V wird eine Reduzierung des Rauschanteils und ein Blocken der Peaks erzielt. Die Peaks in der Eingangsspannung werden durch das Anfahren der Festplatte in unregelmäßigen Abständen erzeugt.

Das Rauschen der Versorgungsspannung lässt sich durch den RMS-Wert⁹ V_{RMS} und den Peak-zu-Peak Wert V_{p-p} beschreiben, welche mit einem digitalen Oszilloskop bestimmt werden können. Bei der Messung wird über den für diese Anwendung wichtigen Frequenzbereich von 500 Hz bis 50 MHz gemittelt. Es ergibt sich ein RMS-Wert vor der Glättung von $V_{RMS}^{vor} = 17.9 \pm 1.4 \text{ mV}$ und nach der Glättung von $V_{RMS}^{nach} = 8.76 \pm 1.5 \text{ mV}$. Bei der Peak zu Peak Spannung ergibt sich $V_{p-p}^{vor} = 143.7 \pm 23.4 \text{ mV}$ und $V_{p-p}^{nach} = 80.8 \pm 9.9 \text{ mV}$. Es zeigt sich, dass um eine bessere Siebung zu erreichen bei rauschempfindlichen Schaltungen sicher ein anderes Konzept der Filterung notwendig sein wird (vgl. Abbildung 3.9). Für unsere Zwecke war die Schaltung in Anbetracht des Versuchstadiums des HTVSS ausreichend.

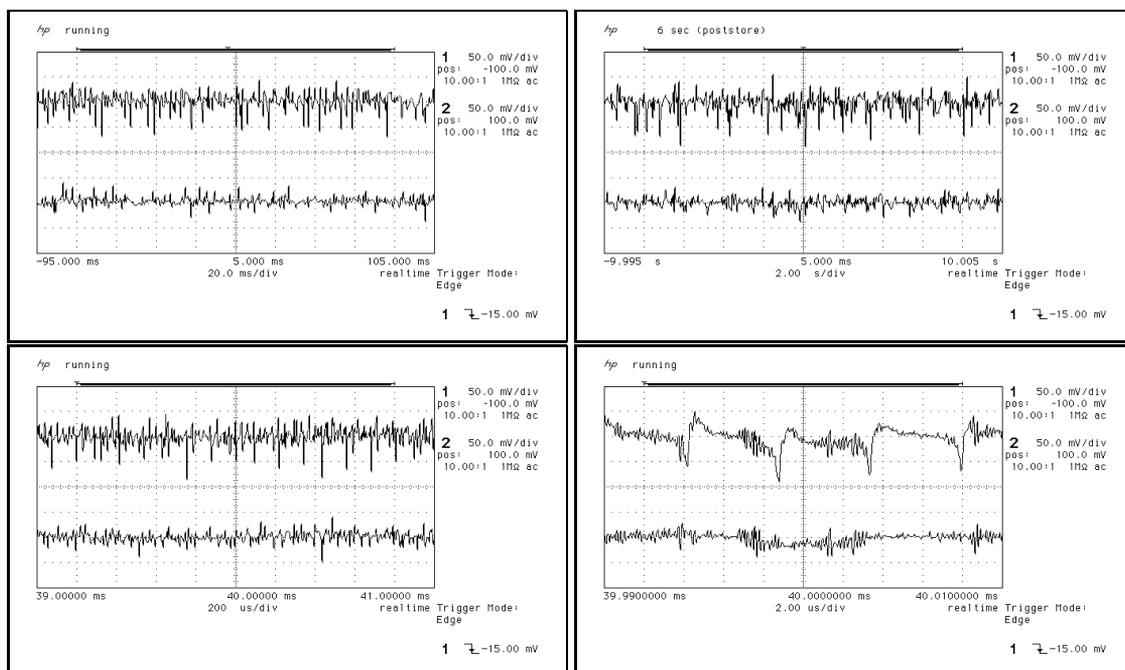


Abbildung 3.9: Aufnahmen der Rauschspannung. In den Abbildungen ist die Eingangsspannung immer oben abgebildet.

Bei der Umwandlung der Versorgungsspannung von 5 V auf 200 V, die die Piezokristalle

⁸analog digital

⁹Root Mean Square

der Braillemodule benötigen, ist es nicht nötig auf eine besondere Filterung wert zu legen. Zur Erzeugung der 200 V wird ein DC/DC-Wandler der Firma *powerbox* verwendet. Für die Verwendung des Models L03 spricht sein geringer Platz- und Stromverbrauch. Der L03 wandelt eine Eingangsspannung von 2 V bis 12 V in eine proportionale Ausgangsspannung von 100 V bis 500 V. Es ist somit nötig aus der 5 V-Versorgungsspannung eine stabilisierte 8 V-Eingangsspannung für das Hochspannungsmodul zu erzeugen. Die Schaltung mit dem über das 100 Ω Potentiometer erhöhten Nullpotential wird verwendet, um die 200 V Ausgangsspannung in kleinen Bereichen variieren zu können. Sie hat den Vorteil, dass sie im Vergleich zu den Schaltungen mit einem einstellbaren Spannungsregler eine geringere Verlustleistung aufweist.

3.3.2 Schaltung für den Nullsensor

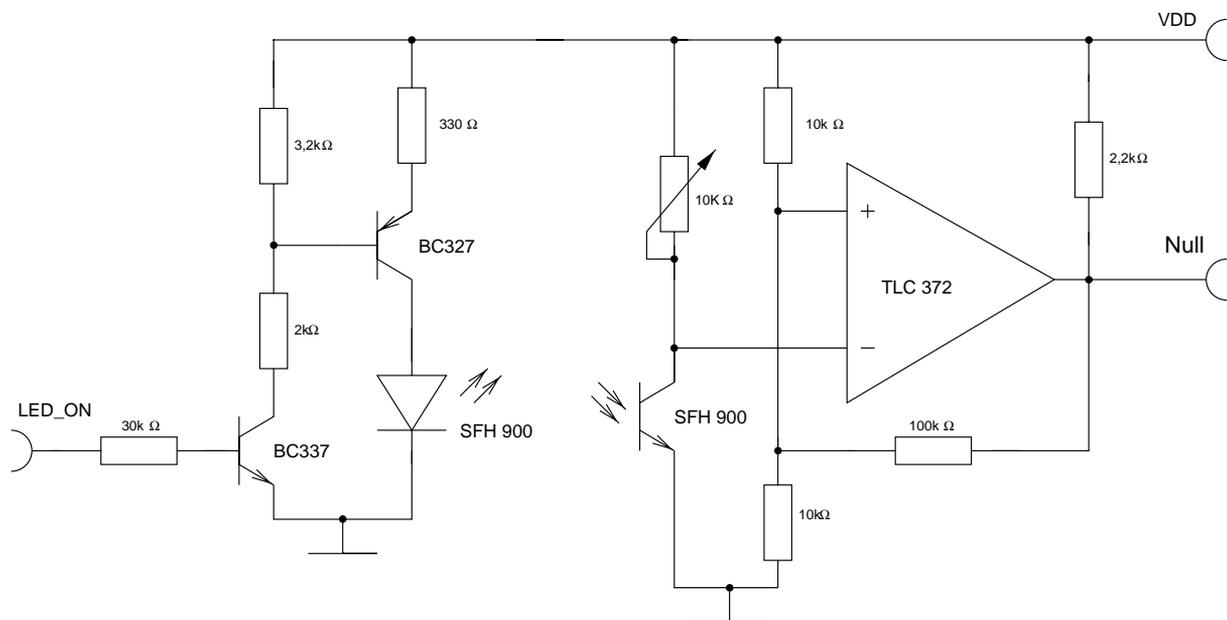


Abbildung 3.10: Schaltung für die LED und den Fototransistor des Nullpunktsensors.

Der Rechner bekommt über den Positionssensor nur Informationen über die Änderung der aktuellen Position. Für eine Bestimmung der absoluten Position der Ausgabematrix auf dem *VTD* sind neben diesen differenziellen Daten noch zusätzlich die Anfangswerte zu bestimmen. Der Positionssensor kann bei sehr schnellen Bewegungen nicht alle Schritte auflösen und es kommt zu einer Differenz zwischen aufgezeichnetem und tatsächlichem Verfahrensweg. Um diesem Problem entgegenzuwirken und beim Einschalten einen Anfangswert bestimmen zu können, ist ein zusätzlicher Nullschalter in das *VTD* integriert. Für den Nullschalter wird eine Miniatur-Reflexlichtschranke der Firma Siemens (SFH 900) verwendet. Sie besteht aus einem großflächigen Fototransistor und einer GaAs-Infrarotdiode, wobei durch einen eingebauten Filter unerwünschte Tageslichteinflüsse abgeschirmt werden.

An der hinteren rechten Ecke der Abtastfläche ist ein reflektierendes Plättchen befestigt, das zur Bestimmung des Referenznullpunktes dient. Durch die Schaltung (vgl. Abbildung 3.10) wird die Empfindlichkeit und das Ansprechverhalten des Nullpunktsensors festgelegt. Die Rückkopplung über den $100\text{ k}\Omega$ Widerstand erzeugt einen Hystereseeffekt beim Schalten des Komparators. Mit dieser Hysterese wird ein definiertes Schaltverhalten bei Erreichen des Nullpunktes erzielt und ein Prellen des Signales wird vermieden.

Die linke Schaltung für die LED ist nötig, da zur Reduzierung der Verlustleistung des VTD die LED von der Software erst vor der Nullpunktanfrage eingeschaltet wird und die verwendete IO-Karte nur maximal 4 mA treiben kann. Die Schaltung erlaubt ein Ansteuern mit positiver Logik und führt zu einem von der Eingangsspannung unabhängigen konstanten Strom von 10 mA durch die LED.

3.3.3 Verteilung der Signale auf dem Mainboard

Eine der Hauptaufgaben des Mainboards ist es, die im Kapitel 3.2.1 auf Seite 22 angesprochenen Signale zu verteilen. Für die Zusatzelektronik der Kamera sind die Signale auf Pfostenleisten P3 und P4 gelegt worden, auf denen entsprechende Module aufgesteckt werden können. Auf diesen Modulen befindet sich die jeweilige der verwendeten Kamera angepasste Elektronik. Dieser Aufbau erlaubt, verschiedene zur Zeit noch in der Entwicklung befindliche Kameras, nur durch Austauschen des Moduls und des entsprechenden Softwareteils als neuer Bildaufnahmeteil in dem Projekt zu nutzen. Für die in dieser Arbeit verwendete Kamera (vgl. Kapitel 2.1) ist von M. Loose ein Modul gefertigt worden, das die analogen Daten der Kamera digitalisiert. Weitere Komponenten des Moduls sind die für den Dialog mit der parallelen Schnittstelle des Rechners notwendige Hardware und die elektrischen Verbindungen zwischen Kamerasteuerleitungen und IO-Karte.

Für die Weitergabe der Signale an die Ausgabeeinheit dient der Pfostenverbinder P2 an den das in Kapitel 3.2.2 angesprochene Verbindungskabel zur Abtastmatrix angeschlossen wird. Von diesem Anschluss werden abschließend über P5 die Daten des Positionssensors an die Platine der optischen Maus weitergegeben. Die Mausplatine ist auf Abstandshaltern über den DC/DC-Wandler L03 montiert, so dass das Mainboard vollständig auf der Rückseite des VTD montiert werden kann.

Die Belegung der Pins von P2, P3 und P4 mit den entsprechenden Signalen sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

P2(Mainboard→Matrix)		P3(Kamera→Parallelport)			P4(Kamera→ I/O)		
P2	Funktion	Pin	Name	Bemerkung	Pin	Name	Bemerkung
1	Ps 5	1	*STB		1	PC7	
2	Ps 4	2	D0	DATEN	2	PC6	
3	Ps 3	3	D1	DATEN	3	PC5	
4	Ps 2	4	D2	DATEN	4	PC4	
5	Ps 1	5	D3	DATEN	5	PC3	
6	Taster 1	6	D4	DATEN	6	PC2	
7	Taster 3	7	D5	DATEN	7	PC1	
8	GND	8	D6	DATEN	8	PC0	
9	GND	9	D7	DATEN	9	PB7	
10	Data out	10	*ACK		10	PB6	
11	Strope	11	BSY		11	PB5	
12	200V	12	(PE)		12	PB4	
13	frei	13	(SLCT)		13	PB3	
14	Ps 9	14	(*AUTOFD		14	GND	
15	Ps 8	15	(*ERROR)		15	5V	VDD
16	Ps 7	16	(*INIT)		16	PA0	
17	Ps 6	17	(*SLCTIN)		17	PA1	
18	Taster 2	18	GND	0V	18	PA2	
19	GND	19	GND	0V	19	PA3	
20	NS LED	20	GND	0V	20	PA4	
21	NS Foto-Transistor	21	5V	VDD	21	PA5	
22	data in	22	GND		22	PA6	
23	clock	23	12V	vom DC/DC	23	PA7	
24	5V	24	5V	max. 150 mA	24	PB0	
		25		frei	25	PB1	
		26		frei	26	PB2	

Tabelle 3.1: Steckerbelegung von Stecker P2, P3, P4

links: Die Verbindung zwischen Abtastmatrix und Mainboard. Die Bezeichnung Ps steht für den Positionssensor und bezeichnet die entsprechenden Anschlüsse desselben, NS sind die entsprechenden Pins des Nullpunktsensors.

mitte: auf die Pfostenleiste P3 werden die Verbindungen zwischen Parallel-Port und Kamera hergestellt.

rechts: Die Anschlüsse von Kameramodul und PCMCIA-Karte.

3.4 Software

Für die Software steht das *Visor-Programm* zur Verfügung, welches von J. Schemmel [Schemmel 97] entwickelt wurde.

Das Programm läuft unter *Windows 95* und ist in der Programmiersprache C++ geschrieben, wobei die OWL¹⁰ von der Firma Borland Verwendung findet. In Zusammenarbeit mit J. Schemmel ist das modular aufgebaute Programm erweitert und sind die für das *HTVSS* nötigen Veränderungen vorgenommen worden.

Das *Visor-Programm* gliedert sich in 2 Hauptbestandteile :

- Hauptprogramm
- Weiterverarbeitungsmodule.

Das Hauptprogramm erfüllt folgende Aufgaben (vgl. Abbildung 2.2):

- Einlesen von Bildern
 - über die Kamera
 - über eine TCP/IP¹¹-Verbindung von einem anderen Computer
 - durch Einlesen einer Grafikdatei in Bitmap-Format¹²
- Weitergabe der Bilddaten bzw. Ausschnitte einer Grafik an die Weiterverarbeitungsmodule
- Steuerung der Kamera
- Aufnahme und Wiedergabe von einzelnen Kamerabildern bzw. von ganzen Bildsequenzen über den „Videorecorder“

Beim „Videorecorder“ werden nicht nur die Eingangsbilder, sondern je nach Benutzereinstellung, auch die Ausgänge der einzelnen Module aufgezeichnet.

Wie im Bildschirmausdruck in Abbildung 3.11 zu erkennen ist, schließen sich an das Hauptprogramm die in einer Baumstruktur angeordneten Weiterverarbeitungsmodule an. In diesen Weiterverarbeitungsmodulen kann das vom Hauptprogramm übergebene Bild mit verschiedenen Bildverarbeitungsfiltern weiterverarbeitet werden. Des Weiteren sind verschiedene anwendungsbezogene Module integriert, wie Ausgabe- und Simulationsmodule. In den Modulen werden jeweils die Daten des vorherigen Moduls aufgenommen und weiterverarbeitet. Die verarbeiteten Daten kommen je nach Einstellung zur Anzeige und werden anschließend an die untergeordneten Module weitergegeben.

¹⁰Object Windows Library

¹¹mit TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protokol) bezeichnet man das Protokoll das im Internet die Kommunikation zwischen verschiedenen Rechnern ermöglicht.

¹²Es gibt zwei grundsätzliche Arten Grafiken zu speichern, die Bitmap- und die Vektor-Darstellung. Bitmap-Programme arbeiten mit einzelnen Bildpunkten und speichern diese in Bit-Mustern (Bitmap), die im Wesentlichen ein Abbild des Bildschirmspeichers darstellen. Das in dem Programm verwendete Bitmapformat ist das von Microsoft für Windows 3.0 eingeführte Format.

3.4.1 Module der Bildverarbeitung

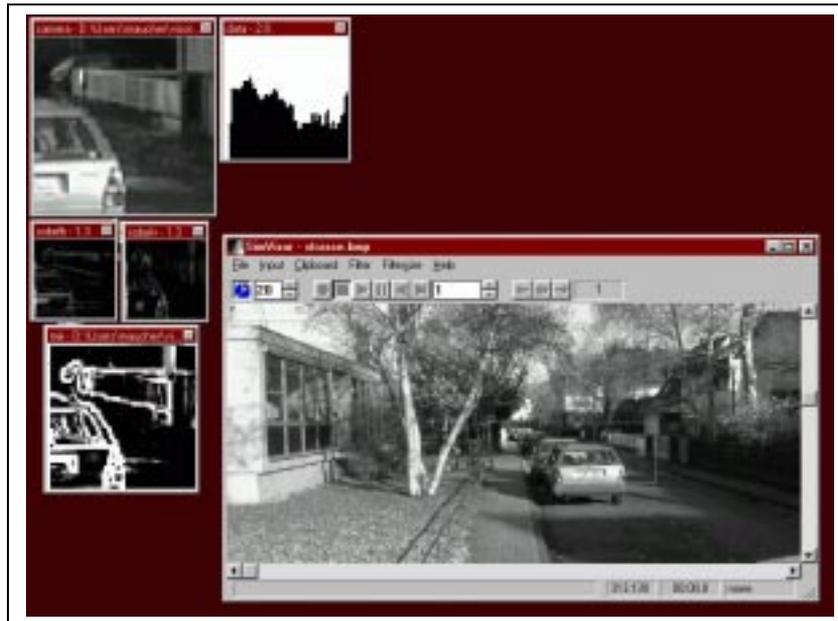


Abbildung 3.11: Die Abbildung zeigt die Funktion des *Sobelfilters* und des *Mixfilters*. Der im Hauptfenster mit einer gestrichelten Linie eingerahmte Ausschnitt der Grafik dient als Eingang für das erste Modul. In den beiden *Sobelfiltern* werden die horizontalen und vertikalen Kantenbilder extrahiert und anschließend im *Mixfilter* zusammengefügt. Das *Histogrammmodul* zeigt die Grauwertverteilung im Eingangsbild. Des Weiteren ist in dieser Abbildung auf der rechten Seite das Hauptfenster mit den Funktionsknöpfen für den „Videorecorder“ zu erkennen.

Für die Bildverarbeitung stehen folgende Filter, die jeweils in einem Modul implementiert sind, zur Verfügung:

Sobelfilter: Sobeloperatoren detektieren, entsprechend ihren Elementen in der Filtermaske horizontale oder vertikale Kanten und wirken gleichzeitig in Detektionsrichtung glättend [Jähne 93] (vgl. Abbildung 3.11).

Gaußfilter: Der Gaußfilter dient zur Glättung, wobei die Größe der Operatormaske variiert werden kann.

Medianfilter: Ein Medianfilter ist ein nichtlinearer Glättungsfilter. Der Medianfilter sortiert die Grauwerte innerhalb der Filtermaske der Größe nach. Er gibt anschließend nicht den Mittelwert, sondern den Grauwert zurück, der in der Filtermaske in der Mitte steht [Jähne 93].

Mixfilter: Der Mixfilter dient zum Mischen der Filterdaten aus verschiedenen Modulen [Schemmel 97].

Zusätzlich ist noch das Histogrammmodul¹³ zur Darstellung der Grauwertverteilung innerhalb eines Bildes vorhanden.



Abbildung 3.12: Die Abbildung zeigt die Funktion des *morphologischen Filters* bei dem das Ausgabebild gleich binarisiert wurde.

Zusätzlich zu diesen vorhandenen sind noch folgende Bildverarbeitungsfilter integriert:

Kalibrierungsfilter: Dieser Filter sucht nach dem minimalen und den maximalen Grauwert in einem Bild und berechnet den entsprechenden Skalierungsfaktor. Anschließend wird das Bild auf den gesamten Grauwertbereich skaliert, so dass der Pixel mit dem minimalen Grauwert schwarz und der mit dem maximalen weiß wird. Diese Operation wird benötigt, um ein Bild unabhängig von der Grauwertverteilung durch einen vorgegebenen Schwellwert zu binarisieren.

Durch Eintragungen in das Initialisierungsfile¹⁴ kann die Breite des Randes angegeben werden, um ihn von der Extremabestimmung auszuschließen.

morphologischer Kantenfiter: Dieser Operator ist durch seine gute Detektion der Kantenlage und durch seine Rauschunempfindlichkeit charakterisiert [Klette 95]. Er erreicht dieses durch Glättung mit einem Spalttiefpass und anschließender Erzeugung von zwei Differenzbildern. Die Differenzbilder werden erzeugt durch Dilatation bzw. durch Erosion des

¹³Das *Visor-Programm* beinhaltet teilweise noch die Arbeitsdefinition *Data*.

¹⁴Jedes Modul hat ein Initialisierungsfile, in dem verschiedene Einstellungen und Vorgaben vorgenommen werden können. Man erreicht das Initialisierungsfile durch Drücken der linken Maustaste.

geglätteten Bildes. Der ausgegebene Grauwert ist der Minimalwert der beiden Operationen. Mit $g(p)$ wird das Ergebnis der Glättung des Originalbildes $f(p)$ bezeichnet. Es ergibt sich somit für das Ausgabebild $h(p)$ folgende Berechnung:

$$h(p) = \min\left\{ \left[g(p) - \min_{q \in f(p)} (g(q)) \right], \left[\max_{q \in f(p)} -g(p) \right] \right\}$$

Die Funktion des Filters ist in Abbildung 3.12 ersichtlich. Der Filter hat den weiteren Vorteil, dass sich die Möglichkeit der Binarisierung in Abhängigkeit der Grauwertumgebung innerhalb der Filtergröße zusätzlich integrieren lässt.

3.4.2 Simulationsmodul *Pingpong*

Zwei Module, die keine Bildverarbeitungsoperatoren beinhalten sind zum einen *VTD-Out*¹⁵ und zum anderen *Pingpong*. Sie werden für die Ausgabe und für die in Kapitel 4.1 beschriebenen Tests benötigt.

Das *Pingpong*-Modul ist speziell für die Tests konzipiert. Es unterscheidet sich von den bisherigen Modulen dadurch, dass es keine Daten vom Hauptprogramm oder von übergeordneten Modulen übernimmt. Das *Pingpong*-Modul erzeugt seine Daten selbst. Je nach Einstellung hat man die Möglichkeit einen kleinen quadratischen oder kreisförmigen weißen Punkt auf schwarzem Grund als „Kamerabild“ darzustellen (siehe Abbildung 3.13). Dieser Punkt, im Folgenden als Ball bezeichnet, wandert auf der durch die Größe des Moduls begrenzten Fläche hin und her. An den Begrenzungen wird der Ball wie eine Billardkugel reflektiert und ändert seine Bewegungsrichtung. Durch Einstellungsmöglichkeiten kann man die Geschwindigkeit, die Form und die Größe des Balles regeln. Mit ν_0 für die im Hauptfenster eingestellte Up-Daterate¹⁶ ν_0 , dem Skalierungsfaktor *refresh* je nach Geschwindigkeitseinstellung (*speed1* entspricht *refresh* = 1) und der im Initialisierungsfile bestimmten *stepsize* ergibt sich für die Geschwindigkeit des Balles (v_0) in der Einheit *Pixel/s*.

$$v_0 = \frac{\nu_0 \cdot stepsize}{refresh} \quad (3.1)$$

Die Geschwindigkeit v_0 kann über den mittleren Pixelabstand von $2,5 \text{ mm}$ in eine reale Geschwindigkeit v_r mit $v_r = v_0 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}$ in $[m/s]$ umgerechnet werden.

3.4.3 Ausgabemodul *VTD-Out*

Das Ausgabemodul *VTD-Out* liest über die serielle Schnittstelle die Daten des Positionensensors aus und berechnet daraus die Position der Abtastmatrix in Bezug zum Bild, das ausgegeben werden soll. Aus der Position wird bestimmt, welcher Dot welchem Pixel des Ausgabebildes entspricht. Im Bereich der Ausgabematrix wird jedem Pixel, dessen Grauwert über dem von

¹⁵Vorläufig kann noch die Arbeitsdefinition Touchout bzw. Touchneu innerhalb des *Visor-Programm* vorkommen.

¹⁶Die Up-Daterate bezeichnet die Frequenz, mit der Bilder von der Kamera ausgelesen oder ganz allgemein Daten an das erste Modul gesendet werden.

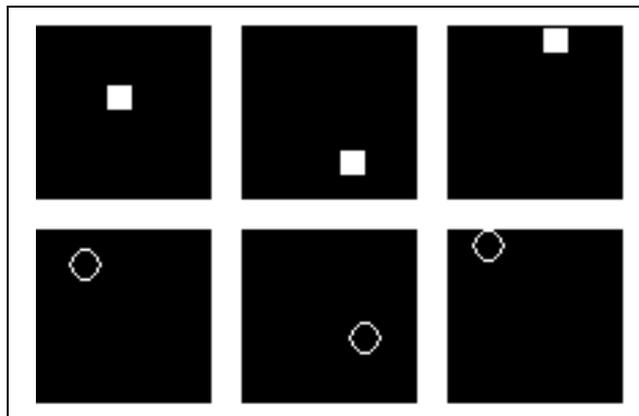


Abbildung 3.13: Die Abbildung zeigt sechs Bilder des *Pingpong*-Moduls, die zu unterschiedlichen Zeiten mit zwei verschiedenen Ballformen aufgenommen wurden.

Benutzer festgelegten Schwellwert liegt, ein logisches „high“, den anderen Pixel entsprechend ein logisches „low“ zugeordnet. Die so binarisierten Daten werden in einer Ausgaberoutine in die entsprechenden Daten für die Dots der Braillemodule übersetzt und anschließend über die Blockoperation (vgl. Kapitel 3.2.1) der IO-Karte seriell ausgegeben.

Es zeigt sich, dass bei der Ausgabe von Kamerabildern sehr viele Pixel durch Rauschen um die Binarisierungsschwelle schwanken. Durch dieses Schwanken kommt es zu einem Vibrieren der entsprechenden Dots, was ein Abtasten unmöglich macht. Durch Zwischenspeichern der vorherigen Ausgabedaten ist ein Hystereseeffekt implementiert, dessen Stärke durch die Variable mit der Bezeichnung *hys* innerhalb des Moduls bestimmt wird.

Für die Ausgabe bedeutet das, dass der Schwellwert für Dots die „low“ sind um die Größe *hys* erhöht wird und für Dots die „high“ sind um die Größe *hys* vermindert wird. Durch diesen Hystereseeffekt wird das Vibrieren der Dots sehr wirkungsvoll unterbunden.

In Abbildung 3.14 erkennt man das Modul *VTD-Out*, welches das durch die übergeordneten Module vorverarbeitete Bild ausgibt. Man erkennt oben im Modul das mit Nummer 1 gekennzeichnete Ausgabebild. Die aktuelle Position der Ausgabematrix wird als gestrichelt gezeichnetes Rechteck (Nummer 2) im Ausgabebild dargestellt. Unten im Modul ist der Position entsprechend die Ausgabe auf der Ausgabematrix graphisch dargestellt (Nummer 3). Mit Nummer 4 ist das Ausgabefeld für die Rohdaten des Positionssensors und des Schaltzustandes der Schalter, welche sich auf der Ausgabematrix befinden, gekennzeichnet.

Bei der Umrechnung der Daten des Positionssensors in Koordinaten des Ausgabebildes wird der ungleiche Pixelabstand der Ausgabematrix mit eingerechnet. Für ein sicheres Abtasten ist es wichtig, dass horizontale und vertikale Linien auf der Abtastfläche ihre Richtung beibehalten und es nicht zu einem „Wandern“ der Linien beim Abtasten kommt. Für den Umrechnungsfaktor in x-Richtung ergibt sich experimentell der Wert von 39, das bedeutet, wenn der Positionssensor 39 Schritte in x-Richtung erkennt hat die Ausgabematrix sich im Bezug zum Bild um ein Pixel nach rechts verschoben. Entsprechend ergibt sich in y-Richtung ein Umrechnungsfaktor von 29. Das Verhältnis der beiden Umrechnungsfaktoren entspricht dem Verhältnis vom mittleren

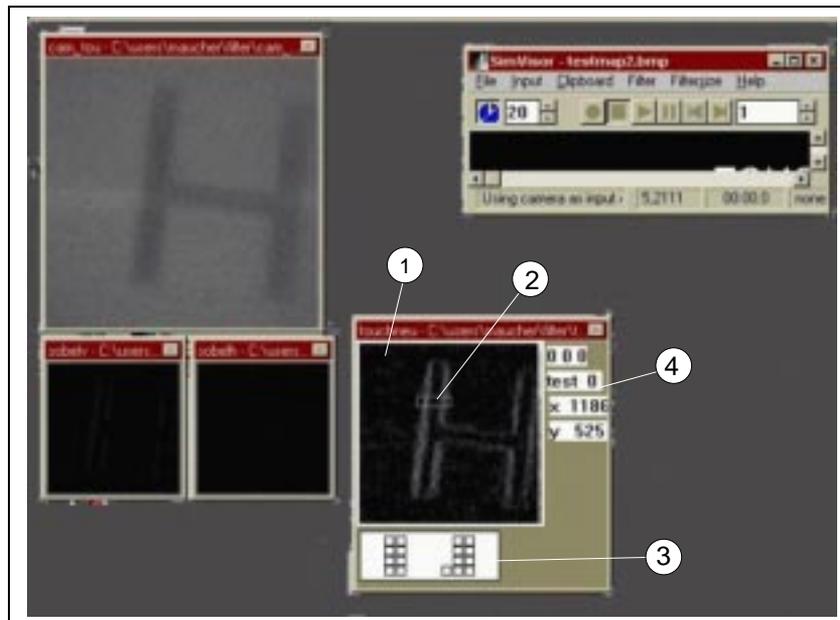


Abbildung 3.14: Die Abbildung zeigt das Ausgabemodul *VTD-Out* mit dem Eingabebild von dem vorverarbeiteten Kamerabild (weitere Beschreibung siehe Text).

Dot-Abstand in x-Richtung zum mittleren Dot-Abstand in y-Richtung (siehe Seite 20).
Innerhalb des Moduls können im Initialisierungsfile bzw. mit der rechten Maustaste folgende Einstellungen vorgenommen werden:

width: Gibt den Umrechnungsfaktor in x-Richtung von Sensorkoordinaten in Bildkoordinaten an.

height: Eigenschaften wie oben, nur für die y-Richtung.

level: Gibt den Schwellwert für die Binarisierung an.

hys: Ist der Wert der halben Breite der Hysterese.

with_start_stop: Gibt an, ob das Bild kontinuierlich ausgegeben wird oder nur beim drücken der linken Taste auf der Abtastmatrix erneuert wird.

invertiert: ermöglicht eine Invertierung der Ausgabedaten.

3.4.4 Das Aufzeichnen der Daten

Parallel zum Abtasten wird für jedes Bild eine Datei aufgenommen. Diese Datei enthält im Vorspann alle für die Auswertung wichtigen Daten über die Einstellungen im Modul *VTD-Out*, des Weiteren Angaben zur Zeit und den Dateinamen. Im nachfolgenden Datenteil wird mit der im Hauptfenster eingestellten Frequenz (ν_0) die Position der Ausgabematrix abgelegt. Das

Datenformat ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Die Größen px und py enthalten die Position der Ausgabematrix in Bildkoordinaten mit dem Koordinatenursprung in der unteren linken Ecke. Als Referenz wird der in Abbildung 3.4 gekennzeichnete Referenz-Dot verwendet. Die Größe n ¹⁷ entspricht einem Zähler, der die Ausgaben mitzählt. Die Größen mx und my werden zur Kontrolle mit aufgezeichnet. Sie entsprechen der Ausgabe des Positionssensors, welcher seinen Koordinatenursprung am Referenzpunkt des Nullpunktsensors hat.

Man erkennt deutlich, dass der Proband erst bei $n = 17$ angefangen hat, die Ausgabematrix zu bewegen¹⁸. Dieser variable und in jeder Datei vorhandene Offset wird später bei der Auswertung in den Berechnungen berücksichtigt.

```
#####
# c:\users\maucher\daten\luk0002.txt.txt
# Mon Jun 08 17:27:25 1998
## sx=          = 48          ##
## sy=          = 60          ##
## width=       = 39          ##
## height=      = 29          ##
## level        =127         ##
## hys          = 20          ##
## with_start_stop= 0        ##
#px  py        n      mx     my    ##
#####
40  56         0       0     0
40  56         1       0     0
40  56         2       0     0
40  56         3       0     0
40  56         4       0     0
40  56         5       0     0
40  56         6       0     0
40  56         7       0     0
40  56         8       0     0
40  56         9       0     0
40  56        10       0     0
40  56        11       0     0
40  56        12       0     0
40  56        13       0     0
40  56        14       0     0
40  56        15       0     0
40  56        16       0     0
40  55        17         9    29
40  53        18        27    94
39  51        19        43   162
39  49        20        56   226
39  47        21        69   288
38  45        22        88   346

:
:

## Zeitdiff: 29.000000 in[s]      ##
## Endzeit                          ##
## Mon Jun 08 17:27:54 1998      ##
#####
```

Abbildung 3.15: Ausschnitt aus einer aufgezeichneten Datei.

¹⁷In manchen Dateien wird noch die Arbeitsdefinition *time* verwendet.

¹⁸Die Nullpunktreferenz ist gekennzeichnet durch die Daten $px = nx = 40$ und $py = ny = 60$.

Software-Routine für das schreiben der Daten

Um die in Kapitel 4.7 vorgenommene Fehlerbetrachtung verständlich zu machen, muss kurz die Software-Routine beschrieben werden, mit der die Daten niedergeschrieben werden.

Die Steuerung der Zeit wird über das Hauptfenster des *Visor-Programms* geregelt. Das Hauptfenster kontrolliert die Zeit mit einem vom Betriebssystem bereitgestellten Zähler. Dieser Zähler, der mit dem Befehl `QueryPerformanceCounter` aufgerufen wird, bietet zusammen mit der ebenfalls abrufbaren Prozessorfrequenz eine Zeitskala, die mindestens auf dem 1 % Niveau genau ist. Mit dieser Zeitskala wird mit der eingestellten Frequenz ν_0 das oberste Weiterverarbeitungsmodul aktualisiert (vgl. Abbildung 3.16). Vom Hauptprogramm wird gesteuert, dass die Aktualisierungsrate die eingestellte Frequenz nicht überschreitet, jedoch ist keine Kontrolle für die Unterschreitung dieser Frequenz vorgesehen. Bei jeder Aktualisierung des *VTD-Out-Moduls* werden die Daten des Positionssensors in eine Datei abgelegt (vgl. Kapitel 3.4.4). Aus diesen regelmäßig niedergeschriebenen Daten berechnet sich die Zeitskala, die der Auswertung in Kapitel 4.3 zugrunde liegt.

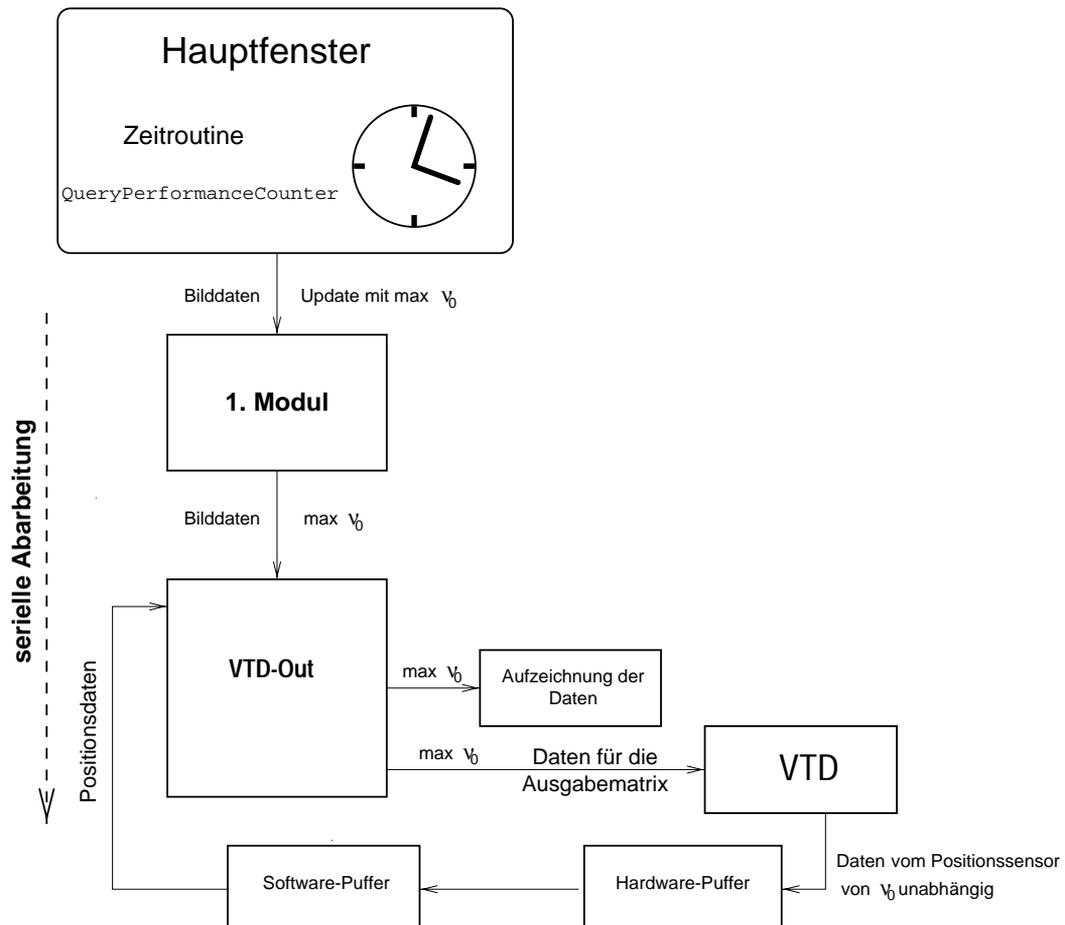


Abbildung 3.16: Darstellung des zeitlichen Ablaufes innerhalb des *Visor-Programmes*.

3.5 Das Zeitmanagement der Daten

Das zeitliche Zusammenspiel der Daten auf dem *VTD* wird von der internen Uhr im Hauptfenster des *Visor-Programms* bestimmt. Die Anzahl der Bilder, die maximal pro Sekunde ausgegeben werden können, hängt von vielen Faktoren ab. Einer der Faktoren, der nicht zu beeinflussen ist, ist die Geschwindigkeit der CPU des Rechners. Alle aufgeführten Zahlenwerte skalieren mit der Taktfrequenz des verwendeten Rechners. Für das *HTVSS* steht ein Notebook der Firma Toshiba zur Verfügung, das mit einer Pentium P90 CPU der Firma Intel und 40 *MByte* RAM ausgestattet ist. Die aufgeführten Ergebnisse beziehen sich auf Messungen mit diesem Rechner, wobei keine weiteren Prozesse im Hintergrund ablaufen.

Weiter gilt es zu berücksichtigen, dass durch die Implementierung der Bildverarbeitungsoperationen als Multiplikation des Bildes mit der Filtermatrix die Rechengeschwindigkeit quadratisch von der Filtergröße und der Größe der Module abhängt [Jähne 93]. Somit beziehen sich die Werte auf eine einheitliche Modulgröße von 64×64 , entsprechend der Auflösung der verwendeten Kamera. Des Weiteren finden bei der Messung ausschließlich Filter mit einer 3×3 Filtermatrix Verwendung. Durch das lineare Hintereinanderschalten mehrerer Weiterverarbeitungsmodul addieren sich die Verarbeitungszeiten der einzelnen Module und beschränken so die maximale Ausgabefrequenz.

Der letzte Faktor, der die maximale Ausgabefrequenz beschränkt, ist die Zeit, welche benötigt wird, um den Inhalt der einzelnen Module auf dem Bildschirm darzustellen. Um die maximale Ausgabe festzustellen, ist nur das erste und letzte Modul auf Bildschirmausgabe eingestellt.¹⁹ Es ergeben sich folgende Ergebnisse:

- Bei der direkten Ausgabe von Ausschnitten von Grafiken ohne weitere Bildverarbeitungsschritte wird die Abtastmatrix auf dem *VTD* maximal alle $15,6 \pm 0,3 \text{ ms}$ aktualisiert. Was zur der unten genannten Update-Rate führt:

$$\nu_{aus} = 64 \pm 1,5 \text{ Hz}$$

Für die serielle Ausgabe benötigt man $99 (16 \cdot \#Braillemodule + 3)$ Ausgaben auf der IO-Karte. Vergleicht man nun die maximale Ausgabefrequenz ν_{aus} mit den Werten von Kapitel 3.2.1, erkennt man, dass sich dieser Wert noch um den Faktor 5 von der maximalen, nur von der Ausgaberate der IO-Karte beschränkten, Ausgabefrequenz von 344 Hz unterscheidet.

- Die Kamerasoftware und Hardware machen ein Auslesen und Anzeigen des Kamerabildes innerhalb von $41.7 \pm 14.3 \text{ ms}$ möglich. Daraus ergibt sich eine Ausgabefrequenz von:

$$\nu_{Kamera} = 24 \pm 4 \text{ Hz}$$

- Bei der Ausgabe mit einlesen des Kamerabild, Bildverarbeitung und Ausgabe von den Bildern auf dem *VTD* ergibt sich eine Ausgabefrequenz bei Verwendung der beiden Sobelfilter und des Mixfilters zur Kantendetektion von:

$$\nu_{Sobel} = 9.75 \pm 0.2 \text{ Hz}$$

¹⁹Bei jedem Modul kann mit der Einstellung *visible* die Bildschirmausgabe ein- oder ausgeschaltet werden.

und bei Verwendung des morphologischen Filters zur Kantendetektion lässt sich eine Ausgaberate von:

$$\nu_{Morph} = 11.0 \pm 0.75 Hz$$

erreichen.

- Bei der Ausgabe der Daten, die vom *Pingpong*-Modul erzeugt werden ist die maximale Ausgaberate:

$$\nu_{Pingpong} = 33.5 Hz \pm 1.5 Hz$$

Kapitel 4

Einsatz des *VTD*

4.1 Die Fragestellung

Für die Erprobung des *VTD* ist ein Testverfahren entwickelt worden, das zur Klärung folgender Fragestellung dient:

1. Inwieweit können Figuren¹ auf dem *VTD* erkannt werden?
2. Inwieweit ist es stark sehbehinderten Personen möglich, die Figuren durch Abfahren auf der virtuellen Matrix zu erkennen?
3. Inwieweit wird das Abtasten durch die geometrischen Abmessungen des *VTD* beeinflusst?
4. In welchem Zeitrahmen können Figuren erkannt werden?
5. Ist es sinnvoll eine Abtastmatrix mit einer größeren Anzahl von Dots pro Flächeneinheit zu verwenden?
6. Gibt es eine ideale Größe für die Abtastmatrix?
7. Inwieweit ist es möglich bewegte Figuren bzw. den Verlauf einer Bewegung zu erkennen?
8. Welche Anforderungen müssen an die zukünftige Bildverarbeitung gestellt werden oder ist das vorhandene Bildverarbeitungskonzept ausreichend?
9. Ist es möglich Größenverhältnisse richtig einzuschätzen?
10. Wie gut ist das Auflösungsvermögen des *VTD* ?

¹Der Begriff **Bild** bezeichnet in dieser Arbeit die Gesamtdarstellung auf der Abtastfläche und der Begriff **Figur** wird für den Bildinhalt verwendet. So beinhaltet z.B. Bild 0033 (siehe Abbildung 4.3) drei Figuren, jede der drei Figuren stellt ein Quadrat dar, wobei die Figuren die gleiche Größe haben und somit identisch sind.

Das Testverfahren bietet zusammen mit dem Aufzeichnen der Bewegungen der Ausgabematrix die Möglichkeit Untersuchungen zur taktilen bzw. haptischen² Wahrnehmung vorzunehmen. Von besonderem Interesse für das *Vision-Projekt* ist die Beantwortung folgender Fragen:

1. Zeigt sich ein signifikanter Unterschied beim Erkennen von geometrischen Figuren zwischen der Gruppe der Blinden und der normalsehenden Vergleichsgruppe?
2. Welche Strategie verfolgen die Probanden beim Abtasten?
3. Gibt es signifikante Unterschiede hinsichtlich der Strategie zwischen den beiden Gruppen?
4. Welche Formen werden besser erkannt und welche schlechter?
5. Gibt es Strukturen innerhalb der Figuren, an denen sich die Probanden besonders lange aufhalten?

4.2 Die Methode

4.2.1 Der Aufbau des Testverfahrens

Das Testverfahren beinhaltet 60 Bilder, die nacheinander zum Abtasten auf dem *VTD* dargeboten werden. Die Bilder lassen sich in eine Vorbereitungsreihe und 10 Testreihen einteilen.

Die Vorbereitungsreihe dient zum Kennenlernen des *VTD*. Der Proband wird in den Testablauf eingeführt und mit den drei Grundfigurentypen:

- Figuren mit horizontalen und vertikalen Linien
- Figuren mit diagonalen Linien
- Figuren mit gekrümmten Linien

bekannt gemacht (siehe Abbildung 4.1).

Um das im weiteren Verlauf notwendige großflächige Abtasten einzuüben, dient das in Kapitel 3.4.2 beschriebene *Pingpong Spiel*. Die Aufgabe des Probanden besteht darin, den sich bewegenden Ball auf dem *VTD* zu verfolgen.

In **Testreihe 2–5** (siehe Abbildung 4.2) sind jeweils sechs Figuren dargestellt, wobei pro Reihe immer drei unterschiedliche Figuren in zwei verschiedenen Größen vorkommen. Die Figuren innerhalb einer Reihe unterscheiden sich in der Anzahl der verwendeten Linien.

- Von Reihe 2 zu Reihe 3 können die Figuren zusätzlich zu den horizontalen und den vertikalen Linien auch schräge Linien beinhalten.
- Bei Reihe 4 kommen zusätzlich gekrümmte Linien hinzu.
- In Reihe 5 wird eine Auswahl der Figuren aus Reihe 2-4 angeboten.

²Die Begriffe taktil und haptisch werden in Kapitel 4.6.1 auf Seite 60 genauer spezifiziert.

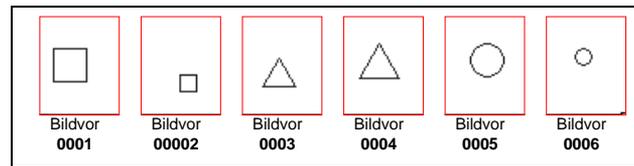


Abbildung 4.1: Vorbereitungs-Testreihe

Bei den Figuren der ersten vier Reihen kommen nur zwei Größen vor, wobei als Größe die Absolutmaße in x- und y-Richtung definiert sind. Das ergibt die Möglichkeit, die Figuren zusätzlich je nach Größe in zwei Klassen einzuteilen.

Testreihe 6 (siehe Abbildung 4.3) dient zum Ermitteln der Auflösungsgrenze beim Er-tasten auf dem *VTD*. Zu diesem Zweck werden unterschiedlich viele parallele Linien gleichzeitig dargestellt. Der Abstand der Linien unterscheidet sich von Bild zu Bild. Die Aufgabe besteht darin, die Anzahl der dargestellten Linien zu bestimmen.

In **Testreihe 7** (siehe Abbildung 4.4) werden unterschiedlich viele identische Quadrate gleichzeitig auf die Ausgabe projiziert deren Anzahl der Proband feststellen soll. Die Bilder unterscheiden sich in der Anzahl der dargestellten Quadrate und im Abstand der einzelnen Figuren voneinander. Das Ziel ist festzustellen, inwieweit sich einzelne Figuren noch unterscheiden lassen.

Mit **Testreihe 8** wird festgestellt, inwieweit sich verschiedene Größen auf dem *VTD* differenzieren lassen. Zu diesem Zweck sind jeweils zwei verschieden große Quadrate gleichzeitig auf das *VTD* projiziert und der Proband muss bestimmen, welches der beiden Quadrate das größere ist (siehe Abbildung 4.5).

Bei **Testreihe 9** geht es um das Erkennen einfacher unbekannter Figuren (siehe Abbildung 4.6).

Bei der **Testreihe 10** handelt es sich um das Erkennen von sogenannter Snodgrass-Figuren [Snodgrass 80], welche *Snodgrass* für Bestimmungstests zur Wahrnehmung entwickelt hat. Diese Figuren sind aus einer Auswahl von 260 Figuren ausgewählt. Sie finden auch Verwendung bei einer ähnlichen Testreihe zur taktilen Wahrnehmung (vgl. [Loomis 91]) (siehe Abbildung 4.7).

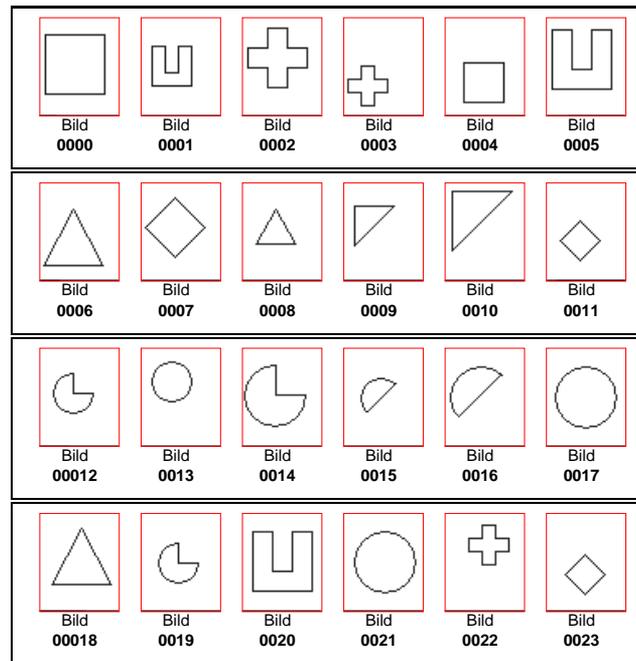


Abbildung 4.2: Testreihe 2-5

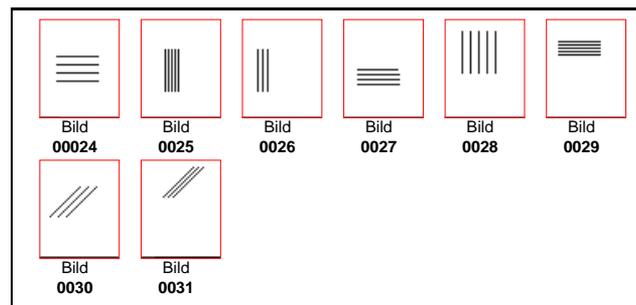


Abbildung 4.3: Testreihe 6

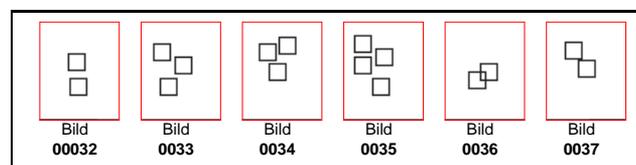


Abbildung 4.4: Testreihe 7

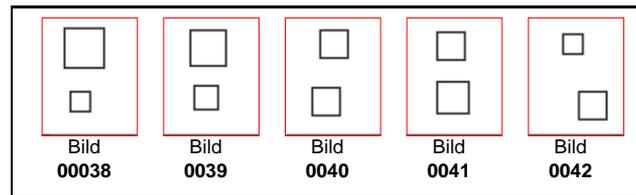


Abbildung 4.5: Testreihe 8

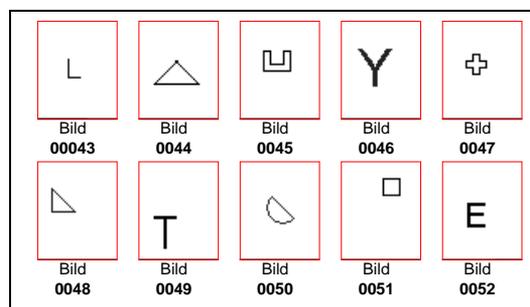


Abbildung 4.6: Testreihe 9

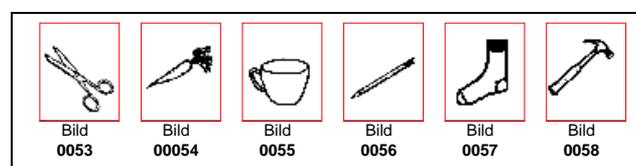


Abbildung 4.7: Testreihe 10

identische Figuren		kongruente Figuren			
1. Bild	2. Bild	1. Bild	2. Bild	3. Bild	4. Bild
0003	0022	0000	0004	0051	
0005	0020	0001	0005	0020	0045
0006	0018	0002	0003	0022	0047
0012	0019	0006	0008	0018	
0017	0021	0007	0011	0023	
0011	0023	0009	0010	0048	
		0012	0014	0019	
		0013	0017	0021	
		0015	0016		

Tabelle 4.1: Zuordnung von identischen und kongruenten Figuren innerhalb der Testreihen.

Bei den Testreihen kommt es zusätzlich noch zu einem wiederholten Auftreten von identischen und von kongruenten³ Figuren in verschiedenen Bildern. Die Bilder sind in unregelmäßigen Abständen auf dem Test verteilt und die Figuren haben eine unterschiedliche Lage innerhalb des Bildes. Um innerhalb der Testreihen die Bilder leichter zuzuordnen, sind in Tabelle 4.1 links alle identischen Figuren und auf der rechten Seite alle kongruenten Figuren aufgeführt.

4.2.2 Die Stichprobe

Die Stichprobe umfasst insgesamt 10 Probanden, wovon 6 blind und 4 normal sehend sind. Der Test ist für alle Probanden unbekannt gewesen, auch ist keiner in die Entwicklung des VTD involviert.

Die sehenden Probanden sind Studierende, die sich freiwillig und aus eigener Motivation bereiterklärt haben bei diesen Tests mitzuwirken. Der Altersbereich der sehenden Probanden liegt zwischen 21;4–30;3 Jahren⁴ (Durchschnitt 27;6 Jahre) wobei zwei weiblichen und zwei männlichen Personen an dem Test teilnahmen. Alle haben bisher keine Erfahrungen mit Tests zur taktilen Wahrnehmung gehabt.

Bei der Gruppe der Blinden handelt es sich um sechs männliche Jugendliche im Alter zwischen 15;5 und 24;8 Jahren (Durchschnitt 18;2 Jahre). Die Auswahl von ausschließlich männlichen blinden Probanden ist rein zufällig und hat keine weitere Bedeutung. Bei den Probanden E bis H handelt es sich um Schüler der Schloss-Schule Ilvesheim⁵, an der auch die Tests stattgefunden haben. Die Schüler gehören nach Auskunft der Lehrer zu den Leistungsstützen in ihrer jeweiligen Klasse. Die Probanden I und J haben auf einem allgemeinbildenden Regelgymnasium ihr Abitur erworben und studieren zur Zeit bzw. sind im Begriff zu studieren.

³Kongruent bedeutet, dass die Figuren sich nur durch ihre Größe unterscheiden.

⁴23;3 bedeutet 23 Jahre und 3 Monate.

⁵Die Schloss-Schule Ilvesheim ist eine Schule für blinde und sehbehinderte Schüler.

Von den blinden Jugendlichen haben alle bis auf Proband F kein Restsehvermögen. Proband F kann nach eigenen Angaben nur hell und dunkel unterscheiden, wenn ein sehr großer Intensitätsunterschied dazwischen liegt. Zwei der Jugendlichen verloren ihr Restsehvermögen in den ersten 5 Lebensjahren, bei den anderen handelt es sich um drei geburtsblinde Personen.

4.2.3 Der Ablauf

Der Test ist mit den sehenden Probanden am Institut für Hochenergiephysik und mit den blinden Schülern in ihrer gewohnten Umgebung in der Schule durchgeführt worden. Die beiden blinden Studenten sind für die Untersuchung in die Augenklinik der Universität Heidelberg gekommen.

Für die Testdurchführung sind zwei Stunden eingeplant, bei den blinden Schülern ist der Test gekürzt worden, damit in der zur Verfügung stehenden Zeit mit einer größeren Anzahl von Schülern gearbeitet werden konnte. Die Testreihen 6 und 9 wurden für diesen Zweck ohne größere Einschränkung für die Ergebnisse gestrichen.

Nach dem Bekanntmachen mit dem *VTD* mit Hilfe der Vorbereitungs-Testreihe ist es dem Testleiter freigestellt, zusätzlich zum Einüben des großflächigen Abtasten, das *Pingpong Spiel* einzusetzen oder gleich mit der Testreihe 2 zu beginnen.

Für das Erkennen der Figuren wird nach folgendem Schema vorgegangen:

- Zu Beginn einer jeden Reihe wird dem Probanden mitgeteilt, was für Figuren er zu sehen⁶ bekommt. Der Testleiter richtet sich nach den Anweisungen auf den Auswertungsbögen (siehe Anhang B).
- Jedes Abtasten einer neuen Figur beginnt am oberen rechten Punkt der Abtastfläche, der sogenannten Nullpunktreferenz (siehe Seite 27).
- Die Probanden sollen, wenn sie glauben eine Figur erkannt zu haben, wieder auf diese Position zurückfahren und dem Testleiter mitteilen, was sie sehen.
- Nach spätestens 2 Minuten bricht der Testleiter den Tastvorgang ab, wenn bis zu diesem Zeitpunkt die Figur noch nicht erkannt wird.
- Nach dem Erkennen oder nach dem Abbruch wird dem Testteilnehmer gesagt, ob die von ihm gesehene Figur mit der dargestellten übereinstimmt.
- Bei Differenzen zwischen dargestellter und wahrgenommener Figur wird die Figur nochmals abgefahren, wobei der Testleiter die Figur beschreibt.

⁶Ich werde ab hier den auch in der Sehbehinderten- und Blindenpädagogik üblichen Begriff des Sehens für alles was erkannt wurde bzw. für Dinge die ertastet wurden verwenden.

- Der Testleiter notiert, ob die Figur richtig, falsch oder nicht erkannt wird sowie alle für die Auswertung wichtigen Bemerkungen der Probanden auf dem Auswertungsbogen.
- Nachdem ein neues Bild eingestellt und eine neue Datei eingerichtet ist, beginnt der Testablauf von vorne.

Am Schluss des Tests wird das *Pingpong Spiel* eingespielt, wobei wie in dem Auswertungsbogen erläutert die Anzahl der „Ballverluste“ und die benötigte Zeit zum Wiederauffinden notiert wird.

4.3 Auswertung der Daten

Für die Auswertung der Daten werden durch verschiedene Programme alle wichtigen Kenngrößen aus den aufgezeichneten Daten berechnet. Die wichtigsten Kenngrößen sind:

Erkennungszeit

Die Erkennungszeit ist die Zeit in Sekunden, die der Proband benötigt, um die ihm gestellte Aufgabe zu lösen. Es wird die Zeitdifferenz bestimmt zwischen dem ersten Bewegen, weg von der Nullpunktreferenz bis zum Wiederrerreichen dieses Punktes. Im weiteren Verlauf wird diese Zeit mit einem T gekennzeichnet. Für die Berechnung dient folgende Formel:

$$k_n = 1 \quad \forall \quad px_n \neq nx \wedge py_n \neq ny \quad \text{sonst} \quad k_n = 0$$

$$\Rightarrow \quad T = \frac{1}{\nu_0} \sum_{n=0}^{n_{max}} k_n \quad (4.1)$$

Geschwindigkeit

v_n : Die Momentangeschwindigkeit v_n in der Einheit [Pixel/s] bezeichnet die Geschwindigkeit mit der die Ausgabematrix bewegt wird. Sie wird mit folgender Formel berechnet:

$$dx = px_n - px_{n-1} \quad \text{und} \quad dy = py_n - py_{n-1}$$

$$\Rightarrow \quad v_n = \nu_0 \cdot \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (4.2)$$

v : Die über ein Bild gemittelte Geschwindigkeit v in der Einheit [Pixel/s] ergibt sich somit durch:

$$v = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{n_{max}} \sqrt{dx_n^2 + dy_n^2} \quad (4.3)$$

Minimaler Abstand

Der Minimalabstand ist eine Kenngröße, die die minimale Entfernung vom Referenzdot der Ausgabematrix zu der Figur in der Einheit [Pixel] angibt. Sie wird berechnet indem zu jedem Datenpunkt der minimale Abstand zu einem Pixel des Ausgabebildes, dessen Grauwert größer als das Binarisierungsniveau (*binlevel*) ist, berechnet wird. Diese Größe wird im Weiteren mit cda ⁷ bezeichnet:

$$\text{mit} \quad cda_n = \min_{f(p) > binlevel} \left(\sqrt{(f(p)_x - px_n)^2 + (f(p)_y - py_n)^2} \right)$$

$$\Rightarrow \quad cda = \frac{1}{T \cdot \nu_0} \sum_{n=0}^{n_{max}} min_n \cdot k_n \quad (4.4)$$

⁷closest distance of approach

Zeit ohne Kontakt

t_nocon : Diese Größe bestimmt die Zeit in der die Ausgabematrix keinen Kontakt mit der Figur hat und somit auch keine Dots angesteuert werden. Für diese Größe wird im Folgenden die Variable t_nocon und für die auf die Erkennungszeit normierte Variable t_nocon_r verwendet. Die Größe berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{mit } cda_x_n &= \min_{f(p) > binlevel} (f(p)_x - px_n) \\ \text{und } cda_x_n &= \min_{f(p) > binlevel} (f(p)_y - py_n) \\ \Rightarrow l_n &= 1 \quad \forall \quad -5 \not\leq cda_x_n \not\leq 6 \wedge -1 \not\leq cda_x_n \not\leq 2 \quad \text{sonst } l_n = 0 \\ \Rightarrow t_nocon &= \frac{1}{\nu_0} \sum_{n=0}^{n_{max}} k_n \cdot l_n - t_firstcon - t_lastcon \end{aligned} \quad (4.5)$$

$t_firstcon$: Diese Größe bezeichnet die Zeit, die benötigt wird bis zum ersten Male Dots auf der Ausgabematrix ausgegeben werden.

$t_lastcon$: Die Größe ist entsprechend der Größe $t_firstcon$ für die Zeit, die benötigt wird bis die Matrix wieder am Referenzpunkt angelangt ist.

Anzahl

Mit Anzahl (A) steht eine Größe zur Verfügung, die angibt wieviel Dots im Durchschnitt ausgegeben werden. Bei der Normierung der Kenngröße Anzahl werden nur Zeitpunkte berücksichtigt an denen auch Dots der Ausgabematrix angesteuert werden. Wenn $D_{\mu\nu}$ die einzelnen Dots der Ausgabematrix bezeichnet, wobei mit $\mu \nu$ die Matrix entsprechend der Schreibweise $\mu \times \nu$ durchgezählt wird (siehe Abbildung 4.8) und $D_{\mu\nu} = 1$ ist, falls der entsprechende Dot angezeigt wird, (sonst $D_{\mu\nu} = 0$) ergibt sich für die Berechnung:

$$A_n = \sum_{\mu=0}^{11} \sum_{\nu=0}^3 D_{\mu\nu} \quad (4.6)$$

$$A = \frac{1}{T - (t_nocon + t_firstcon + t_lastcon)} \sum_{n=0}^{n_{max}} A_n \quad (4.7)$$

Quotient

Der Quotient (r) gibt das Verhältnis des Weges in y-Richtung zum Weg in x-Richtung an. Für die Größe r ergibt sich:

$$r = \frac{\sum dy}{\sum dx} \quad (4.8)$$

Schwerpunkt

Zusätzlich wird zu 4.7 noch der Schwerpunkt in x-Richtung der ausgegebenen Dots berechnet. Jeder angezeigte Dot wird mit dem Abstand zur Referenzlinie gewichtet. Der Gewichtungsfaktor $g_{\mu\nu}$ ist aus Abbildung 4.8 ersichtlich. Um auf eine einheitliche Größe zu kommen, wird die Summe aller angezeigten und mit dem entsprechenden Gewichtungsfaktor multiplizierten Dots pro Datensatz gebildet. Anschließend wird der Wert mit A_n aus Formel 4.6 normiert. Für einen treffenden Kennwert co ⁸ werden diese Werte addiert und wie die Größe A normiert. Der Algorithmus der Berechnung ergibt sich somit wie folgt:

$$co_n = \frac{1}{A} \sum_{\mu=0}^{11} \sum_{\nu=0}^3 D_{\mu\nu} \cdot g_{\mu\nu}$$

$$co = \frac{1}{T - (t_{nocon} + t_{firstcon} + t_{lastcon})} \sum_{n=0}^{n_{max}} co_n \quad (4.9)$$

Ort-Zeit-Plots

Wichtige Aussagen können zudem aus den *Ort-Zeit-Plots* ausgelesen werden. Bei diesen Diagrammen wird die Aufenthaltsdauer des Referenzdots in einem Cluster des Ausgabebildes mit Farbe kodiert. Von besonderem Interesse ist die Cluster-Größe 2×2 , da sie dem Mittelpunkt der Ausgabematrix entspricht. Bei der Darstellung ist es nötig die maximale Anzahl von Einträgen in einen Pixelbereich zu beschränken. Somit ist gewährleistet, dass bei einem Stillstand der Ausgabematrix die Skalierung nicht beeinträchtigt wird. Bei der vorliegenden Berechnung wurde die maximale Zeit in einem Pixel auf 0.5 s beschränkt. Die Zuordnung zwischen Cluster-Größe und Ausgabematrix ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

Weg-Zeit-Plots

Zur weiteren Untersuchung der Strategie des Abtastens ist der zurückgelegte Weg d.h. alle px - und py -Werte in ein Diagramm eingezeichnet (siehe Anhang F). Die Zeit wird in diesen sogenannten *Weg-Zeit-Plots* in Farbe kodiert. Es ist somit möglich die Verfahrstrecke des Probanden nachzuvollziehen. Bei den Diagrammen ist die unterschiedliche Kodierung der Zeit zwischen den Probanden A–D und den Probanden E–J zu beachten. Bei der Kodierung der Zeit findet hier Formel 4.1 Verwendung.

⁸center of output

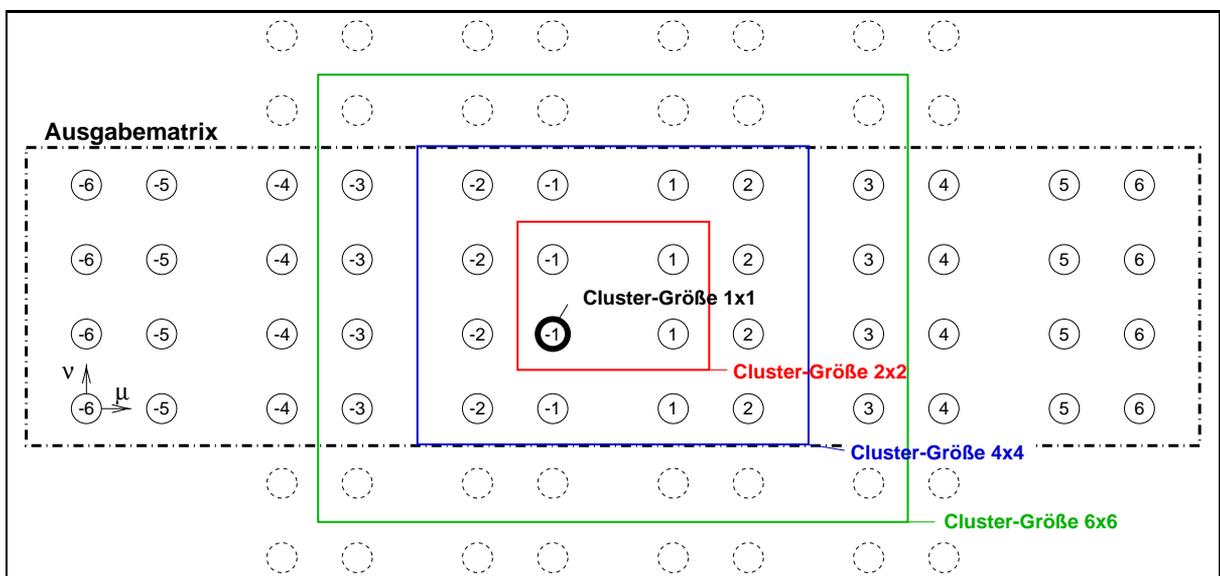


Abbildung 4.8: Veranschaulichung der Cluster in den einzelnen *Ort-Zeit-Plots* und der Gewichtungsfaktoren $g_{\mu\nu}$ zur Schwerpunktsbestimmung.

4.4 Ergebnisse

Die 10 Probanden bilden zwei Gruppen, Probanden A–D die Gruppe der Sehenden und Probanden E–I die Gruppe der Blinden. Bei den Untersuchungen zeigt sich, dass von allen blinden Probanden die Funktionsweise des *VTD* ohne größere Erklärungen verstanden wird. Somit ist es möglich bereits nach kürzester Übungsphase mit dem Test zu beginnen. Es ist auch bei keinem Probanden nötig gewesen, das *Pingpong-Spiel* zum Einüben von großflächigen Bewegungen zu verwenden.

4.4.1 Übersicht

Bezogen auf die Testreihen, die von beiden Gruppen durchgeführt wurden, ist die Rate der richtig erkannten Bilder vergleichbar. Sie liegt bei der Gruppe der Blinden bei 94 % und bei der Gruppe der Sehenden bei 91 % (siehe Anhang D.1). Deutliche Unterschiede gibt es in der Zeit, welche die beiden Gruppen zum Erkennen der Figuren und zum Lösen der Aufgaben benötigen. Wie in den Abbildungen D.4 und D.3 ersichtlich, benötigen die blinden Personen durchschnittlich 11.3 s für das Erkennen der Figuren und die Gruppe der Sehenden 26.6 s. Bei der Ermittlung dieser Zahlen sind nur die Ergebnisse der Testreihen 2–5 und 7–8⁹ berücksichtigt, bei denen alle Probanden die Figur richtig erkannt haben.

Auf weitere Beobachtungen hinsichtlich der unterschiedlichen Abtaststrategien der einzelnen Probanden, die unter anderem wahrscheinlich auch für diesen Unterschied verantwortlich sind, wird in Kapitel 4.6 näher eingegangen.

4.5 Ergebnisse in Bezug auf Verwendung des *HTVSS*

4.5.1 Erkennungszeit

Für die Anwendung als ETA ist es wichtig herauszufinden, in welchem Zeitraum die Figuren erkannt werden und wie lange blinde Personen benötigen, sich einen Überblick auf dem *VTD* zu verschaffen. Für die Beantwortung dieser und der Fragen von Kapitel 4.1 spielen nur die Ergebnisse der blinden Personen eine Rolle, da sie zu den potenziellen Anwendern des *HTVSS* zählen.

Wie Abbildung 4.9 zeigt, liegt die mittlere Erkennungszeit bei den einfachen statischen geometrischen Figuren bei 11,0 s¹⁰ und bei den Aufgaben, die das Diskretisieren von Figuren bzw. den Vergleich von Größen beinhalten bei 12,5 s. Es zeigt sich in der Abbildung 4.9 ein deutlicher Gradient von Bild 00 zu Bild 23, obwohl die Komplexität der Figuren nicht abgenommen hat. Es ist somit zu erwarten, dass es den Benutzern des *HTVSS* möglich ist, einfache Figuren wie in den Bildern bzw. auch etwas komplexere Figuren innerhalb von (10 ± 5) s zu erkennen. Es zeigt sich zudem, dass die blinden Probanden in verhältnismäßig kurzer Zeit entscheiden können, ob sie bei noch längerem Tasten, ein mehr an Information über die Figur bekommen können. Bei

⁹Bilder 0000–0023 und 0032–0042

¹⁰Auch hier wurde über alle richtig erkannten Bilder gemittelt.

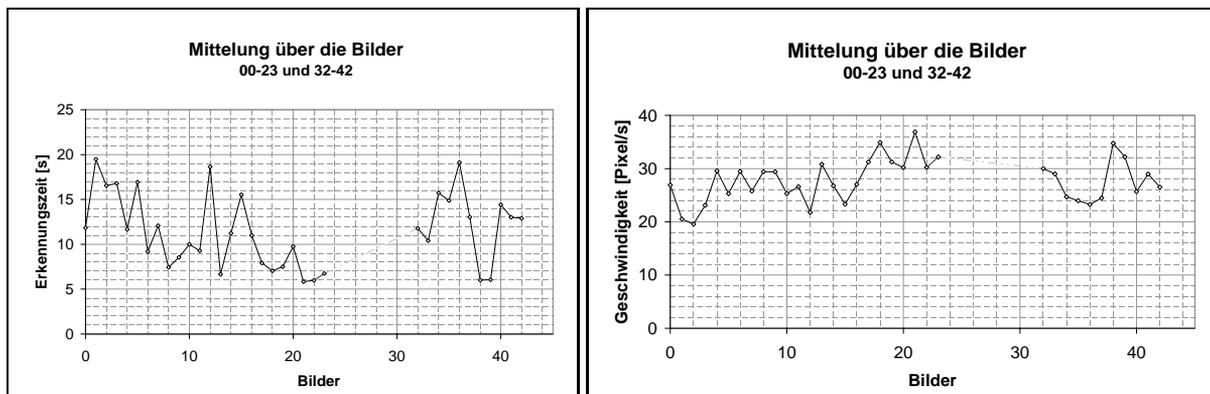


Abbildung 4.9: Die Diagramme zeigen links die Erkennungszeit und rechts die Geschwindigkeit über die Bilder 00–23 und 32–42. Für die Mittelung sind nur die Zeiten der blinden Probanden verwendet, die die Figur richtig erkannt haben.

den sehr komplexen Figuren in den Bildern 53–58 können die blinden Personen meist schon nach 43.5 s entscheiden, ob ein weiteres Abtasten, noch zu einem Ergebnis führt oder nicht. Im Durchschnitt bricht die sehende Vergleichsgruppe erst nach 90.1 s ab.

Bei den gerade angesprochenen sehr komplexen Figuren, speziell die Bilder 53–55, zeigt sich auch, dass das Nichterkennen der Figuren nicht nur auf die Komplexität des Bildes zurückzuführen ist. Bei vielen Probanden fehlt die Vorstellung darüber, was das Gesehene darstellen könnte. Im Speziellen bei der Tasse (Bild 0055) wird das richtige Muster beschrieben, doch ist es keinem Probanden möglich gewesen, dieses mit einer Tasse in Verbindung zu bringen,¹¹ sie haben somit nicht die Möglichkeit das Gesehene zu benennen. Als Hinweis, dass auch sehr komplexe Figuren auf dem VTD erkannt werden können, sei Proband F aufgeführt, der nach 30.7 s erkannte, dass es sich bei dem Gegenstand im Bild 0053 um eine Schere handelt.

Ein Problem des VTD wird an den Spitzen im Diagramm 4.9 bei den Bildern 0011 und 0015 deutlich. Durch die geringe Auflösung erscheint der Halbkreis unrund und eckig, es ist somit schwierig zu erkennen, dass es sich bei der linken Linie um einen Bogen und bei der rechten Linie um eine Gerade handelt. Bei Bild 0012 ergibt sich ein deutliches Problem des Verbalisierens dieser Figur, die später aber sehr gut wiedererkannt wird. Der geringe Gradient zwischen den Bildern 0012 und 0014 ist auch damit zu begründen, dass sich die Figur in Bild 0014 sehr nahe am Rand befindet und somit wie die *Weg-Zeit-Plots* zeigen, schwerer abzutasten ist. Die Probanden haben diese Stelle, in der Nähe des rechten Randes, wie Abbildung 4.10 zeigt, öfters überfahren als andere Figuren.

¹¹Im Anschluss wurde den Probanden vom Testleiter mitgeteilt, dass es sich bei der angebotenen Muster um eine Tasse handelt. Darauf antworteten drei der sechs Jugendlichen mit „... das kann gar nicht sein, eine Tasse ist oben offen.“. Diese Äußerung entspricht der Beschreibung von Zeichnungen blinder Kinder in [Kennedy 97].

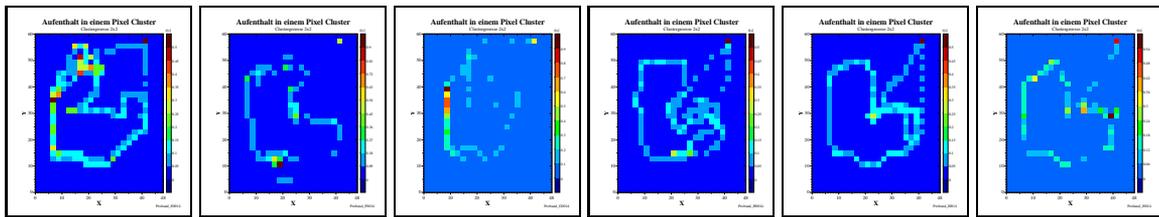


Abbildung 4.10: Das Diagramm zeigt die Aufenthaltsdauer in einem Pixel-Cluster für das Bild 0014. Von links nach rechts sind die Diagramme für Proband E bis J dargestellt

4.5.2 Vergleich von Größen und diskretisieren einzelner Figuren auf dem VTD

Für eine spätere Anwendung als „travel aid“ sind auch die Testreihen 7 und 8, bei denen es auf das Diskretisieren einzelner Figuren ankommt, sehr wichtig. Es zeigte sich, dass es möglich ist, eine Vielzahl von Quadraten auf dem VTD zu erkennen. Bild 0036 zeigt zudem, dass ein Überlappen oder wie in Bild 0037 ein Berühren der Figuren von den Probanden aufgelöst werden kann. Die Rate der richtig erkannten Bilder liegt bei diesen beiden Bildern bei 91.7 %, was etwa dem Schnitt der richtig erkannten Figuren von 89.4 % in diesen beiden Testreihen entspricht. Bei einer zukünftigen Untersuchung mit komplexerer Aufgabenstellung wird sich zeigen müssen, ob sich dieser Effekt weiter bestätigt.

4.5.3 Erkennen von Bewegungen

Bei dem *Pingpong Spiel*, das am Ende des Tests eingespielt wird, zeigt sich, dass es wahrscheinlich durch den Aufbau bedingt, eine Grenzgeschwindigkeit gibt, mit der die Abtastmatrix bewegt werden kann. Die Probanden bewegen die Ausgabematrix in der Geschwindigkeitsstufe *speed2* mit durchschnittlich 18.8 Pixel/s , was im Vergleich mit der Geschwindigkeit des „Balles“ von 10 Pixel/s und dem Anteil der Zeit mit Ballkontakten¹² von ca. 90 % bedeutet, dass die Geschwindigkeit der Ausgabematrix von der bewegenden Figur bestimmt ist. Bei der Einstellung des Spiels auf *speed1*, was einer Geschwindigkeit des Balles von 20 Pixel/s entspricht, ist es den Probanden nur noch sehr schwer möglich gewesen, die Richtung des Balles zu bestimmen und es kommt aus diesem Grund zu sehr vielen Ballverlusten. Im Durchschnitt benötigen die Probanden bei dieser Einstellung ca. 30 % der Zeit, um den Ball zu suchen. Die durchschnittliche Geschwindigkeit der Ausgabematrix bei dieser Testreihe von 31.3 s ist somit sicher sehr nahe an der Grenzgeschwindigkeit des Systems, die bei ca. 40 Pixel/s liegen wird. Wie die Zahlenwerte in Abbildung E.4 in Bezug auf diese Aussage zu interpretieren sind wird auf Seite 66 dargelegt.

Aus der Beobachtung lässt sich schließen, dass es den Probanden nach einer längeren Übungsphase möglich sein wird, bewegten Figuren mit einer Größe von $9 \times 9 \text{ Pixel}$ zu folgen, solange

¹²Zu dem Zeitpunkt des Testes war es nicht möglich, gleichzeitig die Bewegung des Balles und die Bewegung der Ausgabematrix aufzuzeichnen. Aus diesem Grund sind die Ballverluste optisch bestimmt und die Zeit zum Wiederauffinden von Hand gestoppt. Die Zeiten und Prozentangaben sind somit entsprechend ungenau und können eher als Trend gewertet werden.

die Geschwindigkeit der Figur 20 bis 30 *Pixel/s* nicht übersteigt. Für die Praxis bedeutet dies, dass bei einem Öffnungswinkel der Kamera von 27.2° und den geometrischen Abmessungen des Vision-Chips die Geschwindigkeit der aufgenommenen Figur in einem Abstand von 10 m nur zwischen 1.3 m/s und 2.0 m/s liegen darf. Nur wenn der Benutzer die Figur noch verfolgen kann, ist es möglich, die Richtung der Bewegung zu bestimmen. Eine Geschwindigkeit von 2.0 m/s (7.2 km/h) entspricht etwa der Geschwindigkeit eines sehr langsamen Fahrradfahrers oder eines schnellen Fußgängers.

Gegen diese Überschlagsrechnung lässt sich einwenden, dass ein herannahender Gegenstand, der sich nicht senkrecht zur Blickrichtung bewegt seine Größe ändert und sich somit ein weiterer Parameter ergibt, der die Geschwindigkeit eines Gegenstandes charakterisiert. Auch diese Größe ändert sich mit der obigen Geschwindigkeit zusätzlich noch in x- und y-Richtung, was bedeutet, dass der Benutzer nicht nur die Figur verfolgen, sondern auch eine größer werdende Kontur abfahren muss. Die Grenzgeschwindigkeit, die ein herannahender Gegenstand haben darf, um seine Bewegungsrichtung festzustellen wird sich aus diesen Gründen wahrscheinlich eher verringern als vergrößern. Für den Einsatz des *HTVSS* ist die beschränkte Wahrnehmung von schnellen Bewegungen sicher nicht das größte Hindernis. Da das *HTVSS* den auditiven Sinneskanal nicht beeinträchtigt, können diese schnellen Gegenstände auch durch ihr charakteristisches Geräuschspektrum erkannt werden.

4.5.4 Auswirkung der geometrischen Abmessungen der Abtastmatrix

Das *VTD* hat in seinen geometrischen Abmessungen die Besonderheit, dass der Abstand der einzelnen Dots in x-Richtung nicht konstant ist, und dass in y-Richtung die Ausgabematrix auf zwei Schienen gelagert ist. Es stellt sich die Frage, inwieweit sich diese geometrischen Besonderheiten auf das Abtasten auf dem *VTD* auswirken.

In Abbildung 4.11 ist der nach Formel 4.9 berechnete Schwerpunkt der ausgegebenen Dots über die von allen blinden Probanden durchgeführten Testreihen dargestellt. Es zeigt sich, dass sich im Durchschnitt bei allen Probanden der Schwerpunkt der angezeigten Dots in x-Richtung im Mittelpunkt der Abtastmatrix befindet. Da alle Probanden als Tastfinger für das Brailleschriftlesen den Zeigefinger der rechten Hand benutzen und somit auch die Ausgabematrix mit den drei Fingern der rechten Hand führen, ist zu erwarten, dass wenn die Hauptinformationen über den Zeigefinger und den Mittelfinger aufgenommen werden, der *co*-Wert wesentlich kleiner als Null sein wird. Der *co*-Wert ist im Durchschnitt -0.58 , was bedeutet, dass von den Probanden größtenteils die volle Matrixbreite ausgenutzt wird. Die starken Variationen zeigen aber auch, dass durchaus Bilder innerhalb der Testreihe vorhanden sind, bei denen die Probanden ein stärkeres Gewicht auf die linke Seite der Matrix legen. Bei der Interpretation dieser Daten müssen immer das dargestellte Bild sowie die *Weg-Zeit-Plots* als Referenz mit einbezogen werden. Da die Ausgabematrix in x-Richtung 12 Dots besitzt und die Auflösung des *VTD* in dieser Richtung 48 Pixel ist, ergeben sich Situationen wie in Abbildung 4.10 dargestellt, bei denen es den Probanden nicht möglich ist, mit jedem Dot alle Punkte auf der Figur anzufahren.

Die Spitzen der Verteilung in Abbildung 4.11 links sind deutlich bei den Figuren in den Bildern 5, 9, 10 und 14–16. Diese Bilder sind schwieriger als die anderen zu erkennen. Dieses erschwerte Erkennen zeigt sich durch eine erhöhte Erkennungszeit und durch eine geringere Rate

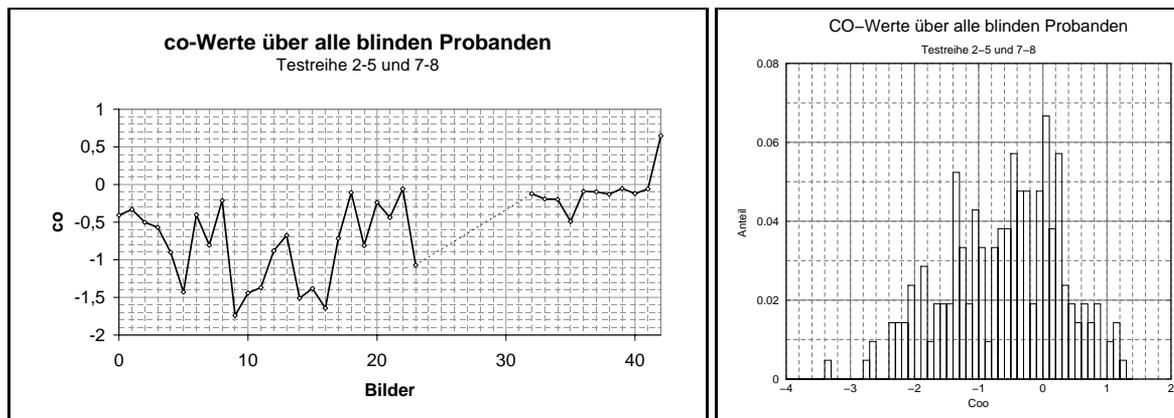


Abbildung 4.11: Schwerpunkt der ausgegebenen Dots (berechnet nach Formel 4.9). Das linke Diagramm zeigt den gemittelten co -Wert über die Bilder und das rechte das Histogramm mit $mean : -0.58$ $rms : 0.896$.

der richtig erkannten Bilder (vgl. Abbildung D.4, D.3 und D.2). Es ist davon auszugehen, dass bei diesen schwierigen Figuren die Probanden mehr mit dem Zeige- und Mittelfinger versuchen die Figur zu erkennen. Die Theorie, dass bei schwierigen Aufgaben, die Probanden größtenteils die Dots des Zeige- und Mittelfingers verwenden bestätigt sich auch in Abbildung 4.12. Es ist zu erkennen, dass bei diesen Bildern durchschnittlich gleichviele Dots angezeigt werden wie bei den Bildern mit $co \approx -0.5$. Das bedeutet, dass der negative co -Wert nicht durch eine geringere Anzahl von dargestellten Dots verursacht wird.

Der Mittelwert der Kenngröße *Anzahl* von 6.80 befindet sich deutlich unter dem arithmetischen Mittel der Anzahl der waagerechten zur Anzahl der senkrechten Dots von 8.00. Es zeigt sich somit nochmals, dass die Probanden beim Abtasten versuchen die Informationen nicht durch Abtasten der Ausgabematrix sondern durch Verfahren der Matrix zu gewinnen.

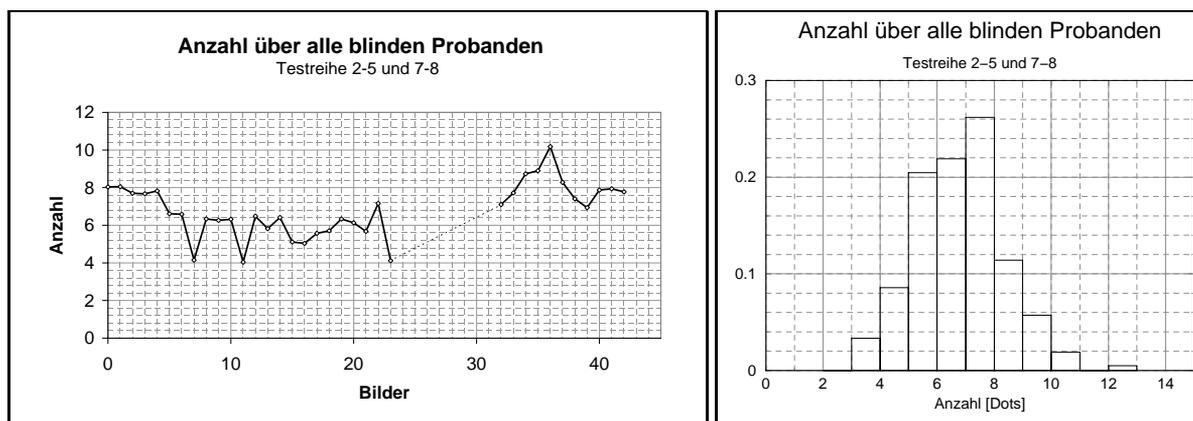


Abbildung 4.12: Anzahl der ausgegebenen Dots (Berechnung nach Formel 4.7). Das linke Diagramm zeigt die gemittelte Anzahl über die Bilder und das rechte das Histogramm mit $mean : 6.80Dots$ $rms : 1.56Dots$.

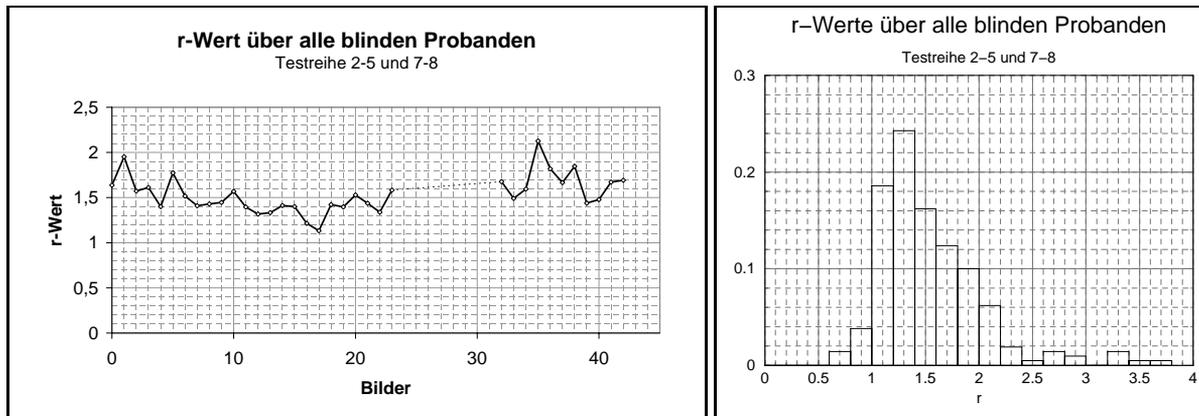


Abbildung 4.13: Vergleich der r -Werte (Berechnung nach Formel 4.8). Das linke Diagramm zeigt die gemittelte r -Wert über die Bilder und das rechte das Histogramm mit $mean : 1.54$ $rms : 0.485$.

4.5.5 Einfluss der Linearführungen auf das Abtasten

Bei dem Aufbau mit zwei Schienen (vgl. Abbildung 3.1) stellt sich die Frage, ob sich die Probanden in x -Richtung signifikant häufiger bewegen, da die Ausgabematrix in dieser Richtung nur auf einer Schiene geführt wird. Es ist auch denkbar, dass die Probanden sich dreimal so häufig in y -Richtung bewegen, da bedingt durch die 4×12 Anordnung der Dots, die Information in y -Richtung nur ein Drittel derjenigen in x -Richtung ist.

Die Diagramme in Abbildung 4.13 zeigen, dass der r -Wert nur unwesentlich innerhalb der Testreihen schwankt, doch wie aus Abbildung D.5 ersichtlich, zeigt sich eine sehr starke Schwankung innerhalb der Bilder bei den einzelnen Probanden. Dieses lässt vermuten, dass der Wert stärker von den Abtaststrategien der Probanden als von den technischen Gegebenheiten beeinflusst ist.

4.5.6 Auflösungsvermögen des VTD

Für Untersuchungen des Auflösungsvermögens des VTD werden in der Testreihe 8 parallele Linien abgebildet. Der Proband muss erkennen, wieviele Linien dargestellt werden. Diese Testreihe ist nur mit den sehenden Probanden und den Probanden I und J durchgeführt worden. Aus diesem Grund wird ggf. auf die Ergebnisse der sehenden Probanden zurückgegriffen.

Es zeigt sich, dass alle realisierbaren Abstände auf dem VTD erkannt werden und die richtige Anzahl von Linien mitgeteilt wird (vgl. Abbildung D.2). Nur bei der sehenden Vergleichsgruppe gab es Schwierigkeiten, die schrägen Linien noch aufzulösen. Der minimal mögliche Abstand zwischen den Linien in y -Richtung beträgt 2.45 mm , dieses entspricht ziemlich genau der Zweipunktschwelle bei der taktilen Unterscheidungsfähigkeit, wenn zwei simultane taktile Reize an den Fingerkuppen angeboten werden (vgl. [Goldstein 97, Schmidt 80]). Es ist auch zu erwarten, dass die Grenze für das Diskretisieren einzelner Linien unter dieser Grenze liegt, da beim *Optacon* (vgl. Seite 8) mit einem Dot-Abstand kleiner als 1 mm somit weit unter der obigen Schwelle

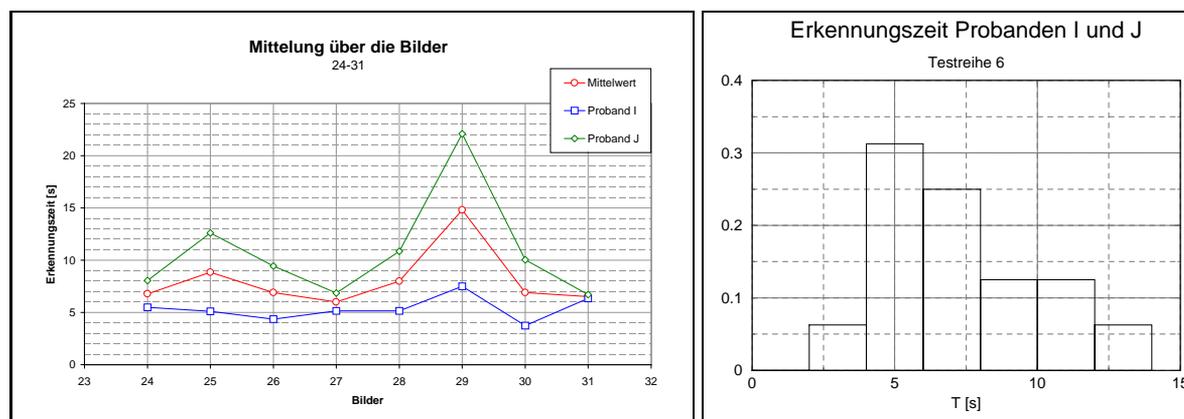


Abbildung 4.14: Erkennungszeit in der Testreihe 6 (berechnet nach Formel 4.1). Das linke Diagramm zeigt die gemittelte Zeit über die Bilder jeweils nach Probanden getrennt und das rechte das Histogramm mit $mean : 8.1 s$ $rms : 4.35$.

gearbeitet wird. Leider liegen keine Zahlenwerte über die Fähigkeit mit Hilfe des *Optacons* einzelne Linien zu unterscheiden vor.

Der Unterschied in den Erkennungsraten von 100 % bei den blinden Probanden und 84 % bei der sehenden Vergleichsgruppe ist sehr deutlich. Es lässt sich somit vermuten, dass bei den blinden Probanden durch das Brailleschriftlesen die Sensibilität der Fingerspitzen stärker ausgeprägt ist und es den blinden Schülern somit auch möglich gewesen wäre die gleichen Ergebnisse wie die Probanden I und J zu erreichen. Die Gruppe der sehenden Probanden ist wahrscheinlich an der Grenze ihres Auflösungsvermögens gelangt, was sich durch eine Erkennungsrate von 84.4 % abzeichnet.

Für die Weiterentwicklung des *HTVSS* ist dieses Ergebnis sehr erfreulich, da es mit den obigen Ergebnissen die Vermutung zulässt, dass mit einer Ausgabematrix mit vergleichbarer Auflösung aber einem geringeren Abstand der Dots zueinander noch feinere Strukturen erkannt werden können.

4.5.7 Erkennen unbekannter Figuren

Die Testreihe, die das Erkennen von unbekanntem Figuren beinhaltet, ist nur von den sehenden Probanden und den Probanden I und J durchgeführt worden. Für die Auswertung gilt das gleiche wie bei 4.5.6. Wie aus Abbildung 4.15 ersichtlich, ist die Erkennungszeit bei dieser Testreihe bei den beiden Probanden I und J nicht wesentlich höher als bei den vorangegangenen Testreihen. Die durchschnittliche Erkennungszeit beträgt bei den Probanden 10.8 s. Die Abbildung 4.15 macht zudem deutlich, dass die benötigte Erkennungszeit sehr spezifisch von der Versuchsperson abhängt. Es zeigt sich, dass es den Probanden durchaus möglich ist, Figuren allein durch ihren taktilen Abdruck zu erkennen und dass die Ergebnisse der Testreihen 2–5 nicht dadurch erreicht wurden, dass die Probanden die Figuren nur errahnten.

Wenn man die sehende Vergleichsgruppe mit in Betracht zieht, wird deutlich, dass die Figuren, die mit einer ein-Pixel starken Linie dargestellt werden, besser d.h. schneller erkannt werden

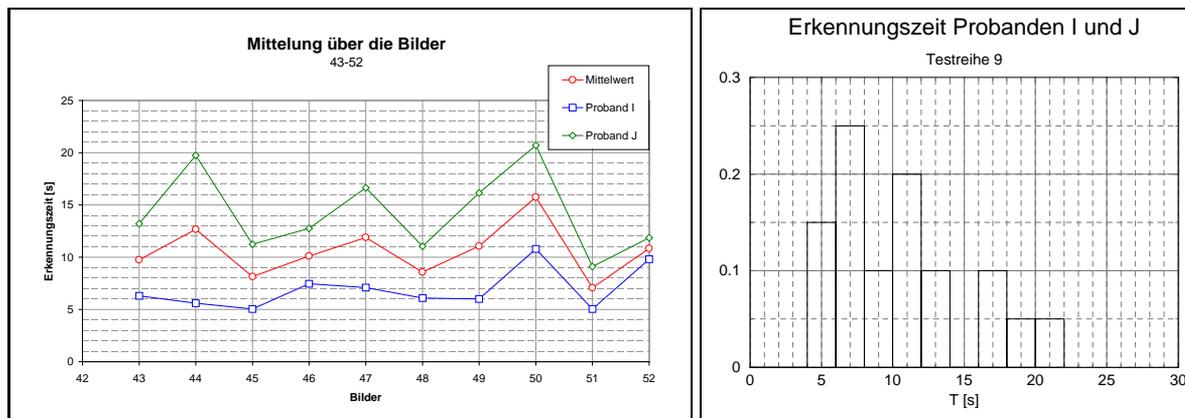


Abbildung 4.15: Erkennungszeit in der Testreihe 9 (berechnet nach Formel 4.1). Das linke Diagramm zeigt die gemittelte Zeit über die Bilder 43-52 und das rechte das Histogramm mit $mean : 10.59 s$ $rms : 4.68 s$.

als jene mit dickeren Linien. Für die Bildverarbeitung bedeutet dies, dass aus dem Kamerabild dünne Kanten extrahiert werden müssen, die die Gegenstände charakterisieren. Das derzeit vorhandene Bildverarbeitungskonzept ist auf diese Anforderungen ausgelegt, jedoch müsste eine weiterentwickelte Bildverarbeitung zusätzlich noch Algorithmen beinhalten, die bis zu einer vorgegebenen Breite einer Kante eine Linie ausgeben und erst dann wenn die Breite der Kante ein bestimmtes Maß überschreitet, zwei klare Linien ausgeben. Ein größeres Problem stellt sich bei der Klassifizierung der Kanten dar, da nur solche Kanten ausgegeben werden sollen, die das darzustellende Bild klar charakterisieren.

4.6 Ergebnisse im Bereich der taktilen Wahrnehmung

4.6.1 Begriffsdefinition und Motivation

Als haptische Wahrnehmung wird von *Goldstein* „... die Wahrnehmung der Form und Oberflächenbeschaffenheit dreidimensionaler Objekte durch aktives Berühren und Abtasten“ (S. 570 [Goldstein 97]) definiert. Im Gegensatz dazu wird die Reizantwort auf passive Reizadaptation als taktile Wahrnehmung bezeichnet. Das Abtasten auf dem *VTD* entspricht eher dem auf Seite 448 in [Goldstein 97] beschriebenen „aktiven Berühren“, bei dem „mehrere verschiedene physiologische Prozesse beteiligt“ sind. „Dazu gehört das Spüren der Stellung und der Bewegung der Hand und der Finger genauso wie die Tastempfindungen der Haut“ [Goldstein 97]. In der weiteren Literatur (z.B. [Loomis 91]) werden die beiden Begriffe haptisch und taktil synonym verwendet. In dieser Arbeit wird das Erkennen von Figuren auf dem *VTD* dem Gebiet der taktilen Wahrnehmung zugeordnet, wobei damit die von *Goldstein* als aktives Berühren gekennzeichnete Wahrnehmung gemeint ist.

Das Ziel dieser Arbeit ist es nicht primär Untersuchungen zur taktilen Wahrnehmung vorzunehmen und deren Ergebnisse zu interpretieren. Vielmehr ist bei den Testreihen und speziell bei

der späteren Auswertung aufgefallen, dass die Gruppe der sehenden und die Gruppe der blinden Probanden verschiedene Strategien beim Abtasten der Figuren verfolgen. Im Weiteren werden diese Beobachtungen aufgelistet und falls es möglich ist, ein erster Interpretationsversuch beigefügt.

Für diese Beobachtungen finden nur Ergebnisse von speziellen Bildern der einzelnen Testreihen Verwendung. Bei den verwendeten Ergebnissen handelt es sich um Bilder, bei denen alle Probanden die ihnen gestellte Aufgabe richtig gelöst haben und die von allen Probanden ausgeführt worden sind. Es ist somit möglich, eine von der Testschwierigkeit unabhängige Beobachtung durchzuführen.

4.6.2 Beobachtungen zur Erkennungszeit

Die hervorstechende Beobachtung ist, dass die Erkennungszeit bei der sehenden Gruppe signifikant länger ist als bei der Gruppe der blinden Probanden. Bei einer durchschnittlichen Erkennungszeit von 10.0 s bei der Gruppe der Blinden und von 26.1 s bei der Vergleichsgruppe stellt sich die Frage, ob signifikante Unterschiede hinsichtlich der Wahrnehmung bei den beiden Gruppe zu erkennen sind. Bei der Geschwindigkeitsverteilung ist deutlich, dass die Gruppe mit der kürzeren Erkennungszeit schneller die Ausgabematrix bewegt (29.3 *Pixel/s* zu 17.5 *Pixel/s*), jedoch ist der Unterschied in der Geschwindigkeit um den Faktor 1.67 größer, während dem sich die Erkennungszeiten um Faktor 2.61 unterscheiden.

Die Schwankungen bei der Geschwindigkeit und der Erkennungszeit unterscheiden sich wie die Abbildung E.2 und E.3 zeigen signifikant. Bei der Gruppe der blinden Probanden zeigt sich mit einer Standardabweichung von 35.5 % bei der Erkennungszeit und 55.5 % bei der Geschwindigkeit ein etwas homogeneres Bild als bei der Gruppe der Sehenden mit 35.5 % und 62.8, %.

Sehr interessant ist auch der Zusammenhang zwischen Erkennungszeit und Geschwindigkeit wie in Abbildung E.4 ersichtlich. Da der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Weg (s) $v = s/T$ ist, wäre eine $v \sim 1/T$ Abhängigkeit zu erwarten, wenn alle Probanden für das Ertasten die gleiche Information benötigen würden. Als direktes Maß für die Information auf dem VTD steht der Weg, den die Ausgabematrix bis zum Erkennen der Figur zurücklegt. Bei einer $v \sim 1/T$ Abhängigkeit würden alle Probanden beim Abtasten einer Figur den gleichen Weg zurücklegen. Diese Hypothese ist sicher nicht für Zeiten kleiner 20 s richtig wie ein Blick auf die *Weg-Zeit-Plots* zeigt. Bei den beiden Gruppen ist zudem ein linearer Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Abtastzeit zu erkennen. Bemerkenswert ist die Steigung der Regressionsgeraden der Gruppe der Blinden. Eine Steigung von -1 bedeutet, dass die schnellere Erkennungszeit auch dadurch zustande kommt, dass die Probanden mit proportional weniger Information, das heißt mit einer kürzeren Wegstrecke die Aufgaben lösen können. Der Faktor -1 lässt auf einen direkten linearen Zusammenhang von Mangelinformation und Erkennungszeit schließen. Die Regressionsgerade der blinden Gruppe schneidet die Geschwindigkeitsachse bei der Geschwindigkeit 40 *Pixel/s*, was der in 4.5.3 bestimmten Grenzgeschwindigkeit entspricht. Bei der Gruppe der Sehenden zeigt sich zwar eine auf dem 1 %-Niveau hochsignifikante Korrelation zwischen der Erkennungszeit und der Geschwindigkeit. Aber bei der Annahme eines linearen Zusammenhangs zeigt sich, dass die Abhängigkeit von dem Informationsmangel nicht so stark ausgeprägt ist wie bei der Gruppe der Blinden.

Es ist somit davon auszugehen, dass die unterschiedlichen Geschwindigkeiten als alleiniger Faktor für die unterschiedlichen Erkennungszeiten ausscheiden. Es ist zu vermuten, dass die blinden Probanden Figuren auf einem Tastfeld anders wahrnehmen als die sehenden Probanden.

4.6.3 Beobachtungen zur Strategie

Zur Beobachtung der Strategie dienen hauptsächlich die *Weg-Zeit-Plots* und die *Ort-Zeit-Plots*. Um die Beobachtungen zu quantifizieren, werden die Größen *cda* nach Formel 4.4 und *t_{nocon}* Formel 4.5 herangezogen.

Wie im vorherigen Kapitel erwähnt zeigt sich, dass die Probanden, die sehr schnell die Aufgaben lösen meist eine kürzere Strecke beim Abtasten zurücklegen. Es stellt sich die Frage, ob es besondere Orientierungspunkte gibt, an denen die „schnellen“ Probanden die Figuren erkennen und ob es Möglichkeiten gibt, dieses mit anderen Wahrnehmungsphänomenen in Verbindung zu bringen. Wie die Diagramme in den Abbildungen des Anhanges F vermuten lassen, verwenden die sehenden Probanden sehr viel Zeit, um die Figur komplett anhand ihrer Konturen abzufahren. Bei den blinden Probanden zeigt sich, dass manche Punkte der Kontur nicht erfasst werden und sie sich somit größtenteils sehr sprunghaft auf dem *VTD* bewegen. Wie die Abbildung E.5 und E.6 bestätigen, haben die blinden Probanden auch im Mittel den größeren mittleren Abstand von der Figur. Der mittlere Abstand bei der Gruppe der Sehenden von *2.9 Pixel* und bei der Gruppe der Blinden von *3.7 Pixel* bestätigen diese Beobachtung. Um eine Vorstellung über die Größe *cda* zu bekommen, ist es möglich diesen *cda*-Wert als Radius in Abbildung 4.8 einzuzichnen.

Noch signifikanter wird der Unterschied, wenn man wie in Abbildung E.6, die auf die Erkennungszeit normierte Zeit ohne Kontakt aus Formel 4.5 der beiden Gruppen vergleicht. Es bestätigt sich, dass die blinden Probanden wie es sich auch in den *Weg-Zeit-Plots* abzeichnet, gezielt einzelne Bereiche der Figur anfahren und die Figur anhand dieser charakteristischen Punkte wahrnehmen. Die sehenden Probanden verwenden 19.8 % der Erkennungszeit ohne Kontakt mit der Figur. Bei der Gruppe der blinden Probanden beträgt dieser Wert 28.1 % und ist somit signifikant größer. Auch dies ist ein Hinweis, dass die Probanden eine Art von „pattern recognition“¹³ über ihren taktilen Sinneskanal durchführen. Der Begriff des „pattern recognition“ bezeichnet das Wiedererkennen von Figuren anhand eines festen Musters. Im Gegensatz dazu steht das Erkennen von einzelnen Linien und das Zusammensetzen zu einem Gesamteindruck im Gehirn. So wird z.B. bei der Wiedererkennung eines Dreieckes anhand eines festen Musters, der Proband drei spitze Ecken erkennen und aus dem Gesamteindruck auf der Haut darauf schließen, dass es sich um ein Dreieck handeln müsse. Bei der anderen Form der Wahrnehmung würden die Probanden nur drei schräge Linien, die sich an drei Punkten treffen, erkennen und daraus auf ein Dreieck zurückschließen.

Diese charakteristischen Punkte werden häufig auch als Landmarks bezeichnet [Sampaio 98]. Diese Landmarks spielen auch bei visueller Wahrnehmung eine große Rolle.

Es zeigt sich, dass beim Aufzeichnen der okularen Bewegungen der Augen diese überdurchschnittlich lange an wenigen ausgezeichneten Punkten verweilen. Als Beispiel für die okularen Bewegungen bei Kleinkindern führt Fischer Abbildung 4.16 an: „Hier werden die okularen

¹³Mustererkennung

Bewegungen gezeigt, die eine Darbietung eines schwarzen Dreiecks mit hohem Kontrast zum Hintergrund bei Kleinkindern auslöst“ (S. 122 [Fischer 95]).

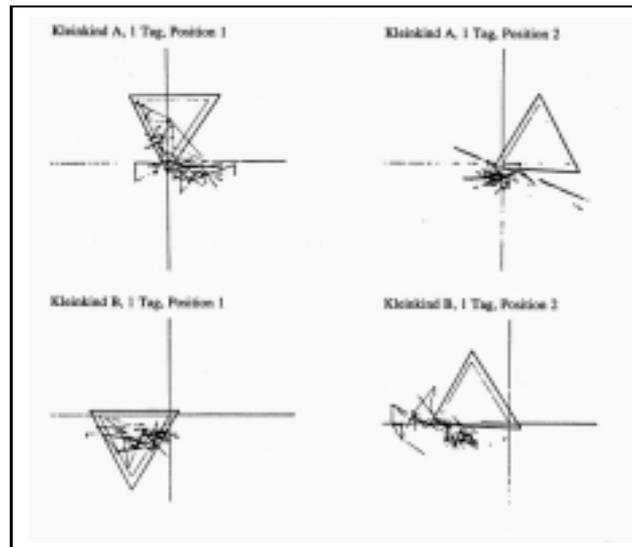


Abbildung 4.16: Augenbewegungen von zwei Kleinkindern bei in verschiedenen Positionen gezeigten Dreiecken (aus [Kessen 67] zitiert nach [Fischer 95])

Die *Weg-Zeit-Plots* der blinden Probanden (vgl. Seite 103 ff.) zeigen deutliche Parallelen zu der genannten Abbildungen. Es zeigt sich, dass spitze und rechte Winkel Stellen sind, an denen bei der Aufzeichnung der okularen Bewegungen eine besonders lange Aufenthaltsdauer festzustellen ist [Sampaio 98]. Zur Untersuchung der Testergebnisse hinsichtlich dieser Parallelen sind in Abbildung E.7, E.8 und E.9 die Zeiten ohne Kontakt zur Figur zusätzlich noch für spezielle Bilder einzeln ausgewertet. Für die Untersuchung von t_{nocon} beim Kreis finden die Bilder 13, 17 und 21 Verwendung. Bei der Figur des Kreuzes finden die Ergebnisse von Bild 2, 3 und 22 und für die Figur des Dreiecks die Bilder 6, 8 und 18 Verwendung. Für die Auswahl dieser Bilder spricht die hohe Statistik. Diese Bilder werden dreimal wiederholt und von allen blinden sowie von fast allen sehenden Probanden richtig erkannt.¹⁴ Für die Auswertung bei der Gruppe der Blinden stehen somit jeweils 18 Ergebnisse zur Verfügung und bei der Gruppe der Sehenden entsprechend 12 bzw. 11.

Bei der Gruppe der Blinden ist deutlich zu erkennen, dass die Zeit im Kontakt mit der Figur bei den Kreisen maximal ist, während bei den eckigen Figuren die Probanden über 28 % der Zeit ohne Kontakt mit der Figur sind. Bei der Gruppe der Sehenden ist ein ähnlicher Effekt zu beobachten, wobei bei dieser Gruppe die Zeit ohne Kontakt insgesamt in allen Figuren geringer ist. Die Ergebnisse der beiden Gruppen unterscheiden sich zwar nicht hochsignifikant, aber bei einer kritischen Untersuchung der *Weg-Zeit-Plots* und der *Ort-Zeit-Plots* (siehe Anhang ab Seite 103)

¹⁴Bild 17 und 22 ist von Proband D nicht richtig erkannt worden. Dieses Ergebnis wird somit nicht berücksichtigt. Entgegen der Bemerkungen von Kapitel 4.6.1 sind die Ergebnisse mit aufgenommen, da der Kreis und das Kreuz von der Form her einzigartig innerhalb der Testreihen sind.

zeigt sich, dass sich auch bei anderen Figuren immer jeweils bei den Eckpunkten eine größere Aufenthaltswahrscheinlichkeit einstellt. Eine spätere statistische Auswertung, welche nicht Inhalt dieser Arbeit ist sowie weiterführende Testreihen müssen zeigen, ob sich der beobachtete Trend fortsetzen lässt.

Eine Bestätigung dieser Parallelen wäre nach [Sampaio 98] ein Fortschritt in der Erforschung der Wahrnehmung und der neuronalen Umsetzung.

4.6.4 Beobachtung bei wiederholter Darstellung von identischen und kongruenten Figuren

Das wiederholte Auftreten von identischen und kongruenten Figuren (vgl. 4.2.1) bietet die Möglichkeit zu untersuchen, inwieweit sich bei den Gruppen ein Lerneffekt einstellt, d.h. ob die Figuren beim zweiten Wiederdarbieten schneller erkannt werden. Die Untersuchung teilt sich in zwei Teile, erstens die Untersuchung von identischen und zweitens von kongruenten Figuren.

Identische Figuren

Bei der Untersuchung mit identischen Figuren werden die Daten der Bildpaare 6/18 und 11/23 verwendet. Bei den anderen identischen Figuren sind die Voraussetzungen von Kapitel 4.6.1 nicht gegeben. Sie stehen aber jederzeit für weitere Analysen zur Verfügung. Beim Bildpaar 18/6 beträgt die durchschnittliche Erkennungszeit der Gruppe der Sehenden 18.45 s/14.81 s und bei der Gruppe der Blinden 9.91 s/7.05 s. Bei dem Bildpaar 11/23 ergeben sich 24 s/20 s und 9.27 s/6.74 s. Bei der Betrachtung der Mittelwerte werden die individuellen Zeitdifferenzen der einzelnen Probanden nicht berücksichtigt. Um ein Maß für die Zeitdifferenz zu erhalten, wird die Differenz des ersten Bildes zum zweiten Bild berechnet. Die Differenz bezogen auf die Erkennungszeit des zuerst dargebotenen Bildes (T_{B1}) ergibt die relative Zeitdifferenz. Formal ergibt sich mit Δ_L für die relative Zeitdifferenz:

$$\Delta_L = \frac{T_{B1} - T_{B2}}{T_{B1}} \quad (4.10)$$

Bei der Interpretation von Δ_L bedeutet ein negativer Wert, dass die Erkennungszeit bei wiederholter Darbietung höher ist.

Wie aus Abbildung E.10 ersichtlich, reduziert sich die Erkennungszeit der Probanden im Durchschnitt beim zweiten Abtasten. Bei den Mittelwerten des individuellen Lernfortschrittes ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Die blinden Probanden steigern ihre Erkennungsleistung im ersten Bildpaar um 18 % und im zweiten um 4,33 %. Bei der sehenden Vergleichsgruppe ergibt sich bei denselben Bildpaaren ein Δ_L -Wert von 6 % und 20 %. Ein Vergleich mit Abbildung E.11 zeigt, dass interessanterweise einige Probanden bei den beiden Bildpaaren immer einen positiven bzw. einen negativen Δ_L -Wert erzielen.

Kongruente Figuren

Für den Vergleich mit kongruenten Figuren kann nur das Bildpaar 13/21 verwertet werden. Auch bei diesem Bildpaar ist kein signifikanter Unterschied zu den Ergebnissen der identischen Bilder zu erkennen (vgl. Abbildung E.10).

Eine Sichtung der Daten (vgl. Abbildung E.12) lässt vermuten, dass bei der statistischen Auswertung eine stärkere Zunahme der relativen Zeitdifferenz bei der Gruppe der Blinden zu erwarten ist.

Das obige Ergebnis könnte man auch dadurch erklären, dass die dargebotenen Figuren eine zu geringe Komplexität aufweisen und somit die Probanden keine Möglichkeit haben ihre Erkennungszeit deutlich zu verringern. Bei einer Erkennungszeit unter 10 s, bewirken bereits sehr kleine Verzögerungen beim Abtasten einen bedeutsamen Effekt. Die Grösse Δ_L reagiert bei diesen kurzen Erkennungszeiten sehr empfindlich auf Störungen des Abtastflusses.

4.7 Fehlerbetrachtung

Bei den Berechnungen innerhalb der Auswertungen sind mehrere Größen mit Fehlern behaftet, die zumeist durch die Implementation der Software begründet sind.

4.7.1 Zeitfehler

Das regelmäßige Niederschreiben der Daten (vgl. Kapitel 3.4.4 auf Seite 3.4.4) kann durch folgende Faktoren gestört werden:

1. Durch Diskontinuitäten innerhalb der einzelnen Weiterverarbeitungsmodule.
2. Wenn die Zeit, die benötigt wird die Struktur aus Weiterverarbeitungsmodulen abzuarbeiten länger ist, als die eingestellte Frequenz.
3. Falls durch einen Interrupt¹⁵ das *Visor-Programm* gestoppt bzw. ihm Rechenzeit entzogen wird.

Fall 1 scheidet wegen der sehr gleichmäßigen Programmstruktur innerhalb der Module aus. Durch Messungen wurde sichergestellt, dass die Durchlaufzeit der bei allen Tests verwendeten Struktur von Modulen nicht größer ist, als die eingestellte Frequenz von 20 Hz (vgl. Kapitel 3.5). Als einziger Faktor für Unregelmäßigkeiten bei der Datenaufzeichnung spielt der in Nummer 3 angesprochene Umstand eine Rolle, dass das Betriebssystem in regelmäßigen und in unregelmäßigen Abständen die Kontrollen über den Rechner mindestens teilweise übernimmt. Die regelmäßigen Interrupts werden 16 mal pro Sekunde ausgelöst. Die Dauer der regelmäßigen Interrupts ist abhängig von der Anzahl von gleichzeitig ablaufenden Prozessen. Da außer der *Visor*-Applikation keine weiteren Prozesse im Hintergrund laufen, erzeugen diese regelmäßigen Interrupts, wenn überhaupt nur einen sehr kleinen konstanten Fehler. Beim Datenaufzeichnen werden mit einer Frequenz von 20 Hz ca. 30 Byte Daten abgelegt. Das Betriebssystem regelt das Abspeichern, so dass es die Daten in verschiedenen Puffern speichert bis es sich „lohnt“ sie auf die Festplatte abzuspeichern. Dieses unregelmäßige Niederschreiben von Daten auf die Festplatte kann zu störenden Interrupts führen, die bewirken, dass die Daten nicht mit der nötigen Regelmäßigkeit aufgenommen werden können.

Um diesen Effekt zu untersuchen, ist eine Datenreihe über 16 h aufgenommen worden. Anstatt der mx - und my -Werte ist der Wert eines Timers, der in Schritten von 10^{-3} s Werte liefert und unabhängig von der im Hauptprogramm benutzten Zeit-Routine läuft, mit aufgezeichnet. Die Menge der mit der Frequenz ν_0 abgelegten Daten, ist vergleichbar mit den bei den Testreihen verwendeten Datenvolumen. Ein Vergleich der Anzahl der aufgezeichneten Datensätze mit der Aufnahmedauer zeigt, dass nur 0.11% weniger Datensätze aufgezeichnet sind als theoretisch erwartet. Differenzen, die auf die Auswertung der Tests eingehen werden in den Diagrammen in Abbildung 4.17 deutlich. Die Abbildungen zeigen, dass im Mittel zwischen den Datensätzen 50 ms liegen. Es wird aber bei der logarithmischen Skala deutlich, dass bei wenigen Ereignissen

¹⁵In diesem Zusammenhang spielen nur Interrupts vom Betriebssystem und nicht die vom *Visor-Programm* eine Rolle.

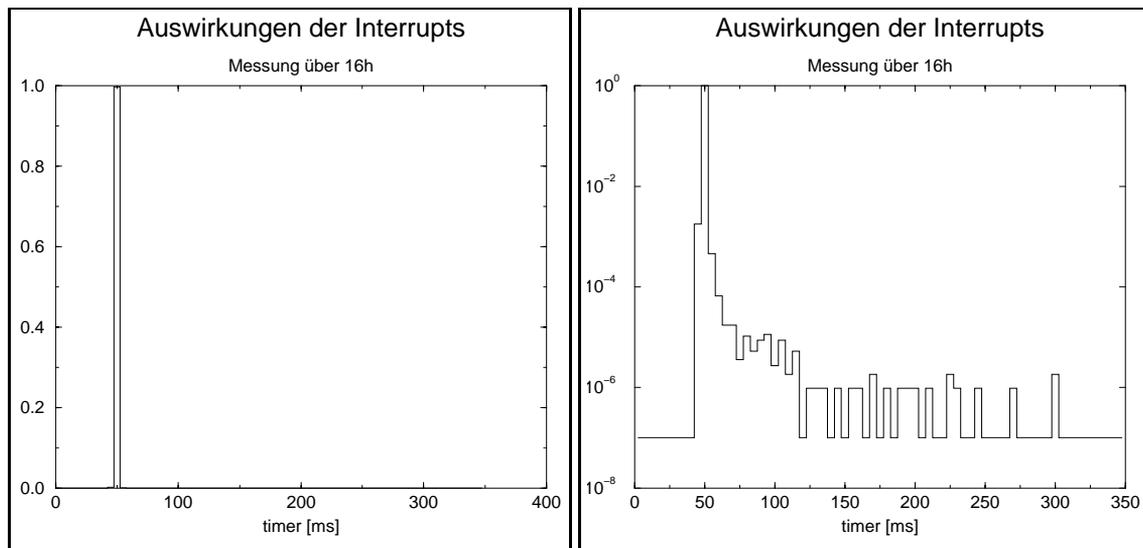


Abbildung 4.17: Ergebnisse bei der Messung über 16 Stunden. Das Diagramm links ist mit linearer und das rechte mit logarithmischer Skalierung der y-Achse

$n : 1154294$ $min : 46 ms$ $max : 302 ms$
 $mean : 50.04 ms$ $rms : 1.9008 ms$

eine sehr lange Zeit zwischen den einzeln aufgezeichneten Daten-Blöcken liegen kann. Diese längeren Pausen kommen wie die Abbildung 4.18 zeigt in sehr unregelmäßigen Abständen vor. Die seltenen Pausen haben nur eine sehr geringe Auswirkung auf die Ergebnisse, wenn die Erkennungszeit im Vergleich zu den Unterbrechungen während der Aufzeichnung lange ist. Für eine Fehlerabschätzung der Zeit ist aus Abbildung 4.17 ersichtlich, dass eine längere Pause zwischen den Datensätzen nur bei jeden 1000. Datensatz vorkommt, das bedeutet maximal alle 50 s. Für eine Fehlerabschätzung der Zeit ergibt sich bei Abschätzung des maximalen Fehlers ein Fehler für die Erkennungszeit von:

$$\Delta T = +0,3 s$$

4.7.2 Fehler der Geschwindigkeit

Beim Bewegen des Positionssensors kommen die Daten erst in einen Hard- und anschließend in einen Softwarepuffer (vgl. Abbildung 3.16). Durch die Pausen in der Aufzeichnung werden die Daten aus den Puffern nicht mehr ausgelesen und es ergibt sich, dass bei der nächsten Auslese ein relativ großer zurückgelegter Weg detektiert wird. Nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt sich somit für den Fehler der Geschwindigkeit:

$$\Delta v = \left| v \cdot \frac{\Delta T}{T} \right|$$

Auch hier zeigt es sich, dass der Fehler bei sehr kurzen Erkennungszeiten maximal ist.

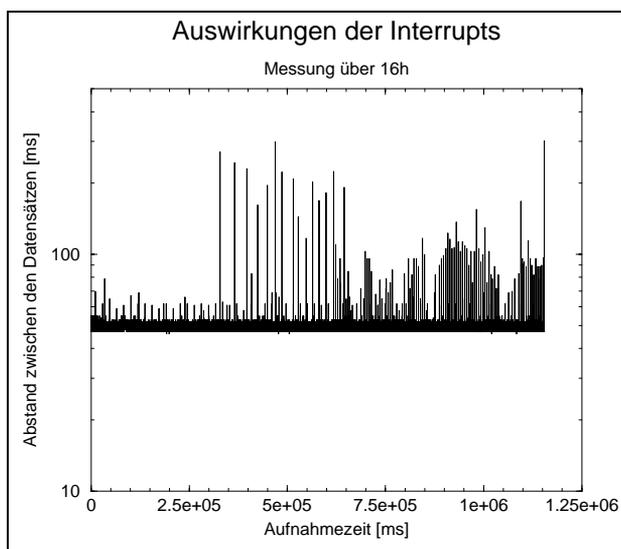


Abbildung 4.18: Verteilung der Interrupts innerhalb der Zeit

4.7.3 Fehler im Ort

Innerhalb des Testes wurden die einzelnen dargebotenen Bilder aus einer großen Grafik entnommen. Je nach Einstellung ist es möglich, dass die Figuren um maximal 1 *Pixel* zum Referenzbild verschoben sind. Eine Verschiebung in y-Richtung ist nicht zu erwarten, da in der Darstellung eine Referenzlinie die richtige Lage sicherstellt. Der maximale Abstand vom Referenzbild zum ausgegebenen Bild ergibt sich somit zu

$$\Delta f(p)_x = \pm 1 \text{ Pixel}$$

Zusammenfassung und Ausblick

Die Tests haben gezeigt, dass es, mit den heutigen Mitteln möglich ist eine kompakte virtuelle taktile Matrix aufzubauen. Es zeigt sich zudem, dass die Materialkosten unter 5000 DM (ohne Notebook) liegen können.

Der im Kapitel 3 vorgestellte Aufbau erweist sich als äußerst robust und verrichtet seine Arbeit während der Tests und bei diversen Vorstellungen ohne Probleme. Bei der Führung der Ausgabematrix hat sich gezeigt, dass das Konzept mit drei Schienen für die Führung der Ausgabematrix möglich ist. Doch ist bei zukünftigen Entwicklungsschritten zu überlegen wie die schwimmende Lagerung der Schienen verbessert werden kann. Eine vorstellbare Option ist ein Aufbau ohne Schienen mit zwei Positionssensoren, die die Drehung und die Bewegung der Ausgabematrix detektieren. Bei einem solchen Aufbau hätte der Benutzer die Möglichkeit einen weiteren Freiheitsgrad beim Tasten zu benutzen.

Bedingt durch das noch vorhandene Rauschen der Kamera musste von einem Test im mobilen Einsatz leider abgesehen werden. Dieses Rauschen ist neben dem verbliebenen „fixed pattern noise“ (vgl. [Loose 98]) durch die auf dem Zusatzmodul des Mainboards erfolgte Analog-Digital-Wandlung bedingt und kann mit einer Änderung des Aufbaus deutlich gesenkt werden. Die Bildqualität konnte durch die begrenzte Auflösung des Eingabebildes von 64×64 Pixeln nicht durch einen Rauschunterdrückungs-Filter¹⁶ gesteigert werden.

Die Tests haben gezeigt, dass es blinden Personen mit etwas mehr Training möglich sein wird, Figuren auf dem *VTD* innerhalb von $(10 \pm 5 s)$ zu bestimmen. Es zeigt sich zudem, dass es einfacher ist, Figuren zu erkennen, die nur aus ein-Pixel starken Linien bestehen. Die blinden Probanden haben, wie sich ansatzweise zeigt, nicht die gleiche Vorstellung bezüglich des zweidimensionalen Abbildes eines dreidimensionalen Gegenstandes. Es ist ihnen jedoch möglich, Bilder sehr detailliert auf *VTD* wahrzunehmen. So wäre es interessant zu erforschen, ob es Benutzern möglich sein wird eine Wahrnehmung für das räumliche Abbild durch Benutzung des *HTVSS* zu erlangen.

Die Tests haben auch gezeigt, dass der Aufbau nicht dazu geeignet ist, schnelle Bewegungen zu erkennen. Vielmehr kann das *HTVSS* dazu benutzt werden, sich einen Überblick über die vorhandene statische Umgebung zu verschaffen.

Der Einsatzbereich des *HTVSS* ist sicher nicht, den blinden Benutzern ein „allround rundrum glücklich Hilfsgerät“ zur Verfügung zu stellen. Das *HTVSS* stellt aber ein gutes **zusätzliches** Hilfsmittel dar. Der Benutzer hat die Möglichkeit mit Hilfe des *HTVSS* über die folgenden

¹⁶Eine Rauschunterdrückung bedeutet ein Herausfiltern der niedrigen Ortsfrequenzen in einem Bild. Dieses bewirkt den Verlust von Details des Bildes. Ein Detailverlust ist mit einer Verringerung der Auflösung und der Schärfe des Bildes gleichzusetzen. Beides ist bei der zur Verfügung stehenden Auflösung nicht zu kompensieren.

Punkte Informationen zu erhalten:

- Gegenstände, die mit dem Taststock unterfahren werden z.B. einen stehenden LKW.
- Hindernisse, die sich in Kopfhöhe befinden.
- Den Verlauf der Straße.
- Markante Punkte zur Orientierung.

Die Vorteile des *HTVSS* sind, dass es jedem freigestellt ist, wann und wie oft er diese Informationen nutzen möchte. Der Benutzer ist somit nicht einem zusätzlichen kontinuierlichen Reiz ausgesetzt.

Mit Berücksichtigung der Tests und kritischer Betrachtung des Prototypen wären folgende Veränderungen auf der mechanischen Seite erstrebenswert. Die Bewegungen der Ausgabematrix müssen gedämpft werden, damit das *VTD* in jeder Position, d.h. auch im senkrechten Betrieb, benutzt werden kann. Das Gewicht müsste reduziert werden, was durch Verwendung eines Kunststoffes mit Wabenstruktur für die Grundplatte und eine Trennung von Notebook und *VTD* zu ermöglichen ist. Auserdem ist eine kosmetische Korrektur des Kameraaufbaus und der Verkabelung wünschenswert.

Bei der Software zeigt sich, dass das richtige Konzept verfolgt wird. Bei den Operatoren der Bildverarbeitung müsste jedoch noch mehr Wert auf klare ein-Pixel breite Linien gelegt werden.

Die Testreihen zeigen zudem, dass der vorgestellte Aufbau einen viel breiteren Einsatzbereich des *VTD* möglich macht. Das Abtasten mit Hilfe der virtuellen Matrix ist von der Qualität des Abtastvorgangs vergleichbar mit anderen taktilen Displays. Die Vorteile des *VTD* liegen in der Einfachheit der Bedienung und der Möglichkeit, schnell verschiedene Muster zu erzeugen und darzustellen. Es ist somit denkbar, das *VTD* als pädagogisches Hilfsmittel in den Geometrieunterricht in Blindenschulen und evtl. auch in Schulen für stark Sehbehinderte zu verwenden. Als Eingabegeräte wären ein Scanner oder die Kamera denkbar. Bei dem Aufbau mit Hilfe der Kamera ist das System eine Art Bildschirmlesegerät mit taktiler Ausgabe.

Das zweite sehr interessante Anwendungsgebiet ist die Anbindung an ein unter *Windows* oder einem anderen Betriebssystem mit einem GUI¹⁷ betriebenen Computer. Durch geeignete Zoom- und Vorverarbeitungs-Algorithmen sollte es dem Benutzer möglich sein, sich auf dem Bildschirm zu orientieren und die Stellen zu finden, an denen eine Eingabe verlangt wird.

Für die Erforschung der taktilen Wahrnehmung bietet das *VTD* viele Möglichkeiten. Zum einen sind sehr schnelle Bildwechsel möglich, zum anderen ist das *VTD* nach den Erfahrungen das einzige taktile Display, bei dem es möglich ist taktil Bewegungen zu erfahren. Mit der Aufzeichnung der Daten und den Möglichkeiten ihrer Auswertung in Bezug auf Zeit, Geschwindigkeit, Ort, jeweils in Verbindung mit dem dargebotenen Bild ist sicherlich eine neue Dimension bei der Erforschung der taktilen Wahrnehmung erreicht.

Die Ergebnisse der Testreihen wurden in den Kapitel 4.6.1 ab Seite 60 nur qualitativ - mehr im Hinblick auf die Beschreibung des Gesehenen - ausgewertet. Mit den aufgezeigten Möglichkeiten hat man die Gelegenheit die Daten auf spezielle Fragestellungen hin zu untersuchen. Auch

¹⁷Graphical User Interface

wurde auf eine ausgiebige statistische Analyse aus Zeitgründen verzichtet. Sie kann aber bei der Erörterung weiterer Fragestellungen nachgereicht werden. Es zeigt sich jedoch, dass alle blinden Probanden eine deutlich andere Abtaststrategie als die sehende Vergleichsgruppe verfolgen. Zudem sind gewisse Parallelen zwischen der visuellen und der taktilen Wahrnehmung erkennbar, die sich am deutlichsten in den *Weg-Zeit-Plots* und den *Ort-Zeit-Plots* äußern. Beim Abtasten von Figuren mit einer unterschiedlichen Anzahl an Ecken konnten keine Signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Strategie bewiesen werden. Es zeichnet sich jedoch ein Differenzen ab.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das *VTD* und das Gesamtsystem *HTVSS* die Möglichkeiten bieten Weiterentwicklungen und Forschung in vier Bereichen zu betreiben:

1. Entwicklung eines Bildschirmlesegerätes mit taktiler Ausgabe.
2. Forschungen im Bereich der taktilen Wahrnehmung.
3. Entwicklung einer taktilen Ausgabe für Computer mit grafischer Benutzeroberfläche.
4. Weiterentwicklung des *HTVSS* zu einer einsatzfähigen Mobilitätshilfe.

Anhang A

Technische Daten

TECHNISCHE DATEN			
			Referenz
Abmessungen :			
Außenmaße	230 × 305 × 105 mm	3.1.1	S. 18
Abtastfläche :			
Fläche	16.4 × 15.9 cm	2.2	S. 14
Gesamtauflösung	48 × 60 ⇒ 2880 Pixel	2.2	S. 14
Ausgabematrix:			
Fläche	4.3 × 1.6 cm	2.2	S. 14
Auflösung	4 × 12 ⇒ 48 Pixel	2.2	S. 14
Mittlerer Dotabstand			
x-Richtung	3.21 mm	3.1.4	S. 20
y-Richtung	2.45 mm	3.1.4	S. 20
Verhältnis:			
Auflösung der Abtastmatrix zur Auflösung der Abtastfläche	≈ 2 %	2.2	S. 14
Gewicht:			
Gesamtgewicht:			
Abtastmatrix:	160 g	3.1.2	S. 18
VTD	2.25 kg		
Notebook	2.5 kg		
maximale Ausgaberate:			
ohne Bildverarbeitung	$\nu_{aus} = 64 \pm 1.5 \text{ Hz}$	3.5	S. 39
beim <i>Pingpong Spiel</i>	$\nu_{Pingpong} = 33.5 \text{ Hz} \pm 1.5 \text{ Hz}$	3.5	S. 39
bei direkter Ausgabe des Kame- rabildes	$\nu_{Kamera} = 24 \pm 4 \text{ Hz}$	3.5	S. 39
Kamera Einlesen, Bildverarbei- tung und Ausgabe	$\nu_{Morph} = 11.0 \pm 0.75 \text{ Hz}$	3.5	S. 39
Implementierte Bildverarbeitungsoperatoren:			
Sobelfilter	Kantendetektion	3.4.1	S. 31
morphologischer Filter	Kantendetektion	3.4.1	S. 32
Gaußfilter	Glättungsfilter	3.4.1	S. 31
Medianfilter	Rauschfilter	3.4.1	S. 31
Zeitmittelungsfilter	Mittelung über die Zeit	3.4.1	S. 31
Kalibrierungsfilter	Skalierung der Grauwerte	3.4.1	S. 32
Hersteller:			
der Module	METEC GmbH Stuttgart		
Positionssensor	Model Optical Mouse MSC Mouse Systems Corp. Vermont (USA)		
Linearführungen	INA Wälzlager Schaffer KG Herzogenaurach		
Notebook	Toshiba portégé 610 CT mit Pentium P90		

Tabelle A.1: Technische Daten des VTD

Anhang B

Auswertungsbogen für die Testreihen

Vorbereitung: 1

Datenerfassungsbogen

Name	:	
Anfangszeit	:	
Endzeit	:	
Gesamtzeit abzüglich Pausen	:	
Alter:	:	
Geschlecht:	:	
Entwicklung der Sehbehinderung	:	
Testleiter	:	

Vorbereitung: 2

1 Vorbereitung:
 Jeder Proband wird, je nach Interesse die Möglichkeit gegeben sich etwa 5 bis 15 min mit der Funktionsweise des *Touchpad* zu befassen.
 Anhand der Bildreihe 1 wird der Proband in dem Testablauf eingeführt und mit den 3 Grundfigurentypen (Figuren mit horizontalen und vertikalen Linien; Figuren mit diagonalen Linien sowie Figuren mit gekrümmten Linien) bekanntgemacht.
 Um das in weiteren Verlauf notwendige großflächige Abrasten einzutüben, wird nun das Pingpong-Spiel eingesetzt.
 Die Aufgabe besteht für den Probanden beim Pingpong Spiel darin, ein sich bewegende Figur auf den Touchpad zu verfolgen (Einstellung 20 Hz, speed 4 d.h. „Ball fliegt“ mir einer Geschwindigkeit von 5 Pixel/s).
Material: 2 Stoppuhr, Folien

Abbildung 1 Vorbereitung

Bild	Beschreibung	S ¹	Abmessung ² [cm]	A	L ³	Zeit zum Nachfragen [s]	Form erkannt		Antwort der Probanden	Bemerkung
							J	N		
01	Quadrat	1	5x5	4						
02	Quadrat	1	2,5x2,5	4						
03	Dreieck	1	5x5	3						
04	Dreieck	1	2,5x2,5	3						
05	Kreis	1	5x5	1						
06	Kreis	1	2,5x2,5	1						

¹ Strichstärke
² Abmessung Über alles (oxy)
³ Anzahl der Linien

Abbildung B.1: Datenbogen und Auswertungsbögen für Vorbereitung

2.1 Testreihe 1 Pingpong-Spiel: 3

2 Testreihen

2.1 Testreihe 1 Pingpong-Spiel:

Ablauf:

Der Test Gliedert sich in 5 Durchgänge beginnend mit der Einstellung 20Hz und speed 4. Der Proband soll jeweils für 20s testen und anschließend für 60s den „Ball“ verfolgen. Nach jeden Durchgang hat der Proband die Wahlmöglichkeit, ob er die Geschwindigkeit um 25% erhöhen oder verringern möchte. Für jeden Einzeldurchgang wird erfasst, wie oft und wie lange der Proband den Kontakt zur der Figur verloren hat.

Material: 2 Stoppuhren.

Nr.	Ballform	Einstellung	Frequenz [Hz]	speed [s]	Zeit ohne Kontakt	Anzahl der Kontakt Verluste	Meinung des Probanden
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							

weitere Bemerkungen:

2.2 Testreihe 2 Erkennen von Figuren mit waagerechten und senkrechten Linien 4

2.2 Testreihe 2 Erkennen von Figuren mit waagerechten und senkrechten Linien

Ablauf:

Die Aufgabe besteht für den Probanden darin verschiedene Figuren zu erraten und diese sofort nach dem Erkennen zu beschreiben. Für den Vorgang stehen den Probanden maximal 2min zur Verfügung. Wurde die Figur nicht oder falsch erkannt wird die Figur mit Erläuterungen des Testleiters nochmals abgefahren.

Mitteilung an den Probanden:

Beschreibung des Testablaufes und Beschreibung des Figurentyps (geschlossene Figur mit horizontalen und vertikalen Linien).

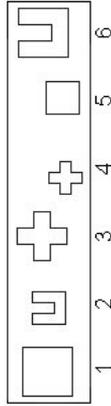


Abbildung 2.2-1 Erkennen von Figuren mit horizontalen und vertikalen Linien

Bild	Beschreibung	S	Abmessung [cm]	A	L	Zeit [s]	Zeit Nach dem Nachfragen [s]	Form erkannt		Bemerkung
								J	N	
01	Quadrat	1	9×9	4						
02	U	1	6×6	8						
03	Kreuz	1	9×9	12						
04	Kreuz	1	6×6	12						
05	Quadrat	1	6×6	4						
06	U	1	9×9	8						

weitere Bemerkungen:

Abbildung B.2: Auswertungsbögen für Testreihe 1–2

5

2.3 Testreihe 3 Erkennen von Figuren mit diagonalen Linien

2.3 Testreihe 3 Erkennen von Figuren mit diagonalen Linien

Ablauf:
wie Testreihe 2

Mitteilung an den Probanden:
Beschreibung des Testablaufes und Beschreibung des Figurentyps (geschlossene Figur mit zusätzlich diagonalen Linien).

Abbildung 2.3-1 Erkennen von Figuren mit diagonalen Linien

Bild	Be- schreib- ung	S	Ab- mess- ung [cm]	AL	Zeit [s]	Nach- dem Kam- fragen [s]	Form erkannt	Antwort der Probanden	Bemerkung
							J N		
01	Dreieck	1	9x9	3					
02	Raute	1	9x9	4					
03	Dreieck	1	6x6	3					
04	1/2 Quadrat	1	6x6	3					
05	1/2 Quadrat	1	9x9	3					
06	Raute	1	6x6	4					

weitere Bemerkungen:

6

2.4 Testreihe 4 Erkennen von Figuren mit gekrümmten Linien

2.4 Testreihe 4 Erkennen von Figuren mit gekrümmten Linien

Ablauf:
wie Testreihe 2

Mitteilung an den Probanden:
Beschreibung des Testablaufes und Beschreibung des Figurentyps (geschlossene Figur mit zusätzlich gekrümmten Linien).

Abbildung 2.4-1 Erkennen von Figuren mit gekrümmten Linien

Bild	Be- schreib- ung	S	Ab- mess- ung [cm]	AL	Zeit [s]	Nach- dem Kam- fragen [s]	Form erkannt	Antwort der Probanden	Bemerkung
							J N		
01	3/4 Kreis	1	6x6	3					
02	Kreis	1	6x6	1					
03	3/4 Kreis	1	9x9	3					
04	1/2 Kreis	1	6x6	2					
05	1/2 Kreis	1	9x9	2					
06	Kreis	1	9x9	1					

weitere Bemerkungen:

Abbildung B.3: Auswertungsbögen für Testreihe 3–4

2.5 Testreihe 5 Erkennen von bereits eingeführten Figuren

Ablauf:
wie Testreihe 2

Mitteilung an den Probanden:

Beschreibung des Testablaufes und Beschreibung des Figurentyps (verschiedene geschlossene Figur aus den Testreihen 2-4).

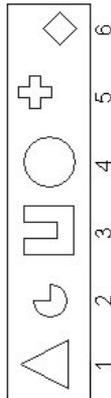


Abbildung 2.5.1 Erkennen von bereits eingeführten Figuren

Bild	Beschreibung	S	Abmessung [cm]	AL	Zeit [s]	Zeit nach dem Nachfragen		Form erkannt	Antwort der Probanden		Bemerkung
						[s]	[s]		J	N	
01	Dreieck	1	9x9	3							
02	Kreis	1	6x6	1							
03	U	1	9x9	8							
04	Kreis	1	9x9	1							
05	Kreuz	1	6x6	12							
06	Raute	1	6x6	4							

weitere Bemerkungen:

2.6 Testreihe 6 Erkennen der Anzahl von parallelen Linien

Ablauf:
wie Testreihe 2 mit der Variation:
Der Proband soll die Anzahl und die Orientierung der Linien angeben

Mitteilung an den Probanden:

Beschreibung des Testablaufes und Beschreibung des Figurentyps (verschiedene Anzahlen von parallelen Linien).

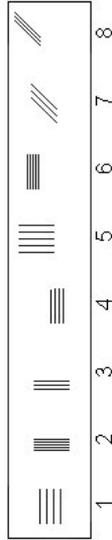


Abbildung 2.6.1 Erkennen der Anzahl von parallelen Linien

Bild	Beschreibung	S	Abstand [cm]	AL	Zeit [s]	Zeit nach dem Nachfragen		Form erkannt	Antwort der Probanden		Bemerkung
						[s]	[s]		J	N	
01	horz.	1	1,25	4							
02	vertikal	1	0,5	5							
03	vertikal	1	0,75	3							
04	horz.	1	0,75	4							
05	vertikal	1	1,25	5							
06	horz.	1	0,5	5							
07	diagonal	1	1,25	3							
08	diagonal	1	0,75	3							

weitere Bemerkungen:

Abbildung B.4: Auswertungsbögen für Testreihe 5–6

9

2.7 Testreihe 7 Erkennen der Anzahl von identischen Quadrate

2.7 Testreihe 7 Erkennen der Anzahl von identischen Quadrate

Ablauf:
wie Testreihe 2 mit der Variation:
Die Aufgabe besteht für den Proband darin die Anzahl der identischen Quadrate zu erkennen, für diesen Vorgang stehen den Probanden maximal 3min zur Verfügung.

Mitteilung an den Probanden:
Beschreibung des Testablaufes und Beschreibung des Figurentyps (verschiedene Anzahlen von identischen Quadraten die gleichzeitig dargestellt werden).

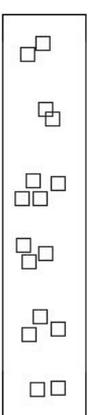


Abbildung 2.7-1 Erkennen der Anzahl von identischen Quadrate.

Bild	Be- schreib- ung	S	Ab- stand	[cm]	AL	Zeit	Zeit	Nach- dem Nach- fragen	[s]	Form erkannt	J	N	Antwort der Probanden	Bemerkung
01	2 Quadrate	1	1,25		8									
02	3 Quadrate	1	0,75		12									
03	3 Quadrate	1	0,5		12									
04	4 Quadrate	1	0,75		16									
05	2 Quadrate	1	-0,75		8									
06	2 Quadrate	1	0,25		8									

weitere Bemerkungen:

4 zwischen den parallelen Linien

10

2.8 Testreihe 8 Unterscheiden von verschiedenen Grössen.

2.8 Testreihe 8 Unterscheiden von verschiedenen Grössen.

Ablauf:
wie Testreihe 2 mit der Variation:
Die Aufgabe besteht für den Proband darin von den beiden dargestellten Quadraten das Grössere zu bestimmen.

Mitteilung an den Probanden:
Beschreibung des Testablaufes und Beschreibung des Figurentyps (jeweils zwei Quadrate unterschiedlicher oder gleicher Grösse pro Bild).

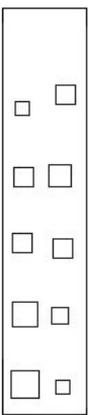


Abbildung 2.8-1 Unterscheiden von verschiedenen Grössen.

Bild	Be- schreib- ung	S	Gf. oben	[cm]	Gf. unten	[cm]	Zeit	Zeit	Nach- dem Nach- fragen	[s]	Form erkannt	J	N	Antwort der Probanden	Bemerkung
01	oben größer	1	5x5		2,5x2,5										
02	oben größer	1	4,5x4,5		3x3										
03	gleich	1	3,5x3,5		3,5x3,5										
04	unten größer	1	3x3		4,5x4,5										
05	unten größer	1	2,5x2,5		5x5										

weitere Bemerkungen:

4 zwischen den parallelen Linien

Abbildung B.5: Auswertungsbögen für Testreihe 7–8

2.9 Testreihe 9 Erkennen unbekannter geometrischer Figuren.

Ablauf:

wie Testreihe 2

Mitteilung an den Probanden:

Beschreibung des Testablaufes und Beschreibung des Figurentyps (einfache Darstellungen, die nicht geschlossen sein müssen).



Abbildung 2.9-1 Erkennen unbekannter geometrischer Figuren.

Bild	Beschreibung	S	Abmessung [cm]	AL Zeit [s]	Zeit nach dem Nachfragen [s]	Form erkannt		Bemerkung
						J	N	
01	Buchstabe L	1	2x3	2				
02	Dreieck	1	7x3,5	3				
03	U	1	3x4	8				
04	Buchstabe Y	2	2x6	3				
05	Kreuz	1	3x3	12				
06	halbes Quadrat	1	3,5x3,5	2				
07	Buchstabe T	1	3,5x2,5	2				
08	1/2 Kreis	1	4x4	2				
09	Quadrat	1	2,5x2,5	4				
10	Buchstabe E	1	2,5x3,5	4				

2.10 Testreihe 20 Erkennen von Snodgrass Figuren.

Ablauf:

wie Testreihe 2 mit der Variation:
Die Probanden haben maximal 3min Zeit

Mitteilung an den Probanden:

Beschreibung des Testablaufes und Beschreibung des Figurentyps (vereinfachte Darstellungen von Alltagsgegenständen, wo bei grössten Teils nur die Umrisse dargestellt wurden).

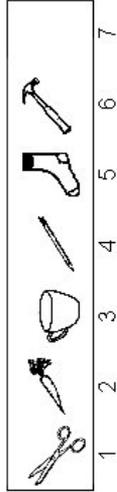


Abbildung 2.10-1 Erkennen von Snodgrass Figuren.

Bild	Beschreibung	S	Abmessung [cm]	AL Zeit [s]	Zeit nach dem Nachfragen [s]	Form erkannt		Bemerkung
						J	N	
01	Schere	1	10,7x10					
02	Mähne	1	10x6,5					
03	Tasse	1	9,3x7,5					
04	Stift	2	10x2,3					
05	Socke	1	10x8					
06	Hammer	1	10,3x8,8					

weitere Bemerkungen:

Abbildung B.6: Auswertungsbögen für Testreihe 9–10

Anhang C

Die Bilder der Testreihen komplet

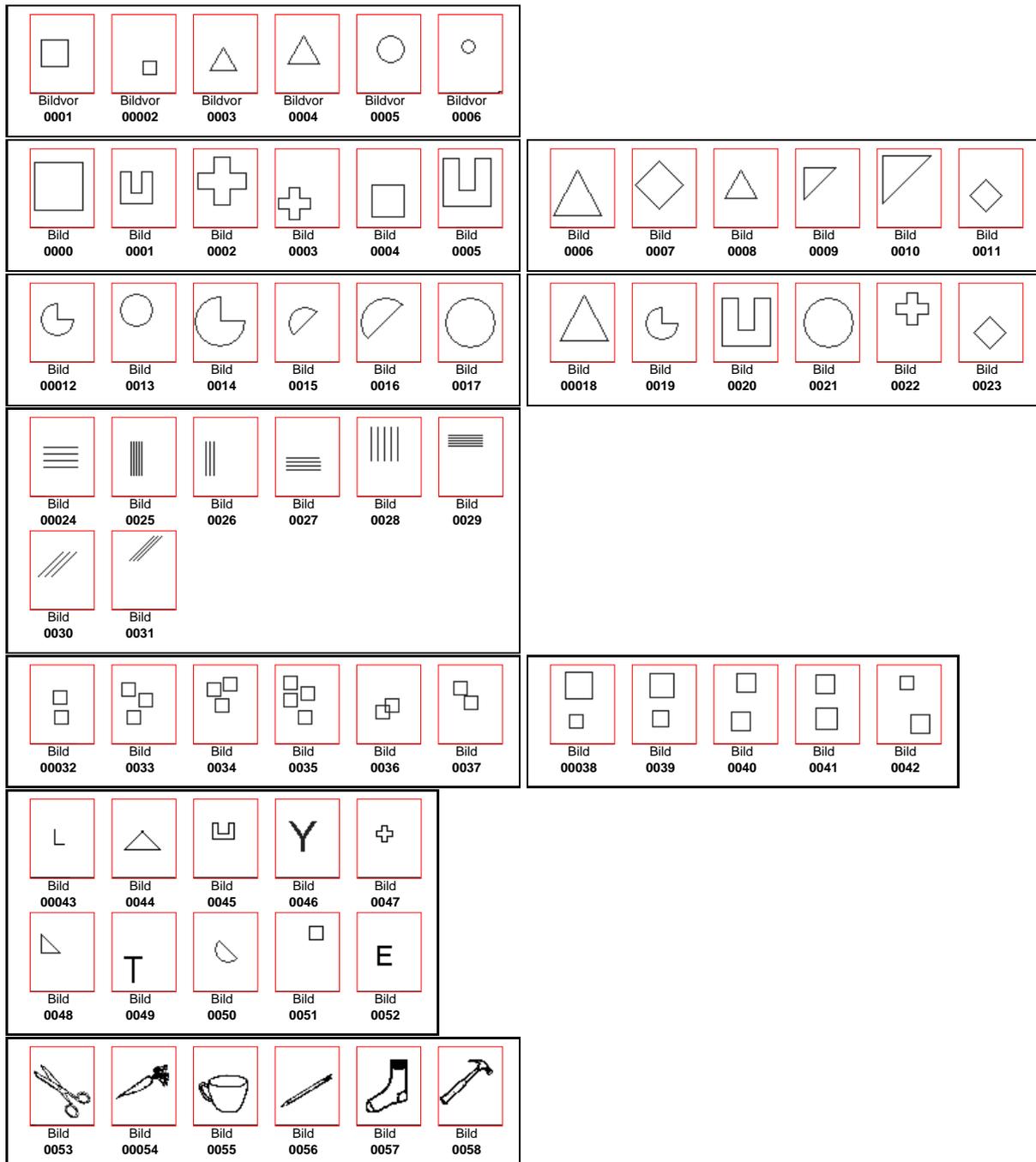


Abbildung C.1: Bilder der Vorbereitung und der Testreihe 2–10

Anhang D

Vergleich der Leistungen der Probanden

D.1 Antworten der Probanden

Bild	Proband A				Proband B				Proband C				Proband D				Gesamt			
	RICHTIG	FALSCH	NICHT	Streichen	RICHTIG	FALSCH	NICHT	Streichen												
0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	1
1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	3	1	0	0
2	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
3	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
4	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	3	1	0	0
5	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	3	1	0	0
6	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
7	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
8	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
9	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
10	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
11	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
12	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	3	1	0	0
13	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
14	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	3	1	0	0
15	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
16	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
17	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	3	1	0	0
18	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
19	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
20	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
21	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
22	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	3	1	0	0
23	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
24	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	3	1	0	0
25	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
26	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
27	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
28	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
29	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	3	1	0	0
30	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
31	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	3	0	0
32	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
33	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
34	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
35	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
36	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	3	1	0	0
37	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
38	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
39	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
40	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	3	1	0	0
41	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	2	2	0	0
42	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
43	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
44	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
45	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
46	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	2	2	0	0
47	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2	1	1	0
48	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
49	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	3	0	1	0
50	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	3	0	1	0
51	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0
52	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	3	0	1	0
53	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	3	0
54	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0
55	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	3	0
56	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	2	0	2	0
57	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	3	0
58	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	0	2	0
Prüfsumme																			1	
Anzahl																			00_23,32_42	35
Summe																			00_23,32_42	128
Ratio																			00_23,32_42	0,9143
Prozent																			00_23,32_42	91,43%

Tabelle D.1: Antworten der Gruppe der Sehenden beim Erkennen der Figuren
(1 bedeutet die Figur wurde richtig, falsch, nicht erkannt bzw die Testreihe wurde nicht durchgeführt)

D.2 Veranschaulichung der Antworten

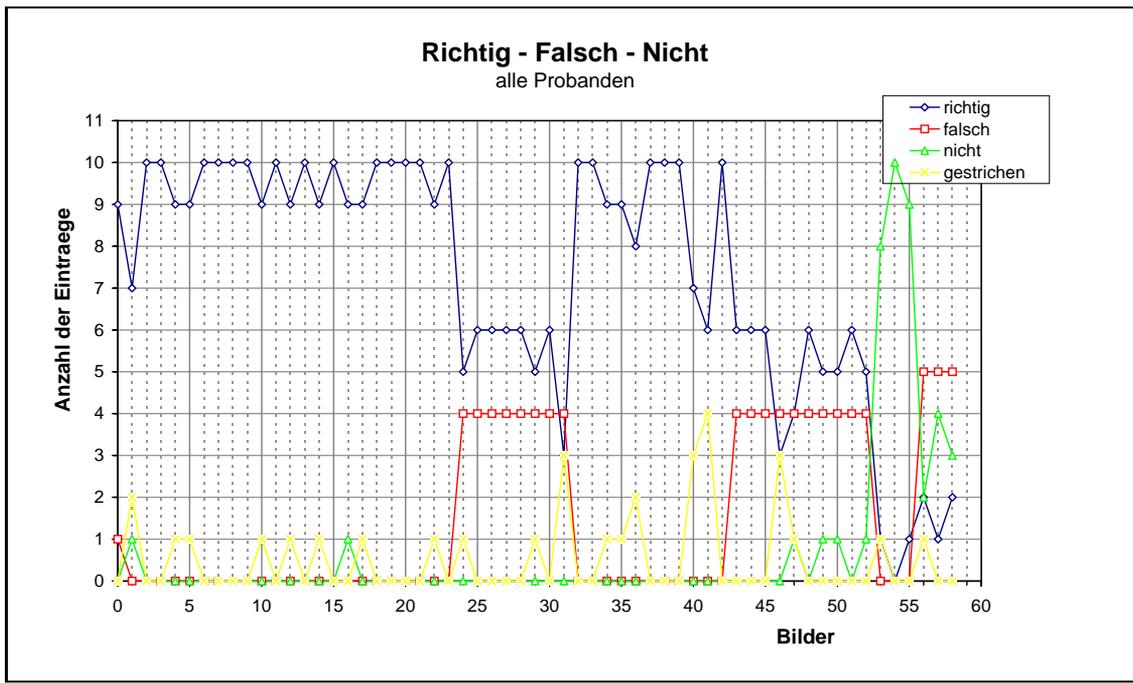


Abbildung D.1: Überblick über die Anzahl der richtig, falsch und nicht erkannten Bilder aller Testreihen bei allen Probanden. Testreihen die nicht ausgeführt wurden bzw. nicht auswertbar sind, sind als gestrichen gekennzeichnet.

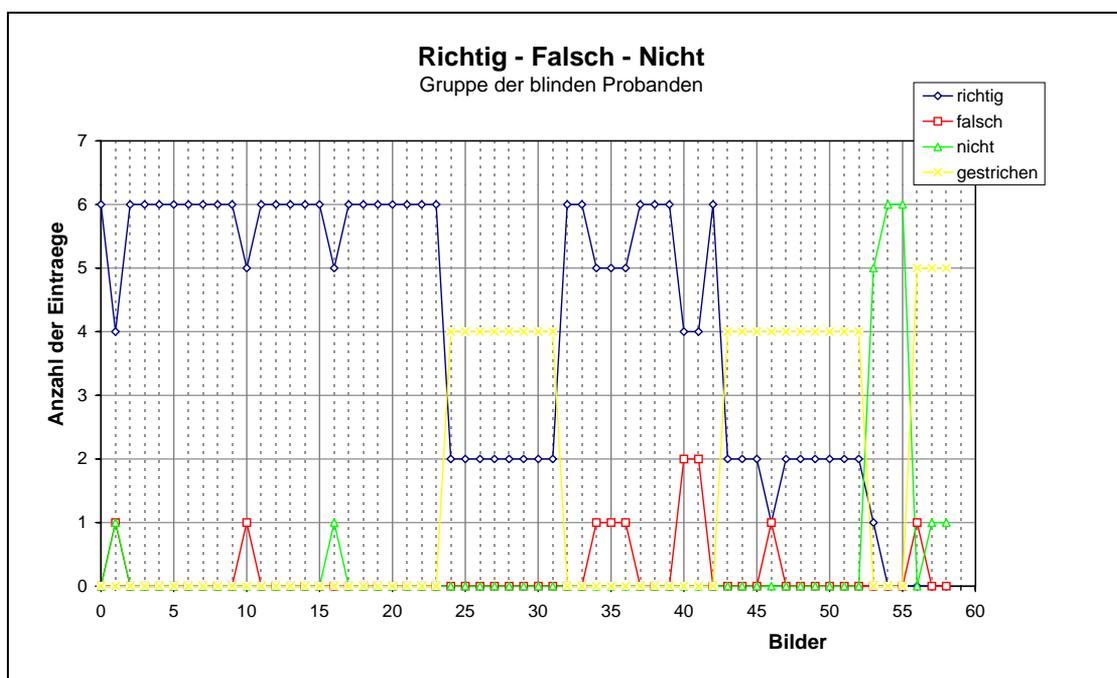
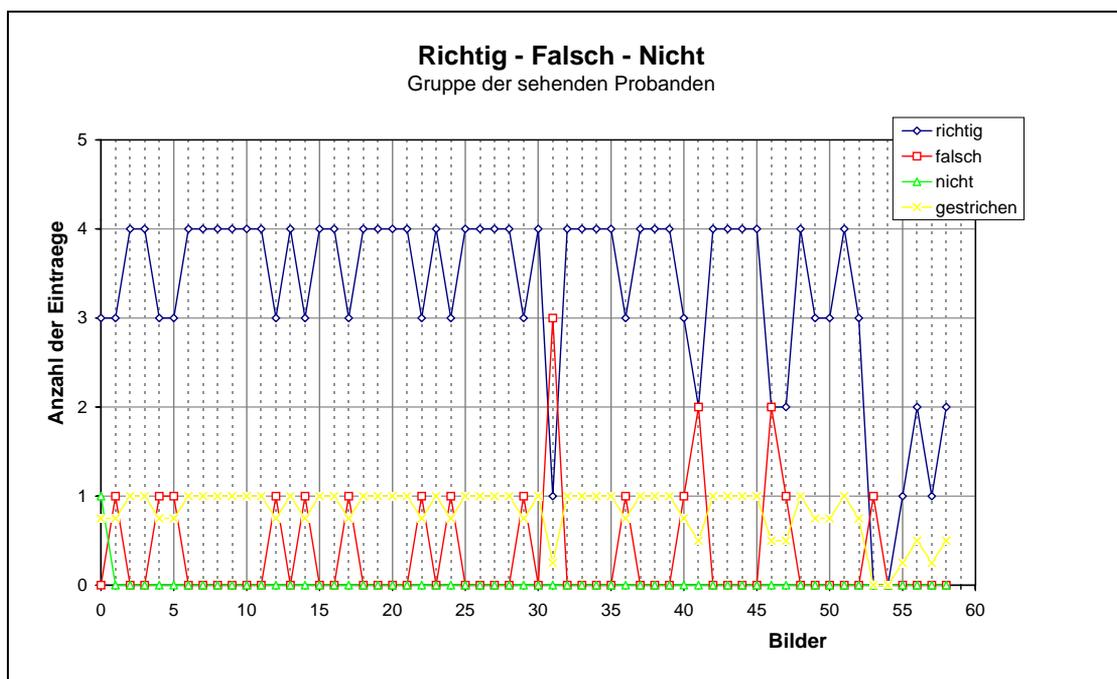


Abbildung D.2: Überblick über die Anzahl der richtig, falsch und nicht erkannten Bilder aller Testreihen.

oben ist das Diagramm für die Gruppe der sehenden Probanden dargestellt.

unten ist das Diagramm für die Gruppe der blinden Probanden dargestellt.

Testreihen die nicht ausgeführt wurden bzw. nicht auswertbar sind, sind als gestrichen gekennzeichnet.

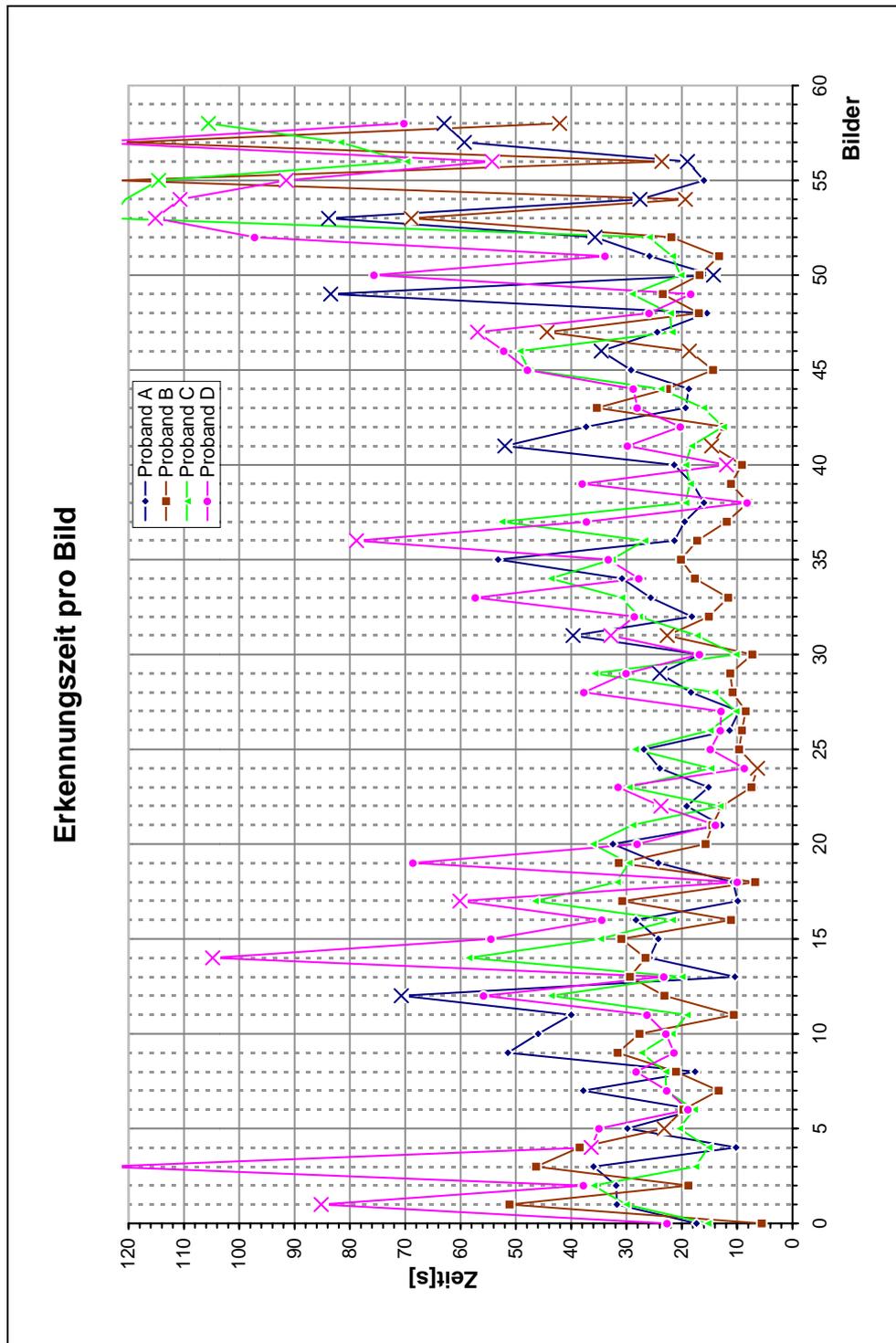


Abbildung D.3: Vergleich der Zeiten, die die sehenden Probanden benötigen, um die einzelnen Aufgaben zu lösen. Die Kreuze kennzeichnen Bilder bei denen die Aufgabe nicht richtig gelöst wurde.

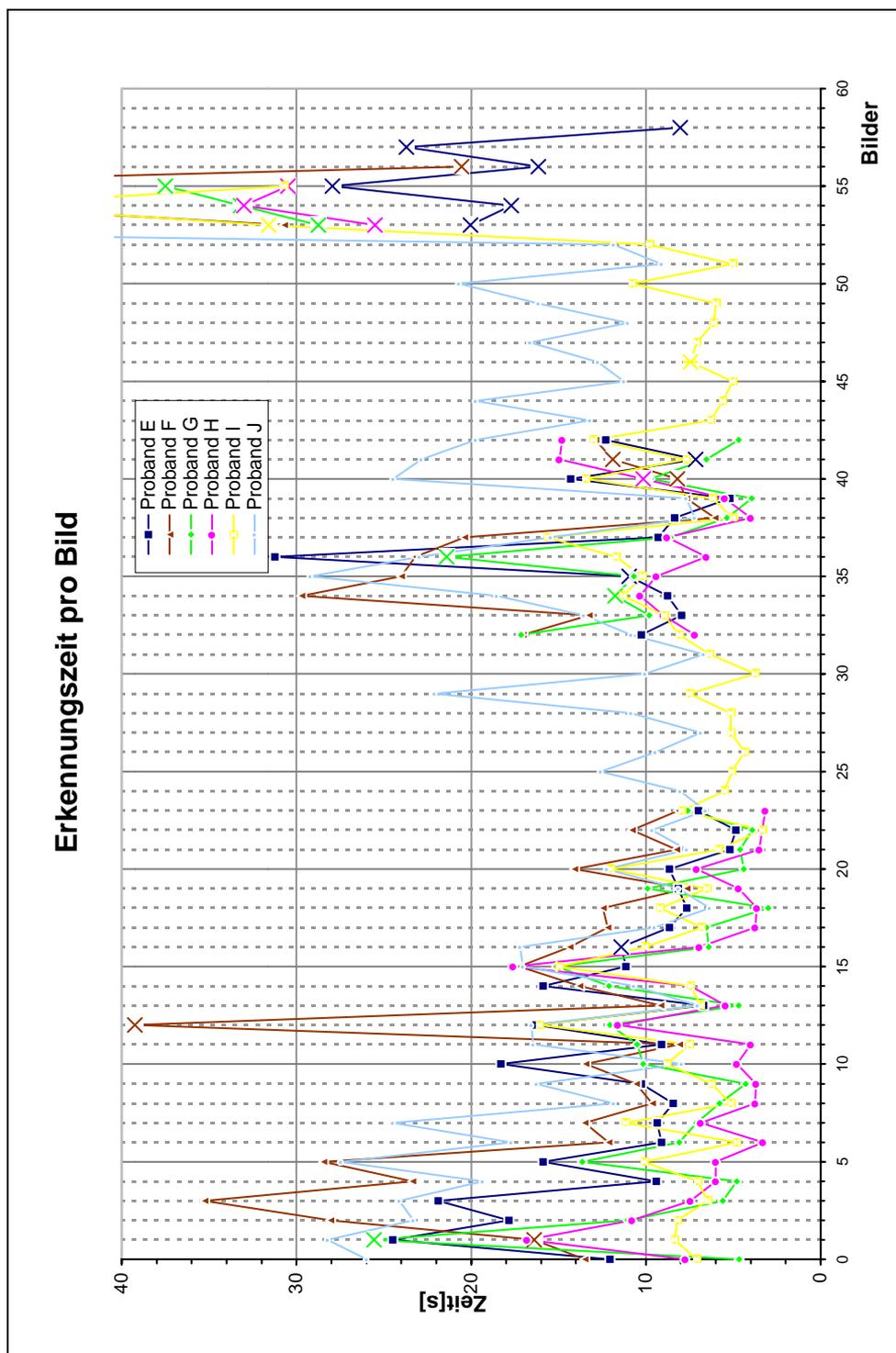


Abbildung D.4: Vergleich der Zeiten, die die blinden Probanden benötigen, um die einzelnen Aufgaben zu lösen. Die Kreuze kennzeichnen Bilder bei denen die Aufgabe nicht richtig gelöst wurde.

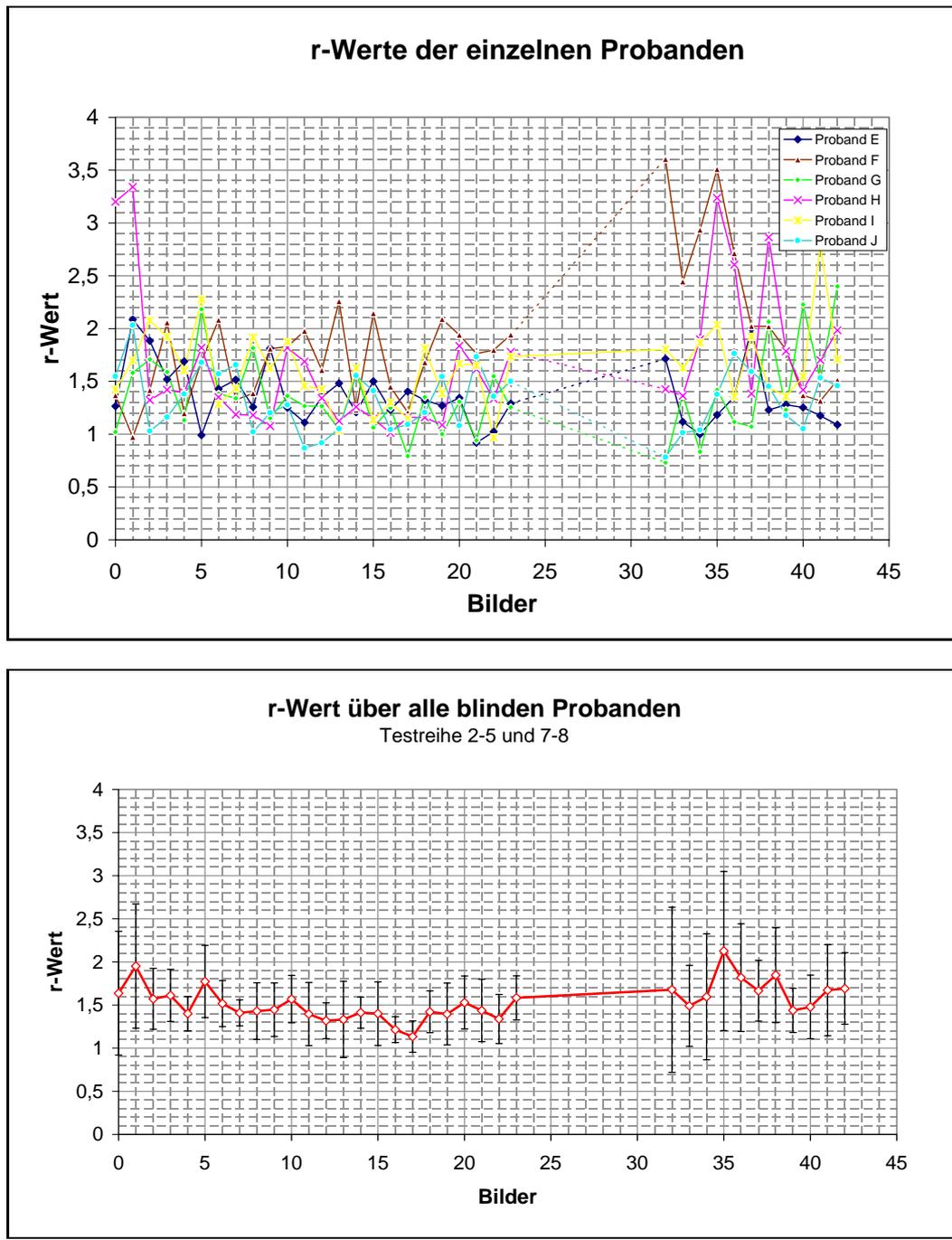


Abbildung D.5: Überblick über die r -Werte der blinden Probanden.
oben: das r -Werte Diagramm nach einzelnen Probanden aufgeschlüsselt
unten: zusätzlich zu Abbildung 4.13, die unterschiedlich starken Variationen der r -Werte innerhalb der einzelnen Bilder.

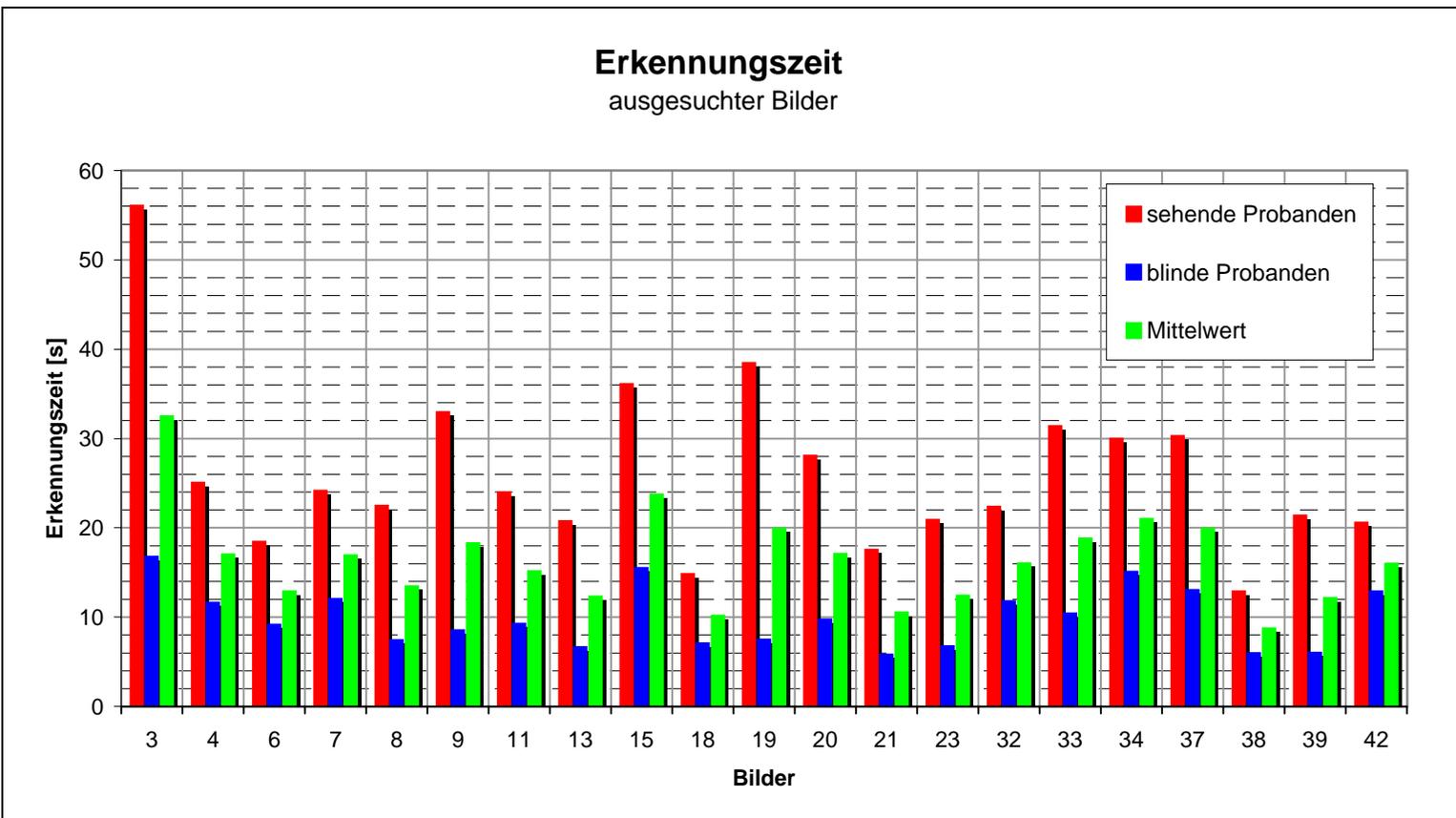
Anhang E

Abbildungen zur taktilen Wahrnehmung

Testreihe	Bilder				
2	3	4			
3	6	7	8	9	11
4	13	15			
5	18	19	20	21	23
7	32	33	34	37	
8	38	39	40		

Tabelle E.1: Bilder für die Beobachtungen zur taktilen Wahrnehmung

Abbildung E.1: Erkennungszeiten bei den einzelnen Bildern für die taktile Wahrnehmung



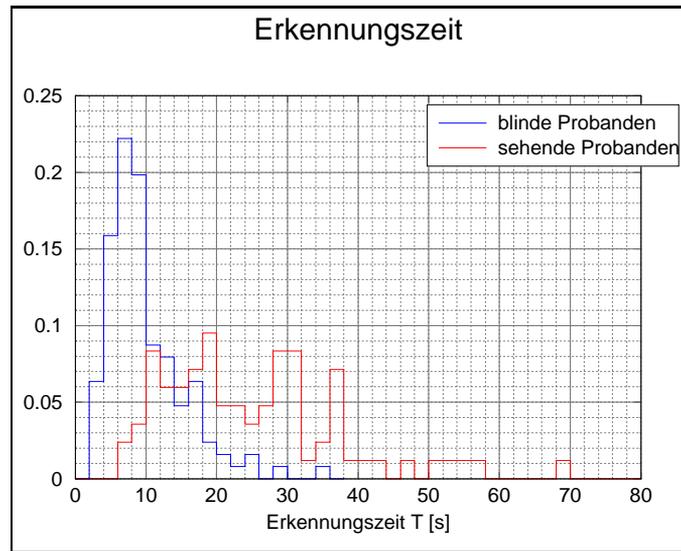


Abbildung E.2: Vergleich der Erkennungszeit bei den beiden Gruppe.

sehende Probanden: $mean : 26.1 s$ $rms : 14.4 s$

blinde Probanden: $mean : 10.0 s$ $rms : 5.77 s$

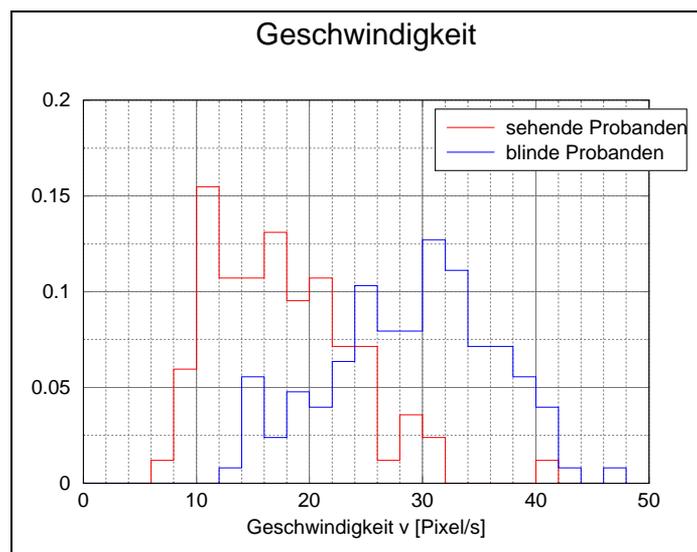
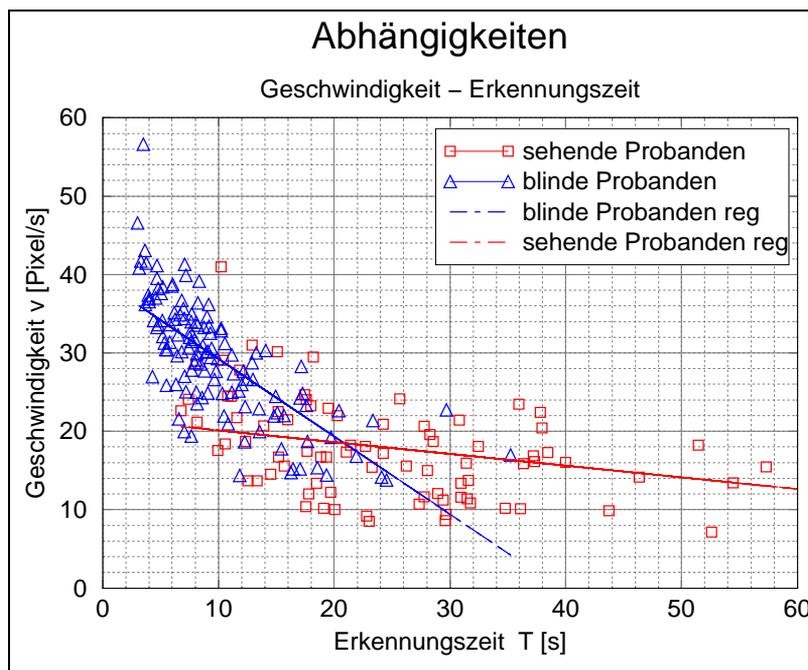


Abbildung E.3: Vergleich der Geschwindigkeiten bei der Gruppe der Sehenden und der Gruppe der Blinden.

sehende Probanden: $mean : 29.3 Pixel/s$ $rms : 17.61 Pixel/s$

blinde Probanden: $mean : 17.5 Pixel/s$ $rms : 6.22 Pixel/s$



Berechnung der linearen Regression für die Gruppe der Sehenden

Number of observations = 84
 Mean of independent variable = 26.13274
 Mean of dependent variable = 17.54671
 Standard dev. of ind. variable = 16.50149
 Standard dev. of dep. variable = 6.261826
 Correlation coefficient = -0.4110111
 Regression coefficient (SLOPE) = -0.1559666
 Standard error of coefficient = 0.03820232
 t - value for coefficient = -4.082646
 Regression constant (INTERCEPT) = 21.62255
 Standard error of constant = 1.1787
 t - value for constant = 18.34441

Analysis of variance

Source	d.f	Sum of squares	Mean Square	F
Regression	1	549.778	549.778	16.668
Residual	82	2704.691	32.98404	

Berechnung der linearen Regression für die Gruppe der Blinden

Number of observations = 126
 Mean of independent variable = 9.965476
 Mean of dependent variable = 29.27565
 Standard dev. of ind. variable = 5.593015
 Standard dev. of dep. variable = 7.646382
 Correlation coefficient = -0.7244571
 Regression coefficient (SLOPE) = -0.9904275
 Standard error of coefficient = 0.08462914
 t - value for coefficient = -11.70315
 Regression constant (INTERCEPT) = 39.14573
 Standard error of constant = 0.9661975
 t - value for constant = 40.51525

Analysis of variance

Source	d.f	Sum of squares	Mean Square	F
Regression	1	3835.724	3835.724	136.9637
Residual	124	3472.67	28.00541	

Abbildung E.4: Abhängigkeit zwischen der Geschwindigkeit und der Erkennungszeit im Vergleich der beiden Gruppen.

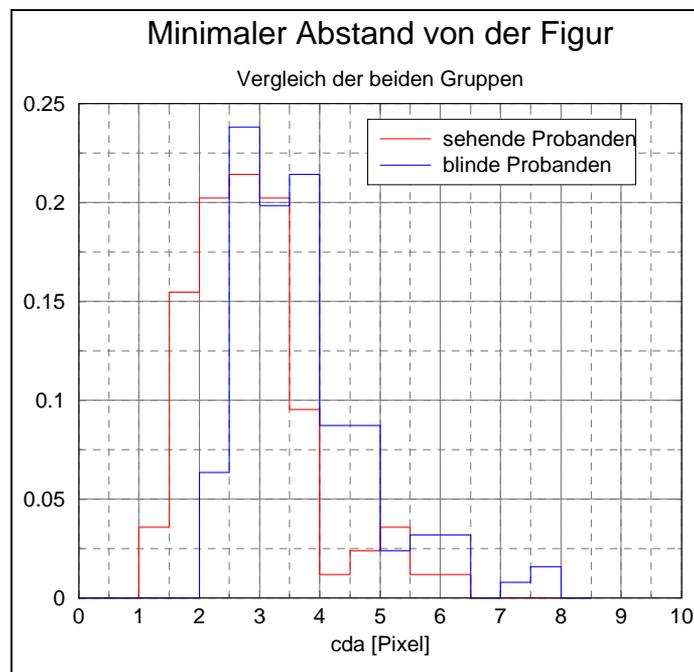


Abbildung E.5: Vergleich des minimalen Abstandes bei der Gruppe der Sehenden und der Gruppe der Blinden. Die Berechnung von *cda* erfolgt nach Formel 4.4

sehende Probanden: *mean* : 2.87 Pixel *rms* : 1.00 Pixel

blinde Probanden: *mean* : 3.71 Pixel *rms* : 1.12 Pixel

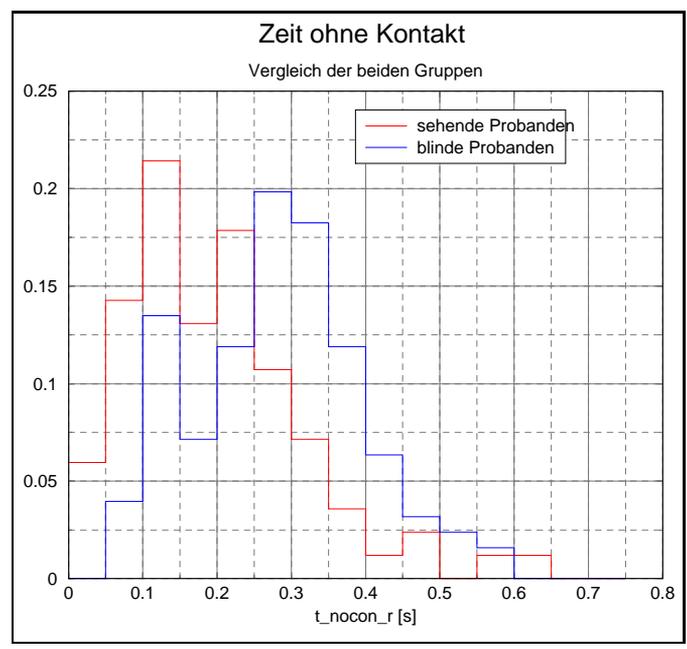


Abbildung E.6: Vergleich der Zeit ohne Kontakt bei der Gruppe der Sehenden und der Gruppe der Blinden. Die Berechnung von t_{nocon_r} erfolgt nach Formel 4.5
 sehende Probanden: $mean : 0.20$ $rms : 0.121$
 blinde Probanden: $mean : 0.28$ $rms : 0.113$

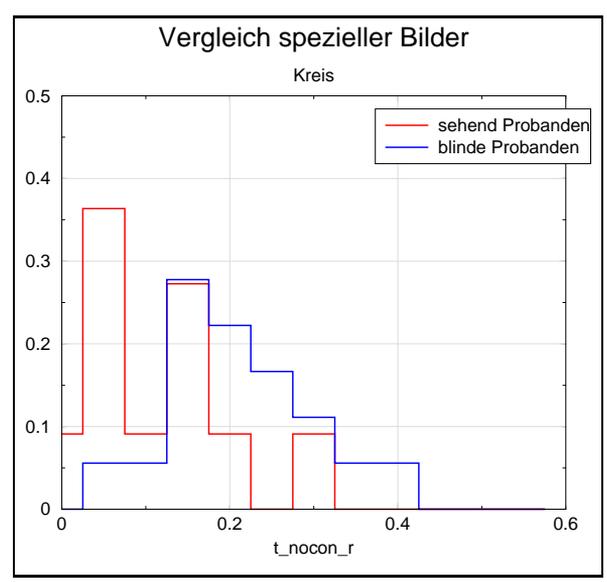


Abbildung E.7: Vergleich der Zeit ohne Kontakt beim Kreis.
 sehende Probanden: $mean : 0.12$ $rms : 0.080$
 blinde Probanden: $mean : 0.21$ $rms : 0.076$

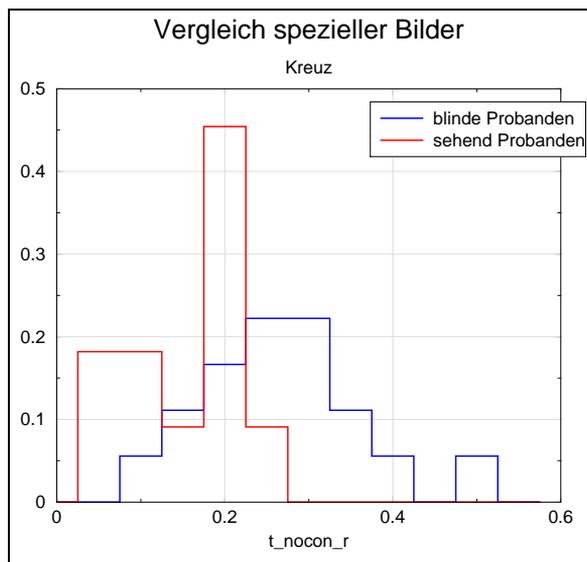


Abbildung E.8: Vergleich der Zeit ohne Kontakt beim Kreuz.

sehende Probanden: $mean : 0.16$ $rms : 0.068$

blinde Probanden: $mean : 0.27$ $rms : 0.095$

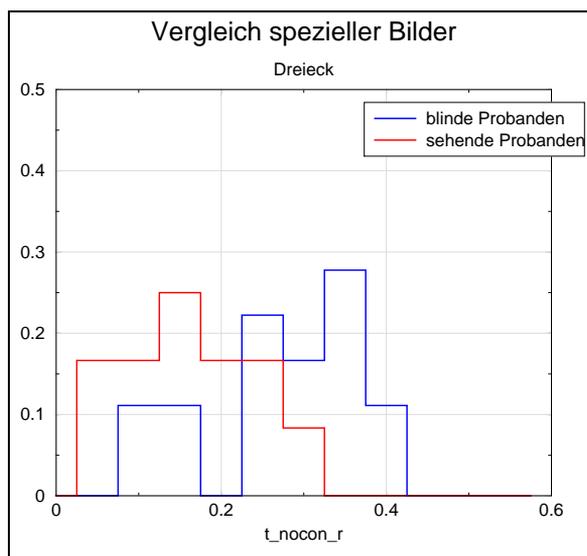


Abbildung E.9: Vergleich der Zeit ohne Kontakt beim Dreieck.

sehende Probanden: $mean : 0.16$ $rms : 0.078$

blinde Probanden: $mean : 0.28$ $rms : 0.088$

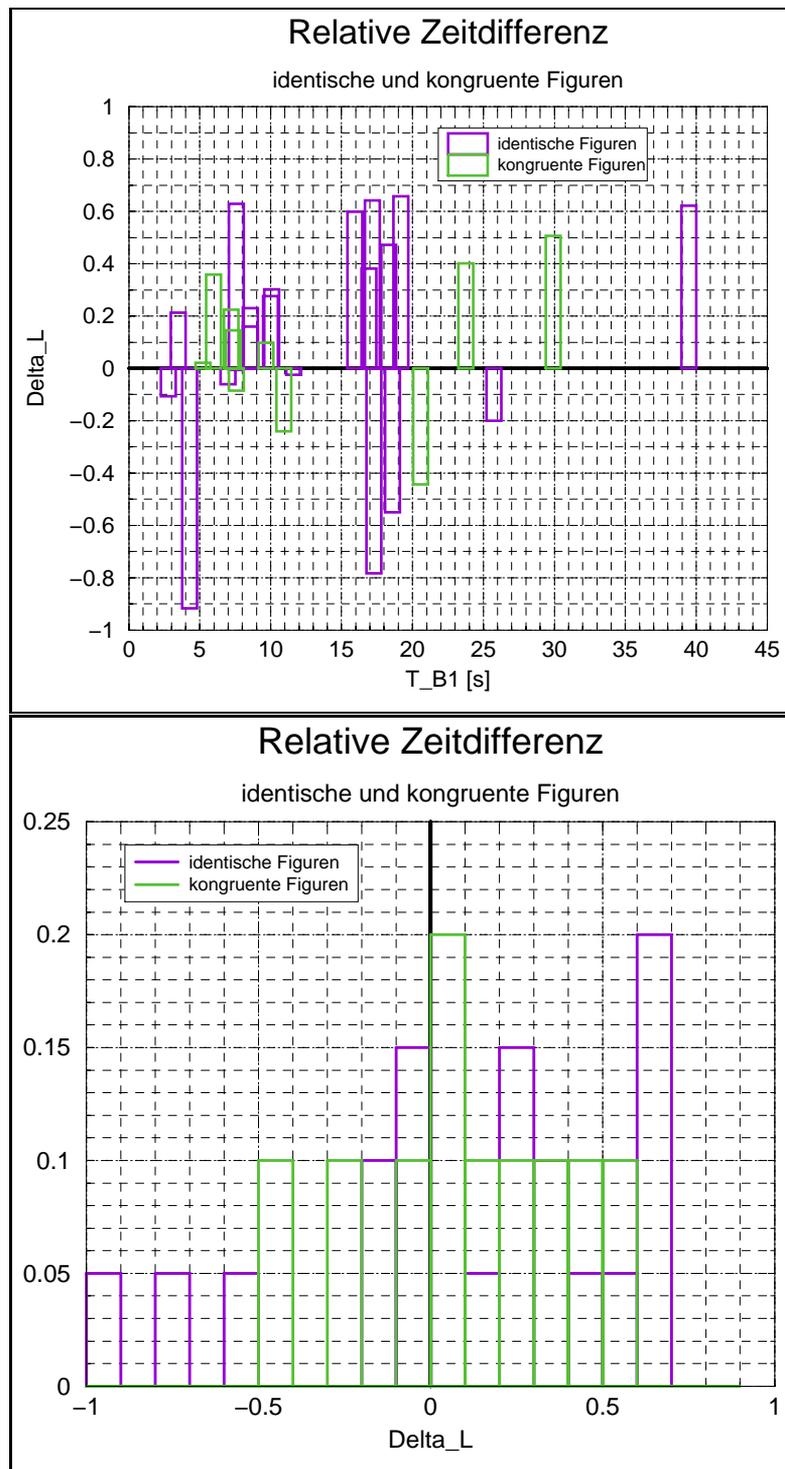


Abbildung E.10: Vergleich der Leistungen bei wiederholter Darstellung von identischen und kongruenten Figuren. Im Diagramm oben Δ_L in Abhängigkeit der Zeit und unten das Histogramm mit:

identische Figuren: $mean : 0.13$ $rms : 0.455$

kongruente Figuren: $mean : 0.10$ $rms : 0.281$

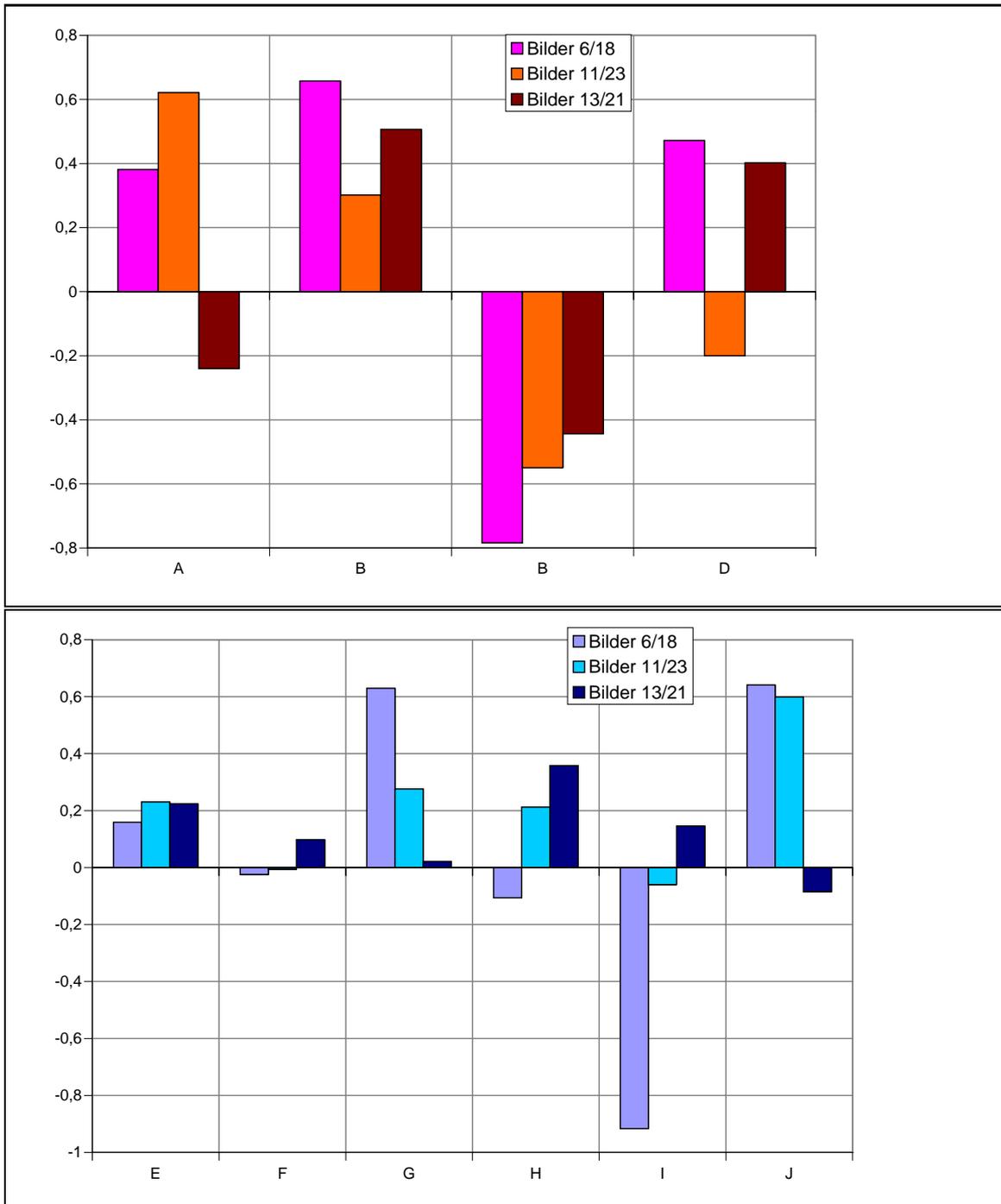


Abbildung E.11: Leistungen der einzelnen Probanden bei der wiederholten Darstellung von identischen Figuren und kongruenten Figuren. Im Diagramm links sind die Leistungen der sehenden und rechts der blinden Gruppe eingezeichnet.

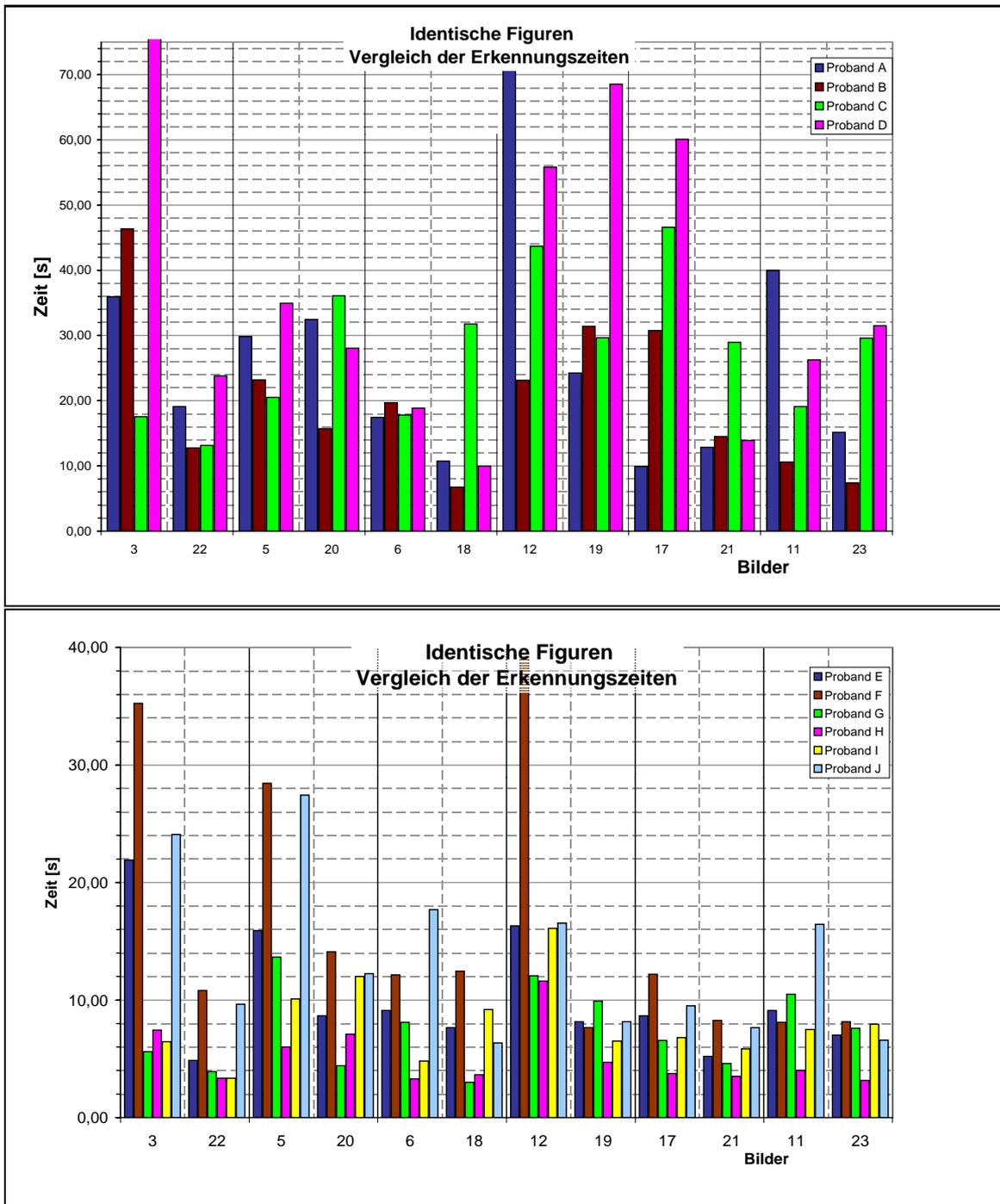


Abbildung E.12: Vergleich der Erkennungszeiten von allen identischen Bildern ohne Berücksichtigung der Richtigkeit der Antwort.

Anhang F

Die Weg-Zeit-Plots

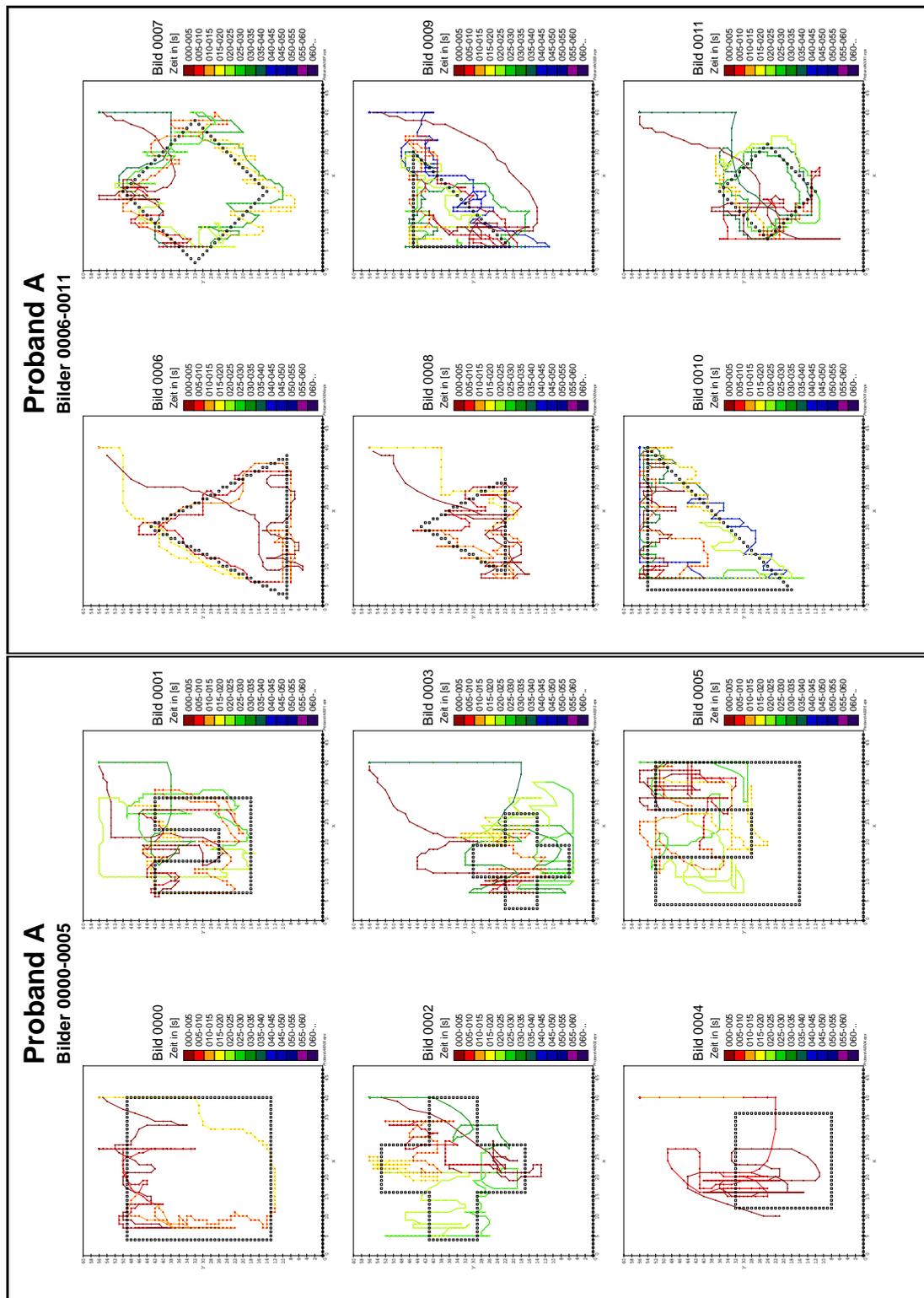


Abbildung F.1: Weg-Zeit-Plots des Probanden A Bild 0000–0011

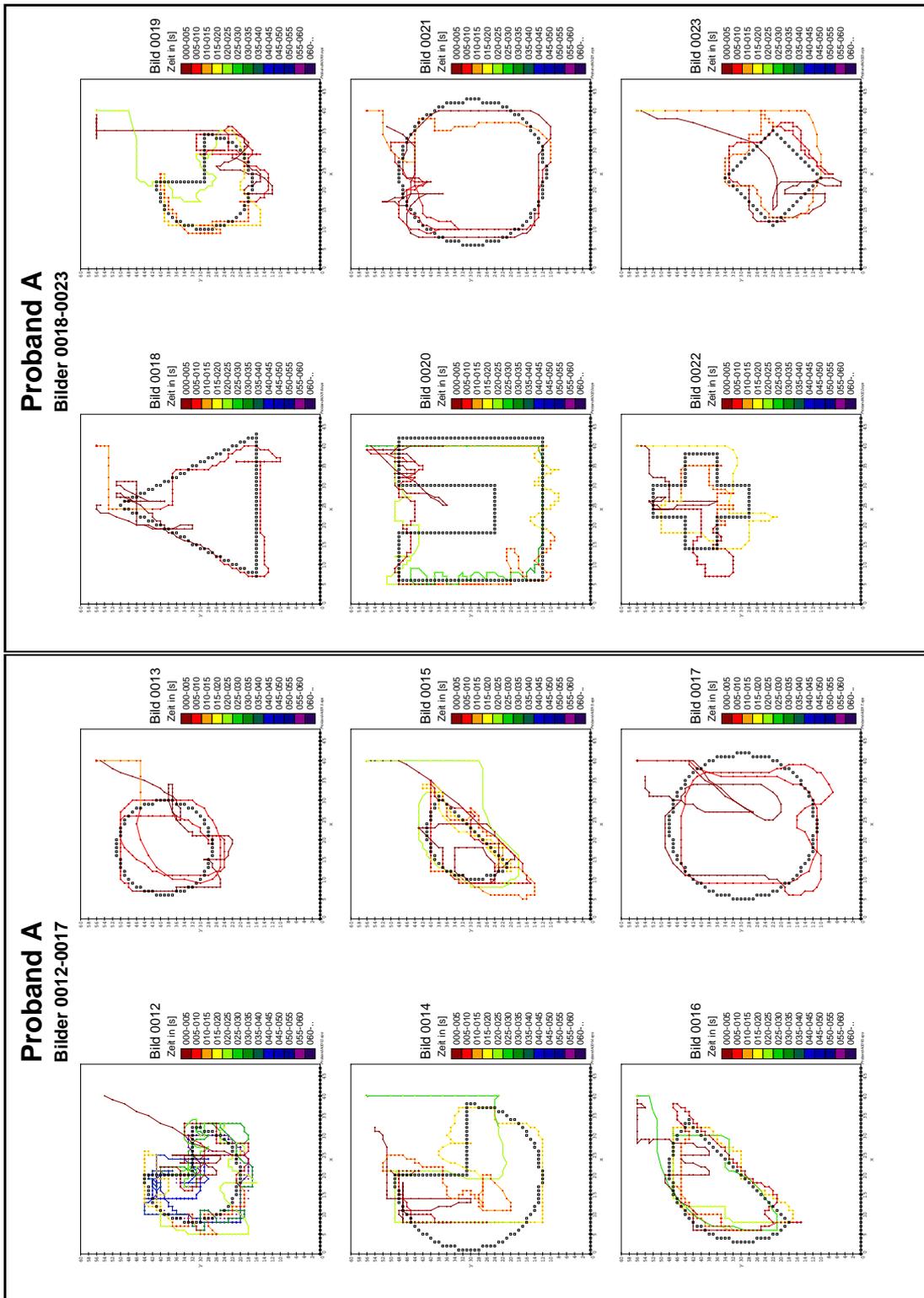


Abbildung F.2: Weg-Zeit-Plots des Probanden A Bild 0012–0023

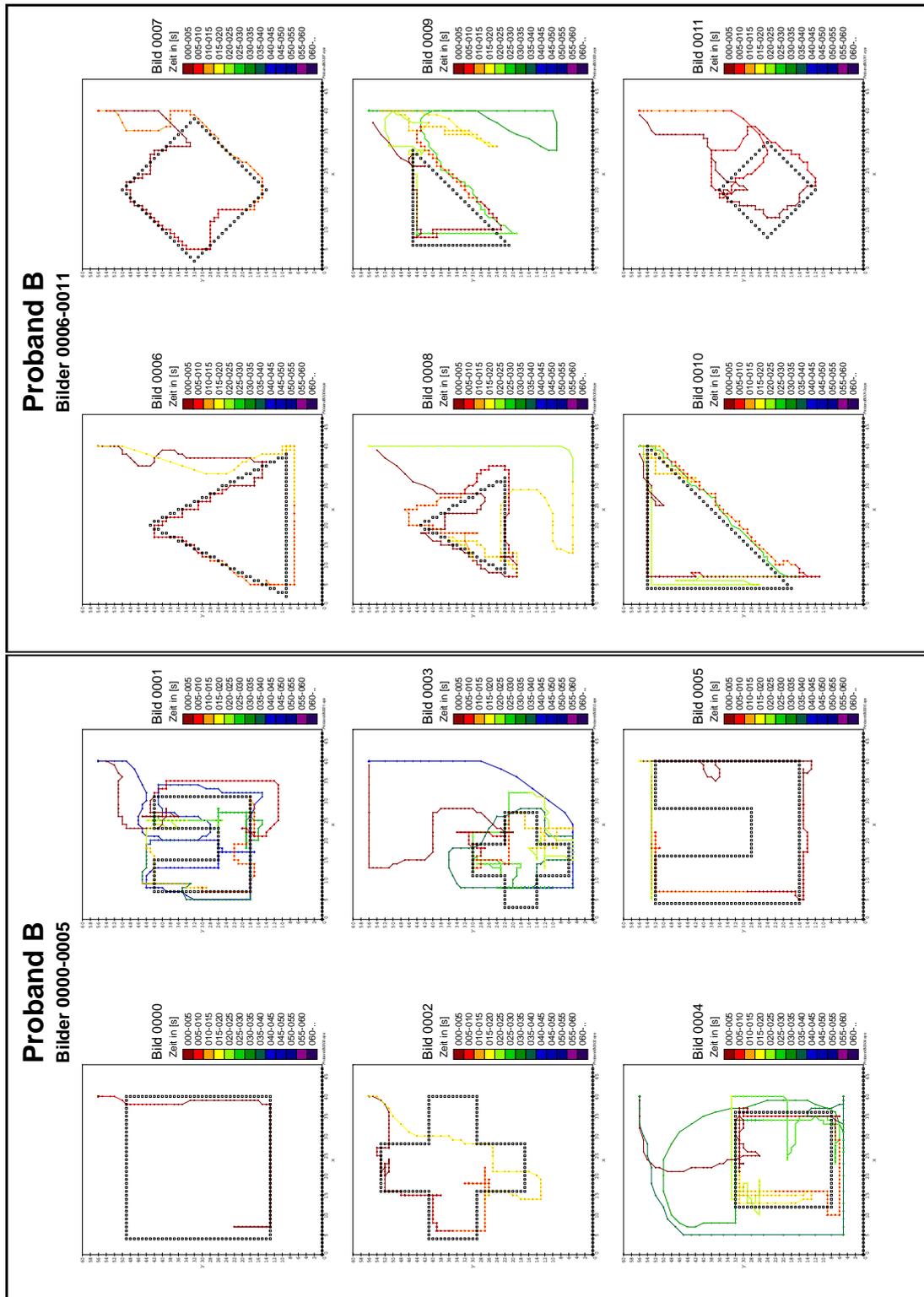


Abbildung F.3: Weg-Zeit-Plots des Probanden B Bild 0000–0011

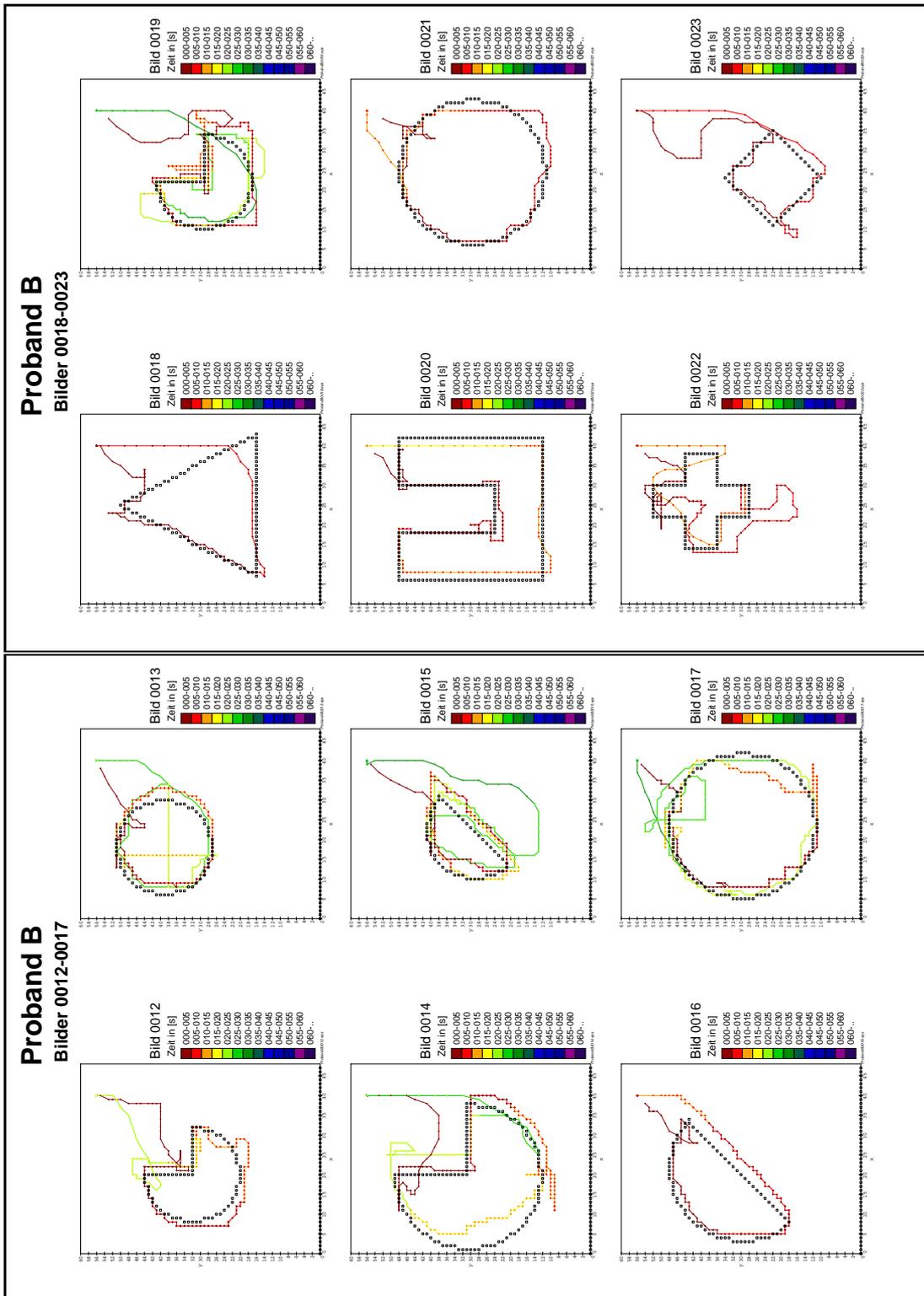


Abbildung F.4: Weg-Zeit-Plots des Probanden B Bild 0012–0023

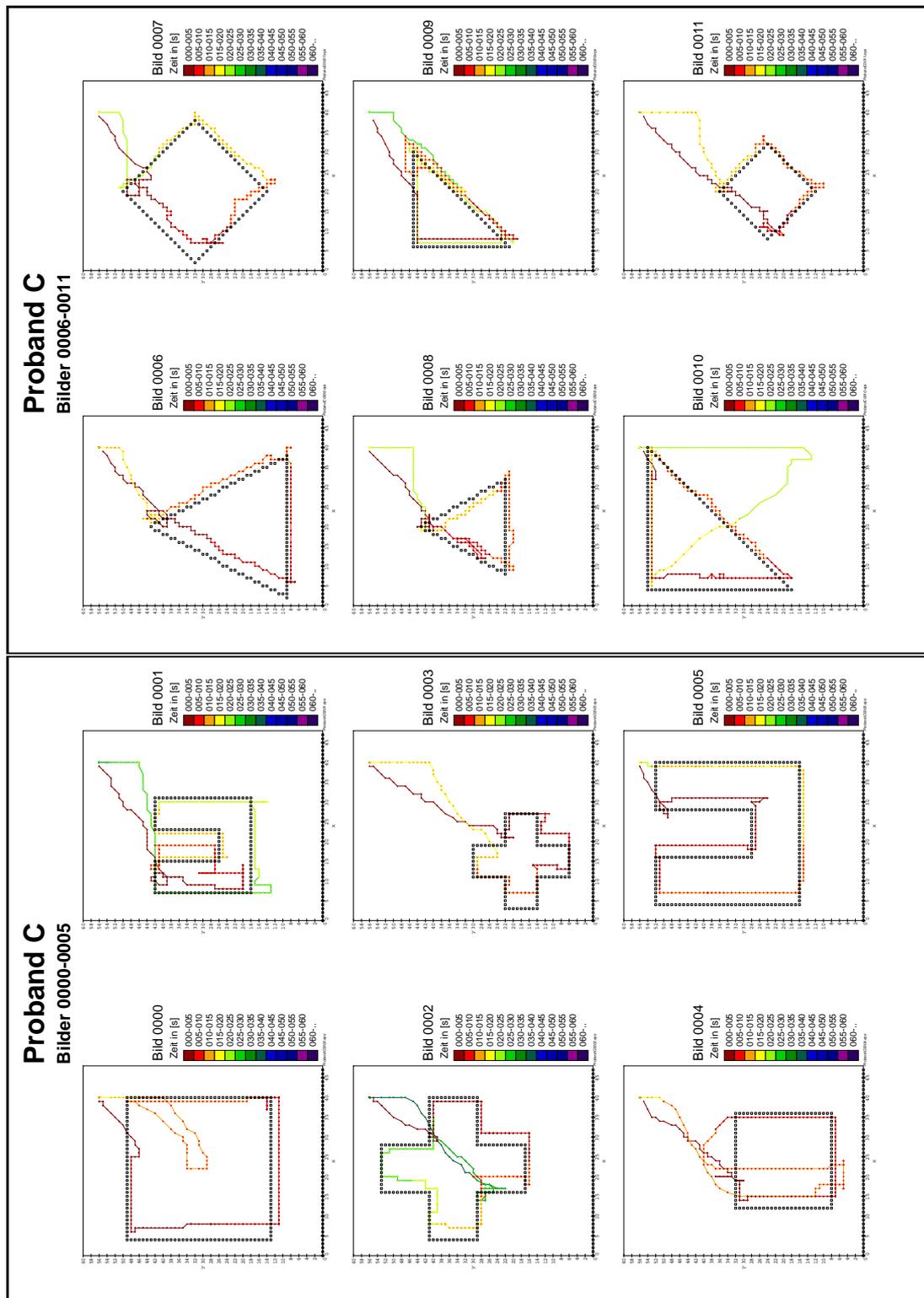


Abbildung F.5: Weg-Zeit-Plots des Probanden C Bild 0000–0011

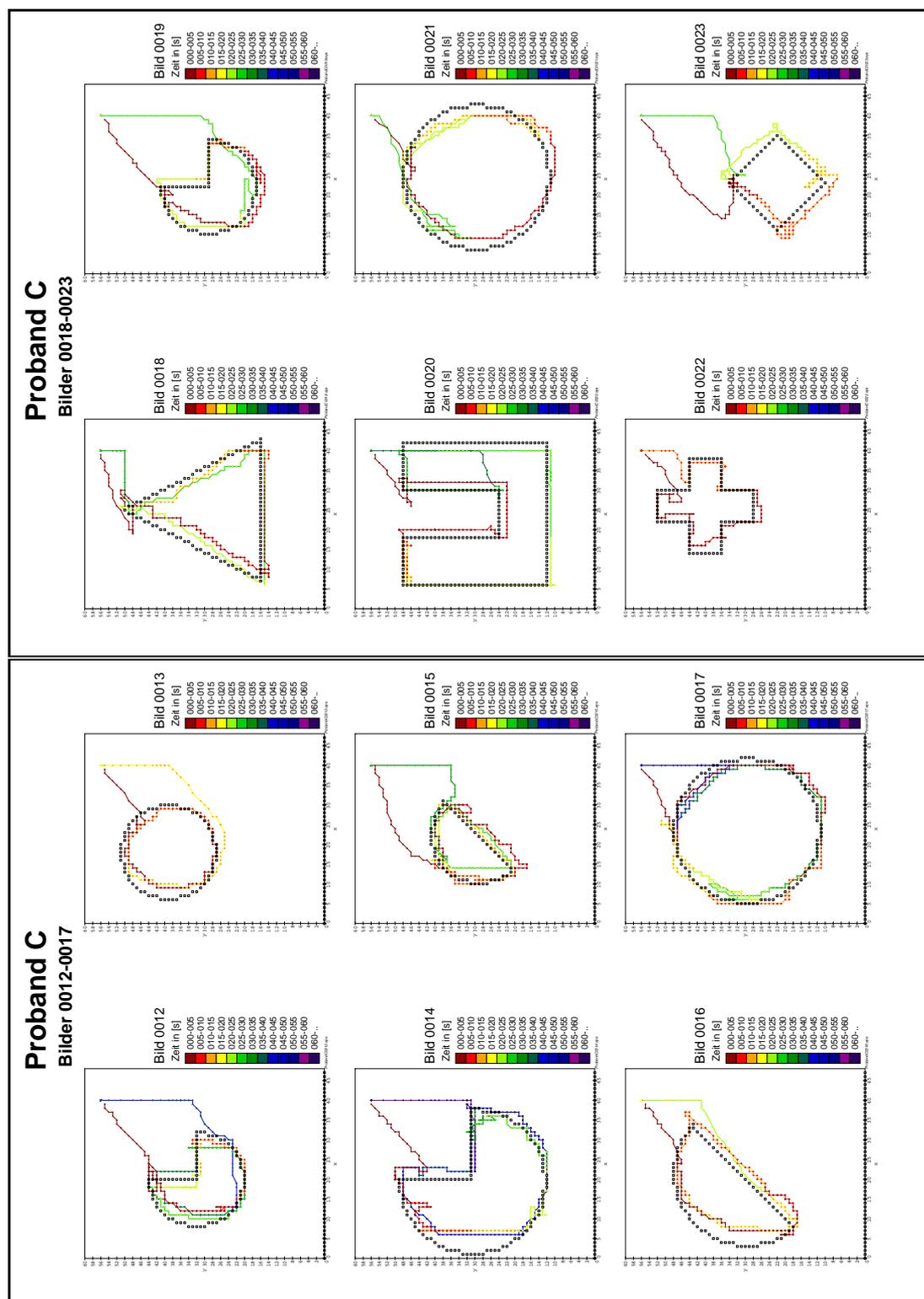


Abbildung F.6: Weg-Zeit-Plots des Probanden C Bild 0012–0023

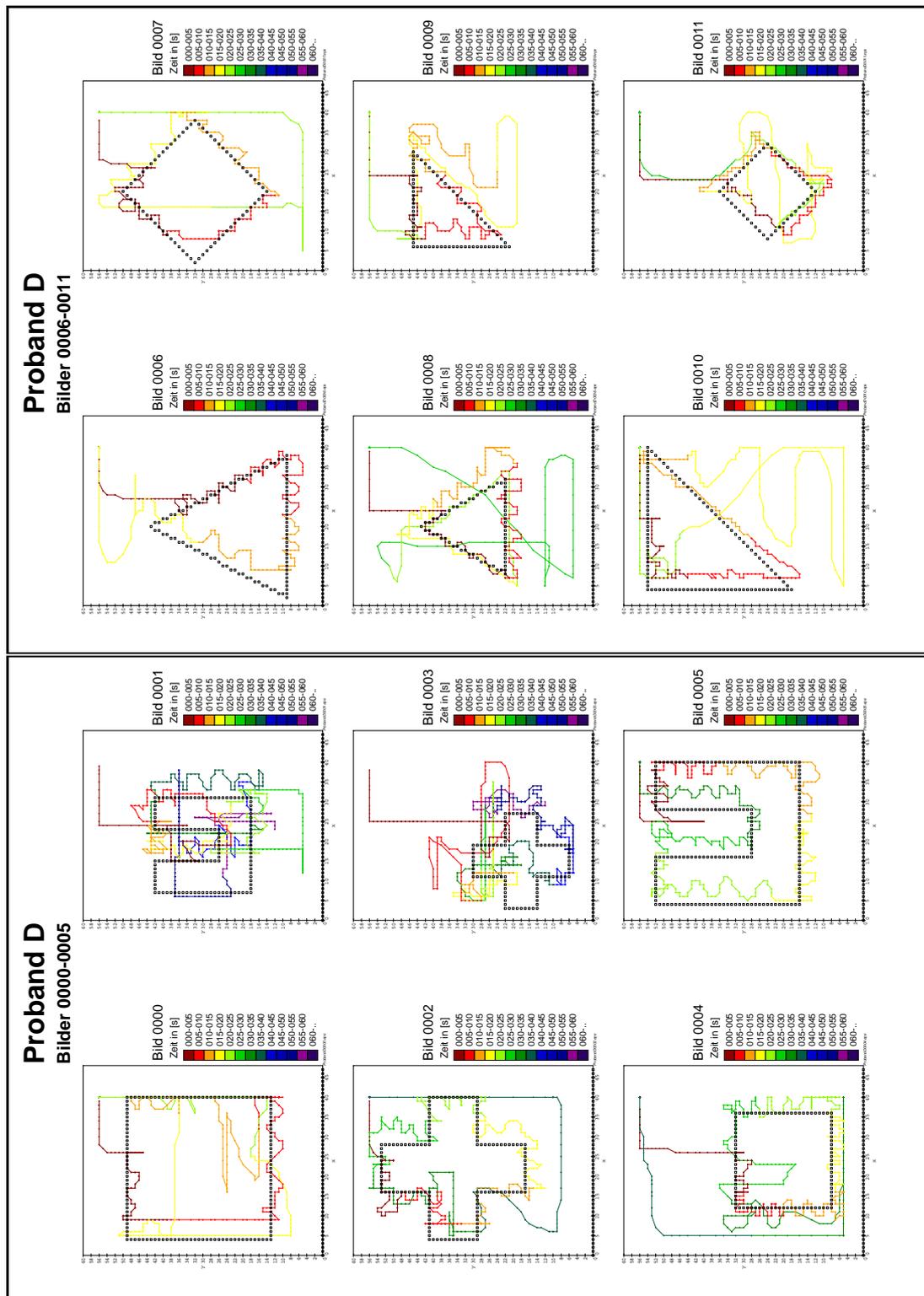


Abbildung F.7: Weg-Zeit-Plots des Probanden D Bild 0000–0011

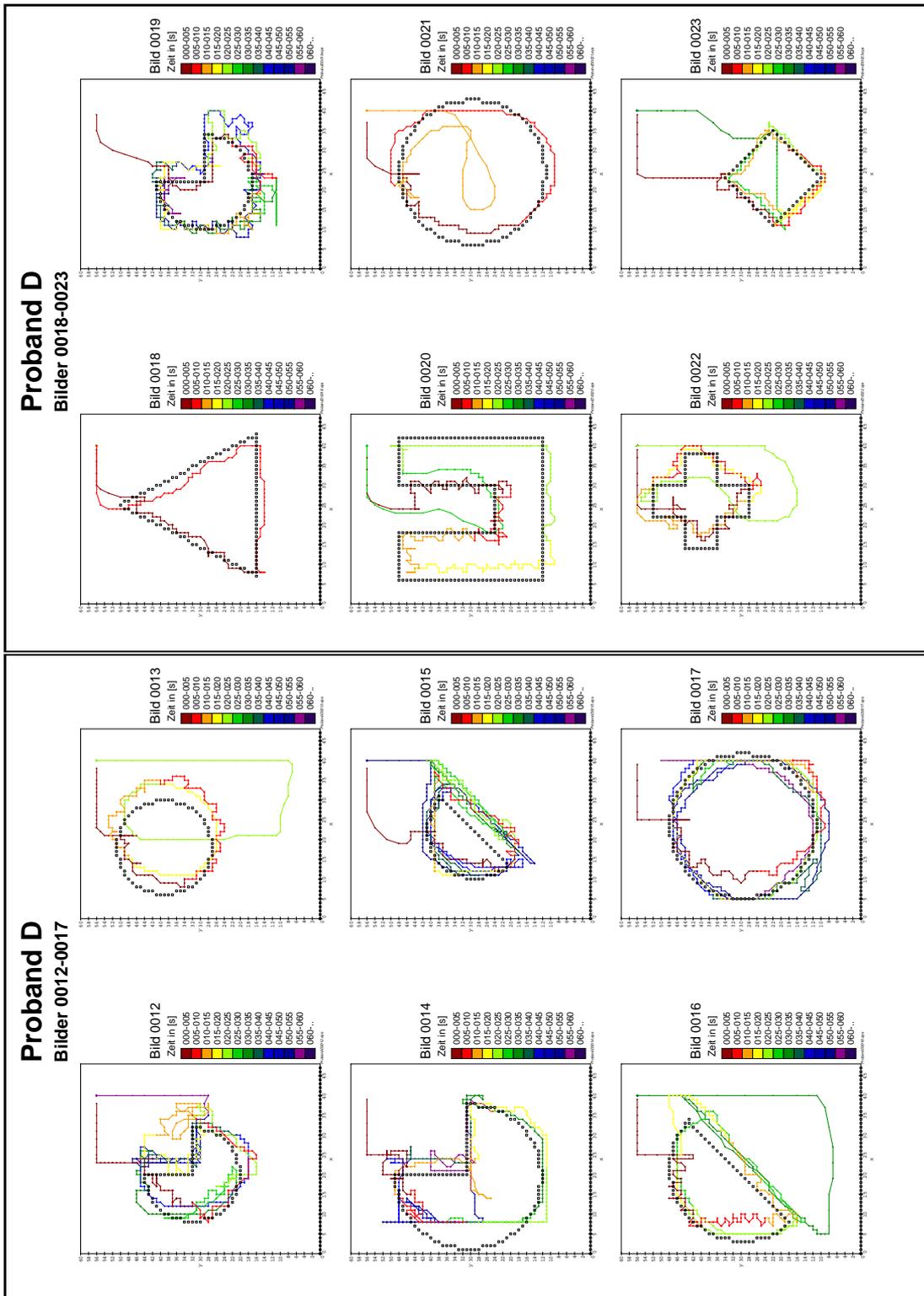


Abbildung F.8: Weg-Zeit-Plots des Probanden D Bild 0012–0023

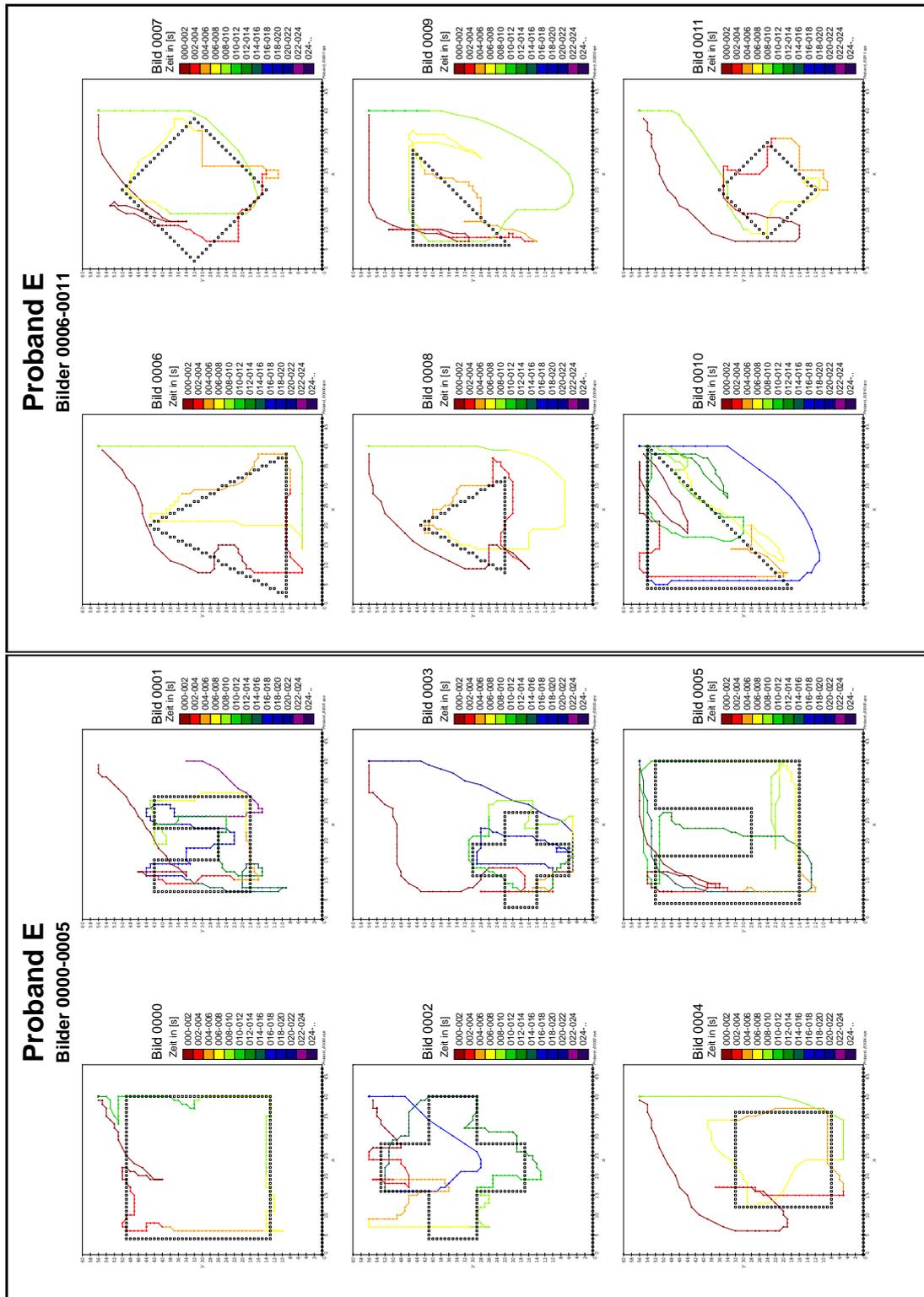


Abbildung F.9: Weg-Zeit-Plots des Probanden E Bild 0000–0011

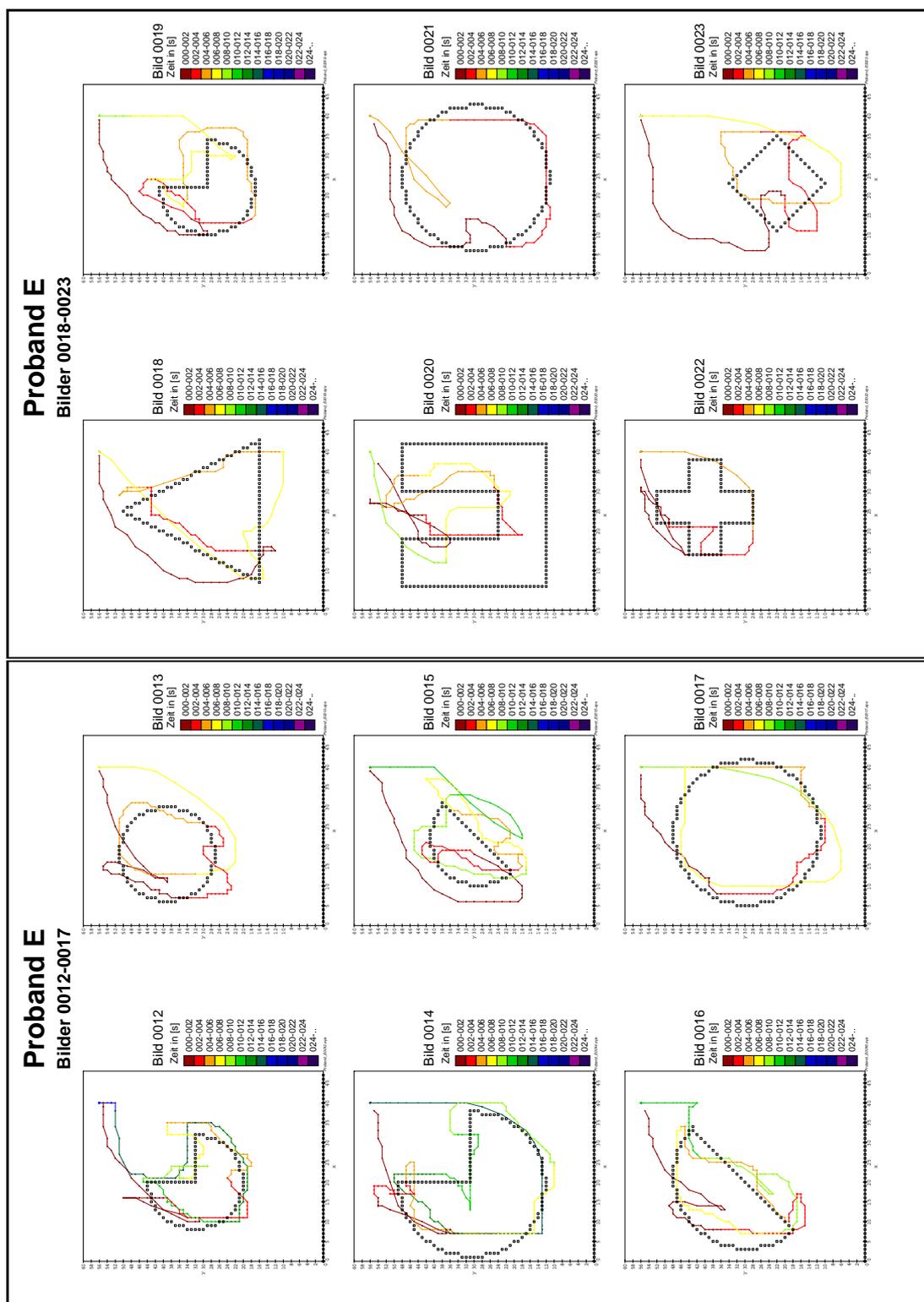


Abbildung F.10: Weg-Zeit-Plots des Probanden E Bild 0011–0023

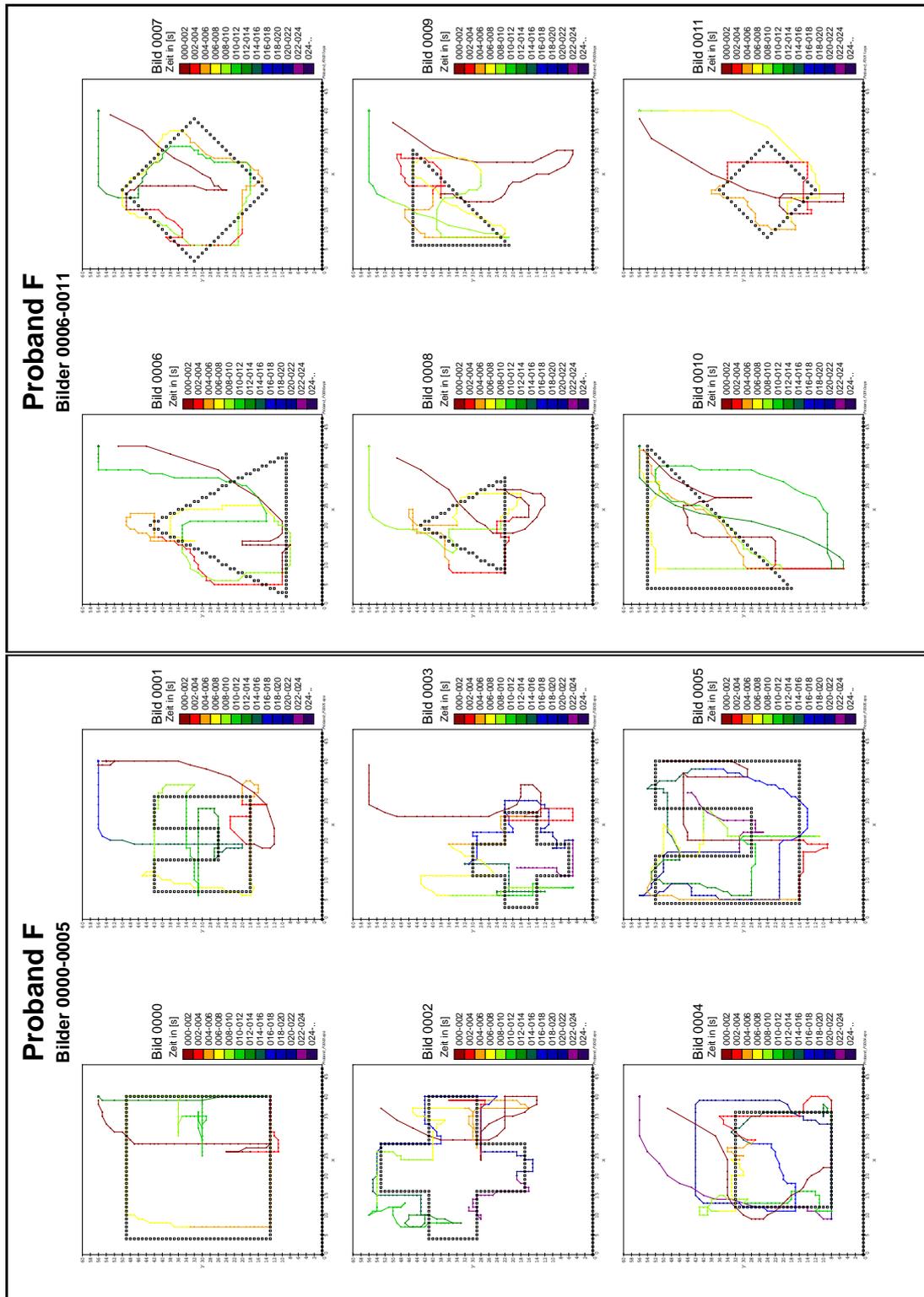


Abbildung F.11: Weg-Zeit-Plots des Probanden F Bild 0000–0011

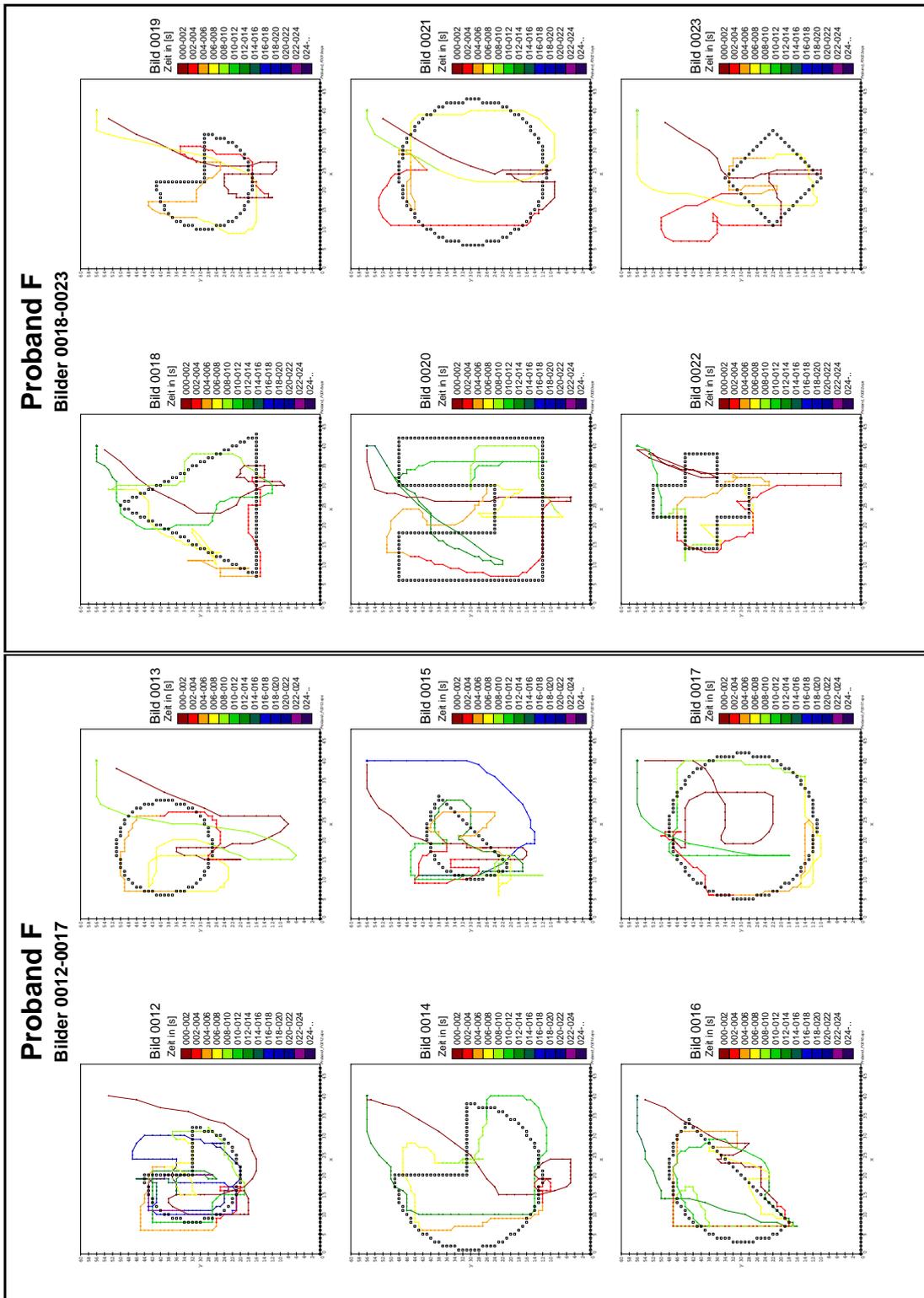


Abbildung F.12: Weg-Zeit-Plots des Probanden F Bild 0011–0023

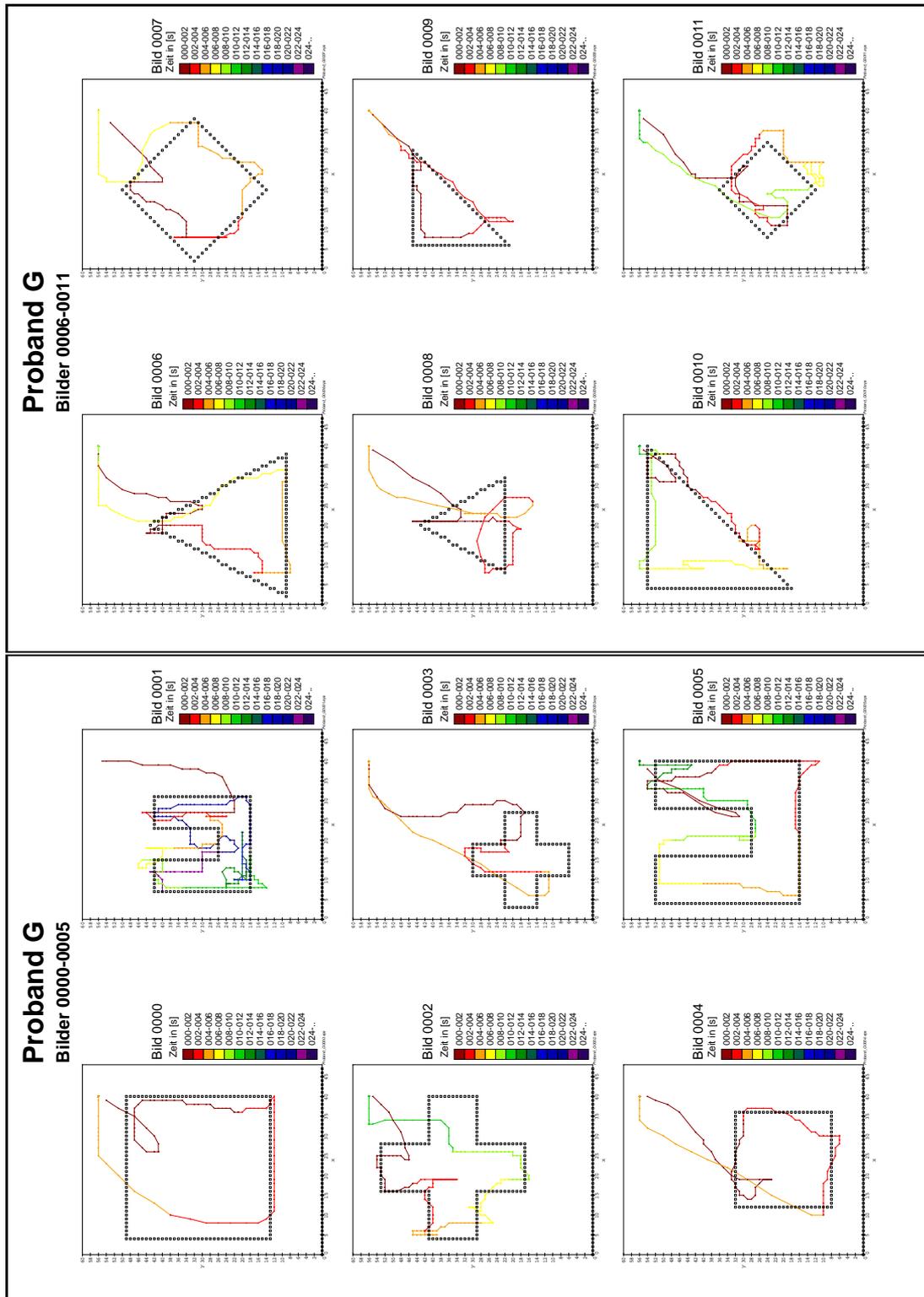


Abbildung F.13: Weg-Zeit-Plots des Probanden G Bild 0000–0011

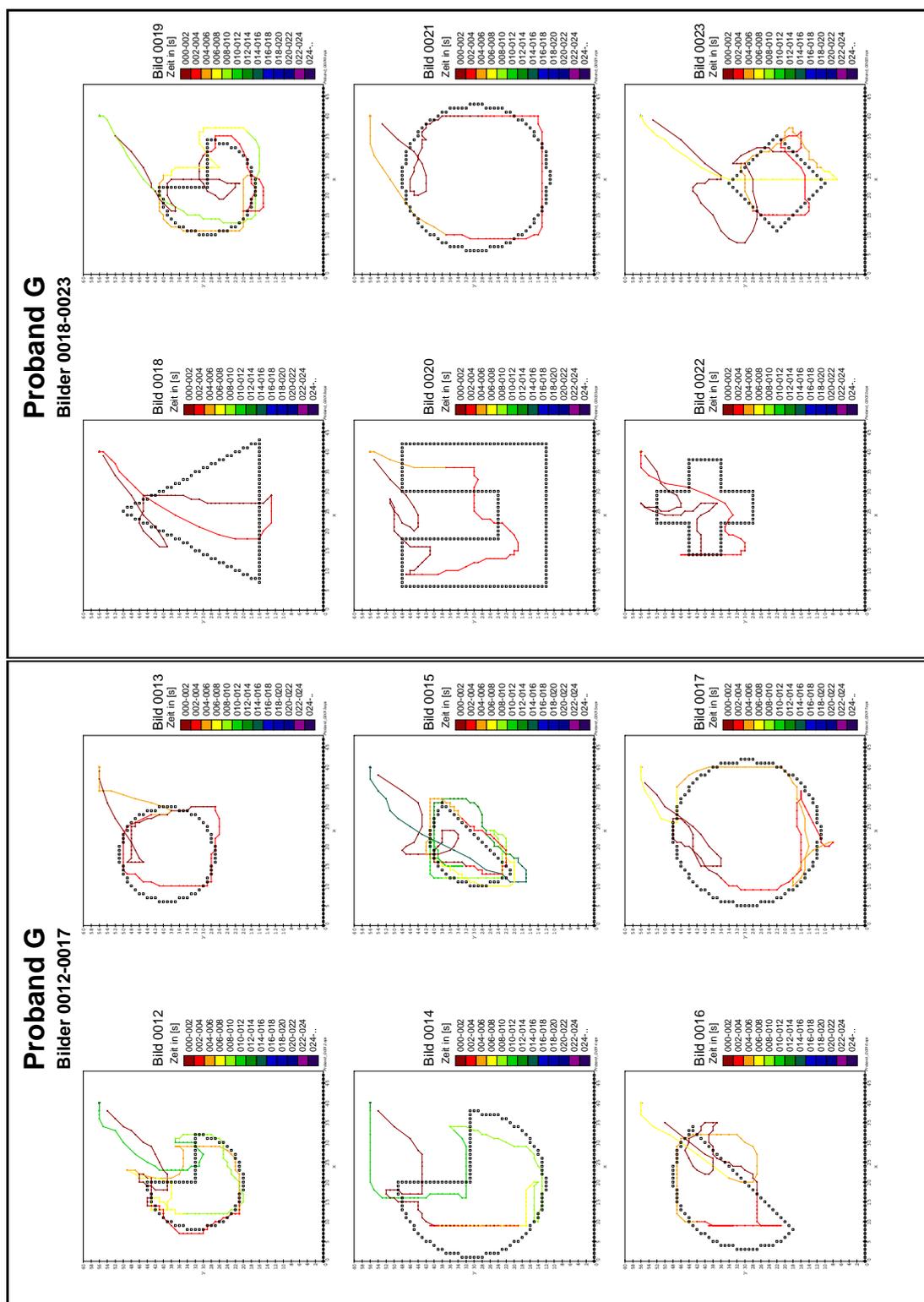


Abbildung F.14: Weg-Zeit-Plots des Probanden G Bild 0011–0023

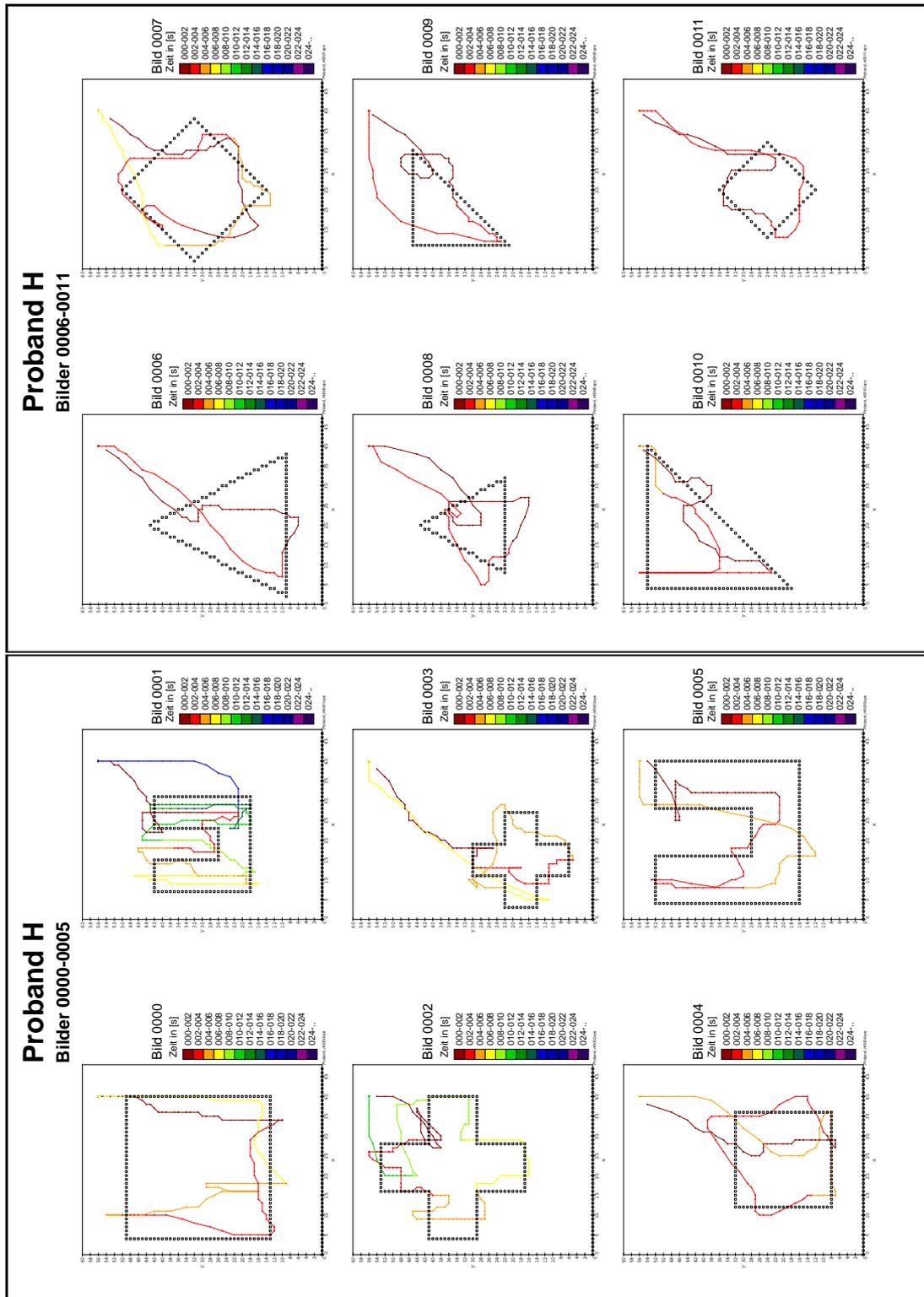


Abbildung F.15: Weg-Zeit-Plots des Probanden H Bild 0000–0011

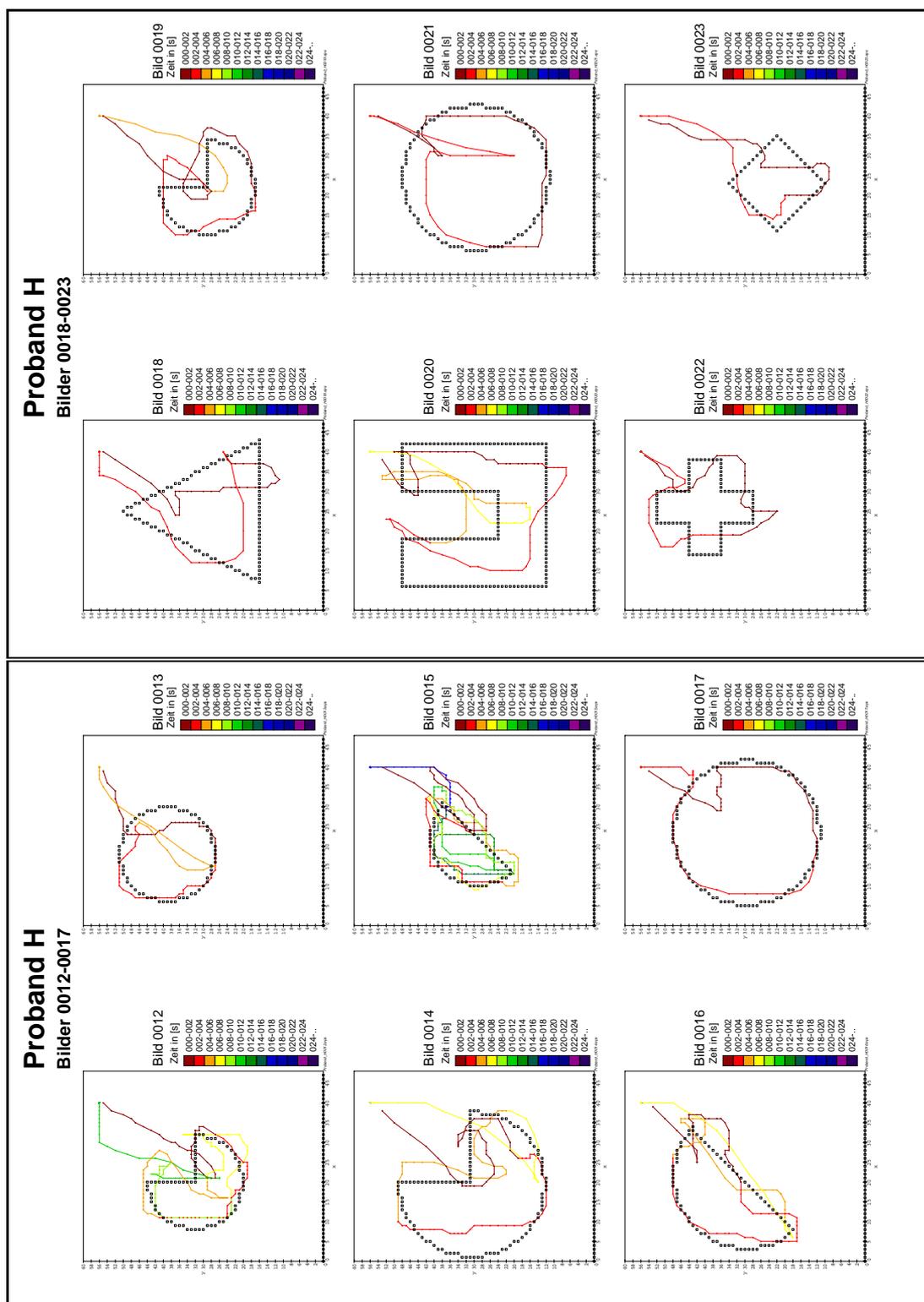


Abbildung F.16: Weg-Zeit-Plots des Probanden H Bild 0011–0023

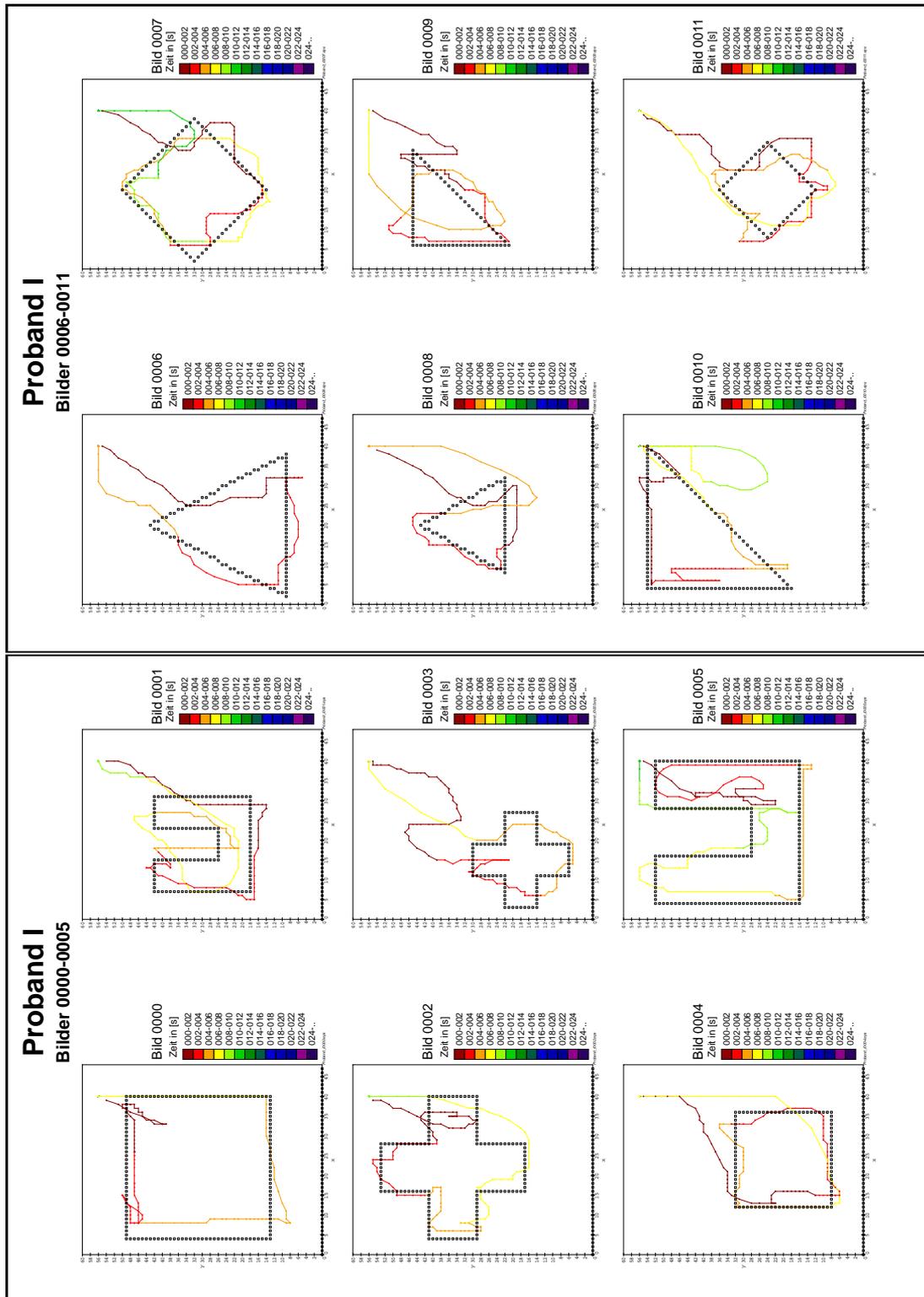


Abbildung F.17: Weg-Zeit-Plots des Probanden I Bild 0000–0011

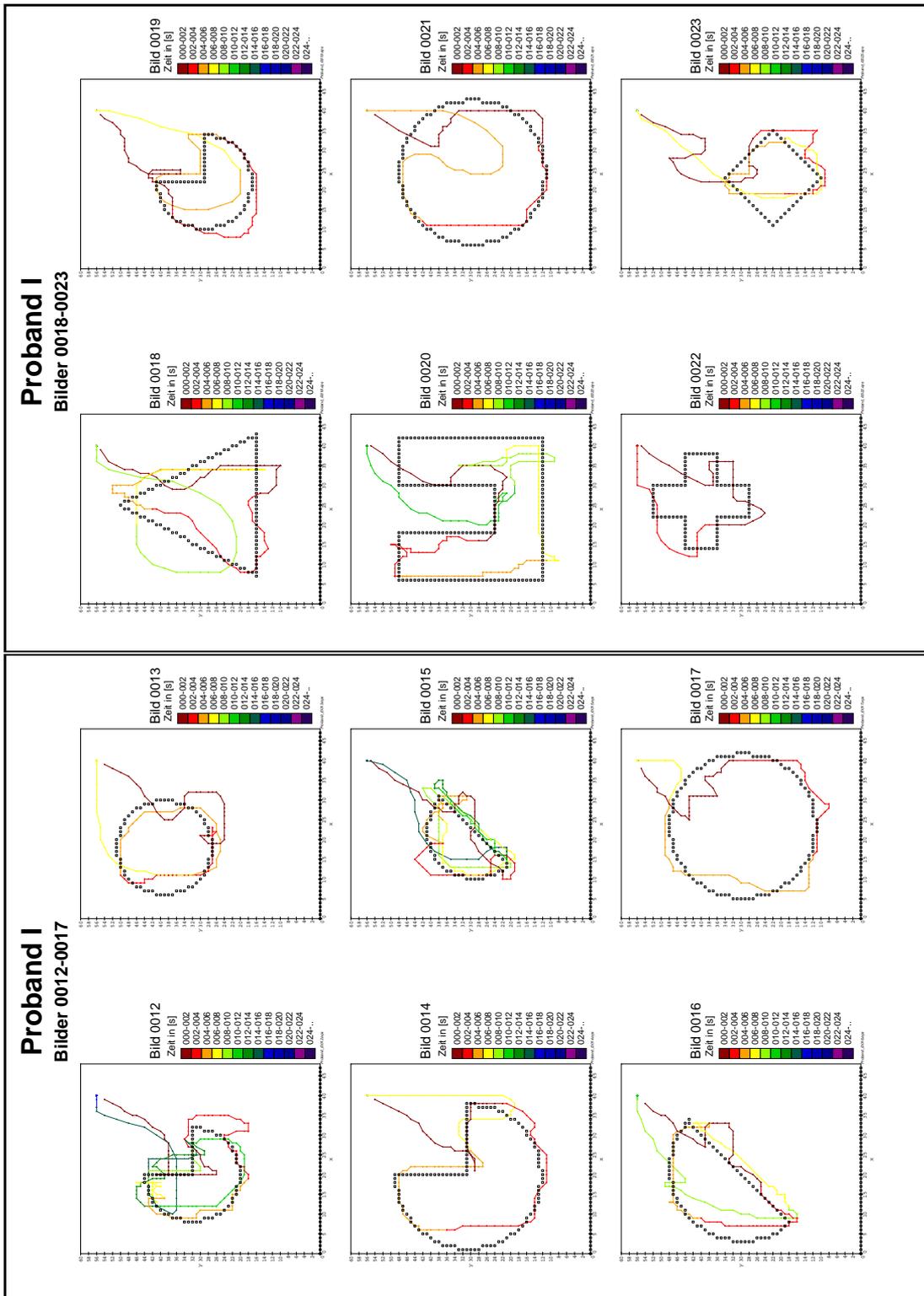


Abbildung F.18: Weg-Zeit-Plots des Probanden I Bild 0011–0023

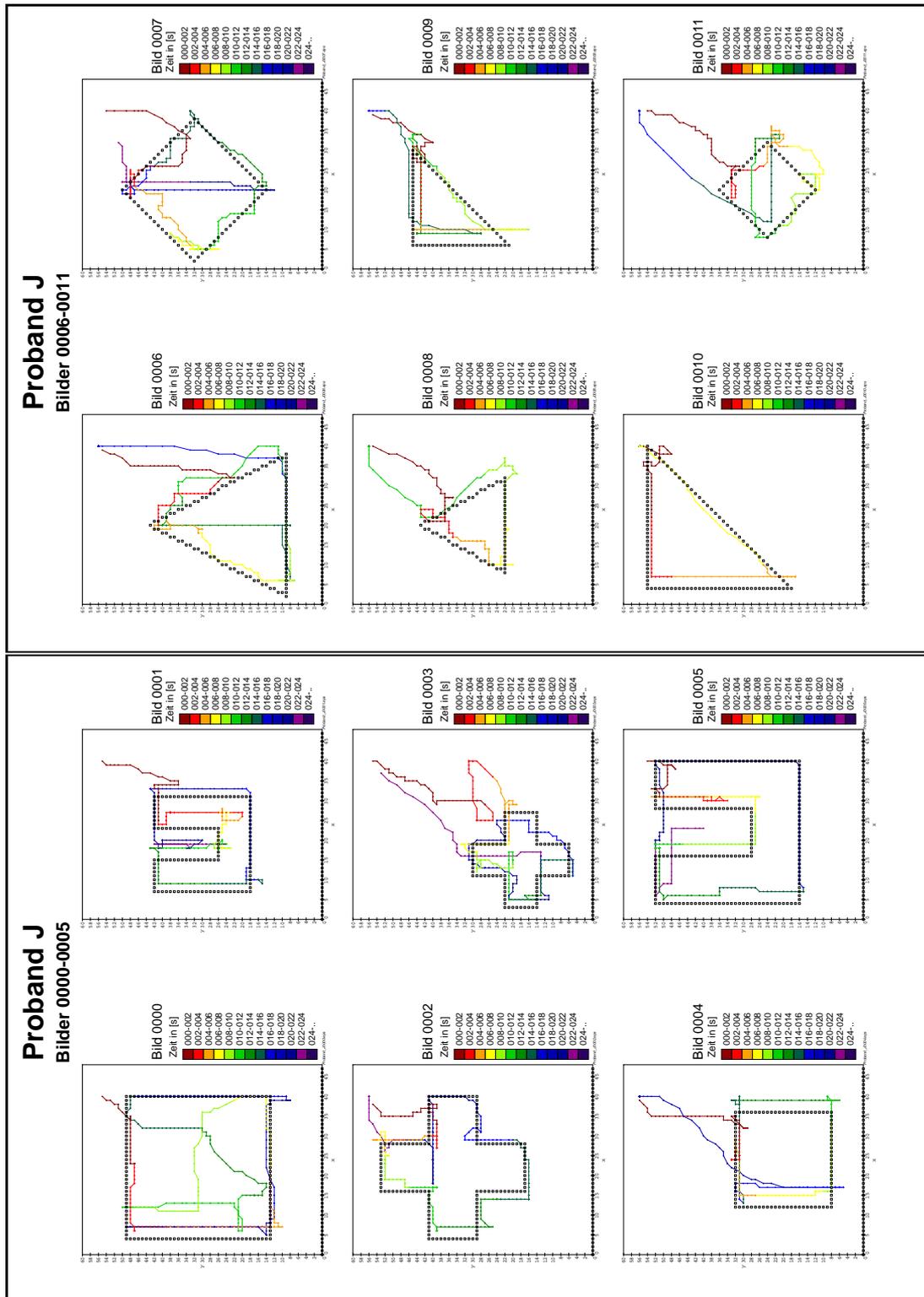


Abbildung F.19: Weg-Zeit-Plots des Probanden J Bild 0000–0011

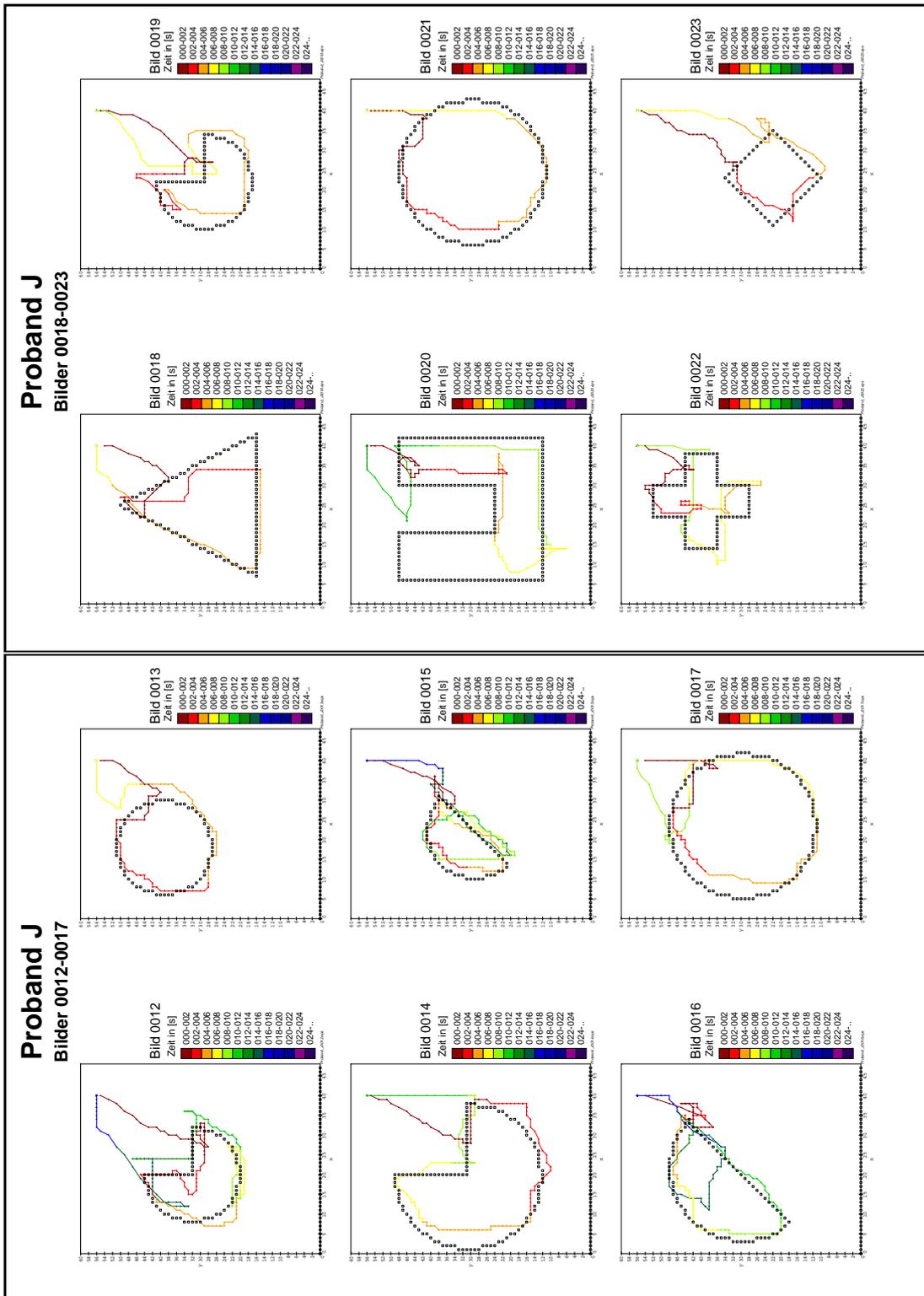


Abbildung F.20: Weg-Zeit-Plots des Probanden I Bild 0011–0023

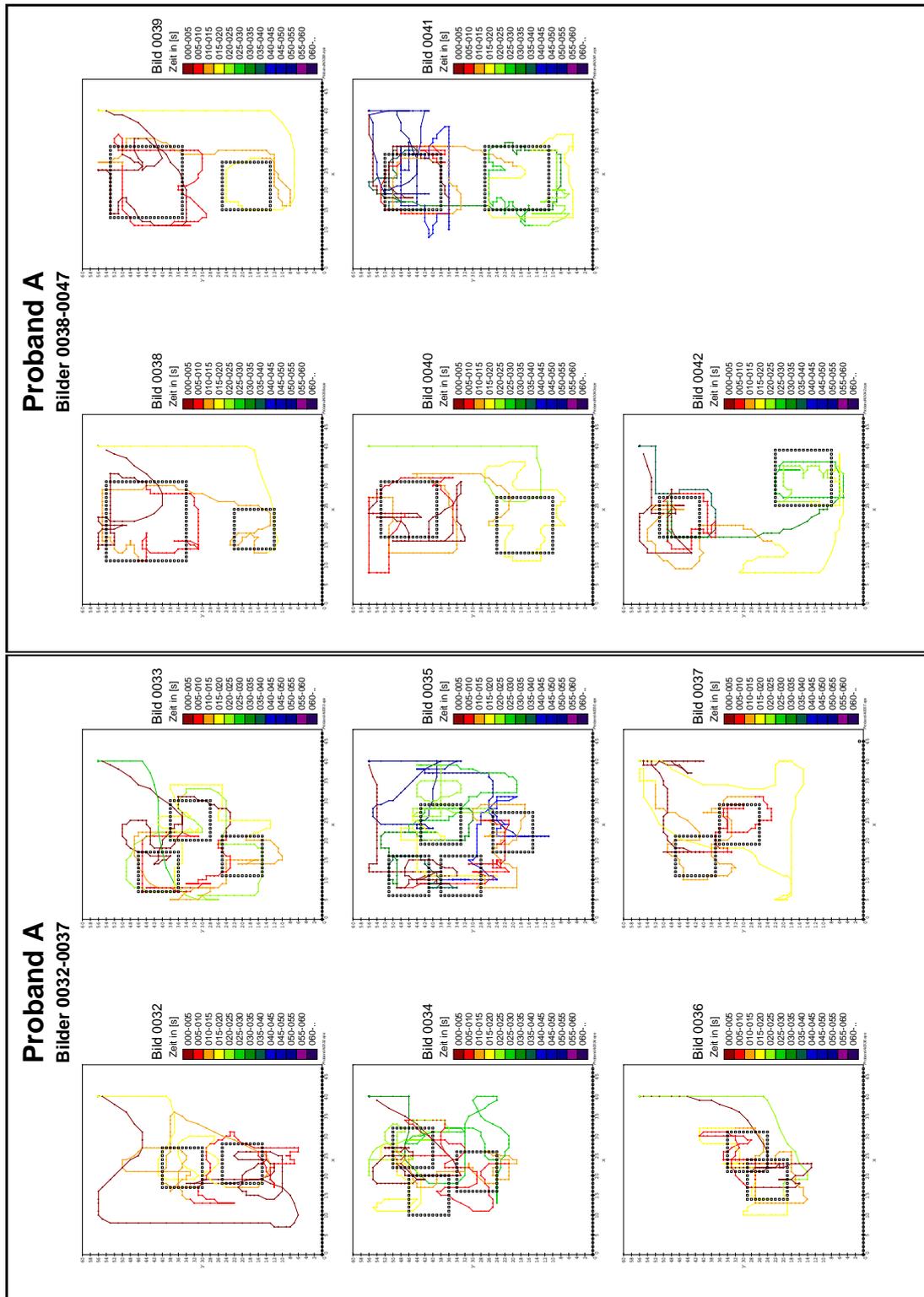


Abbildung F.21: Weg-Zeit-Plots des Probanden A Bild 0032–0042

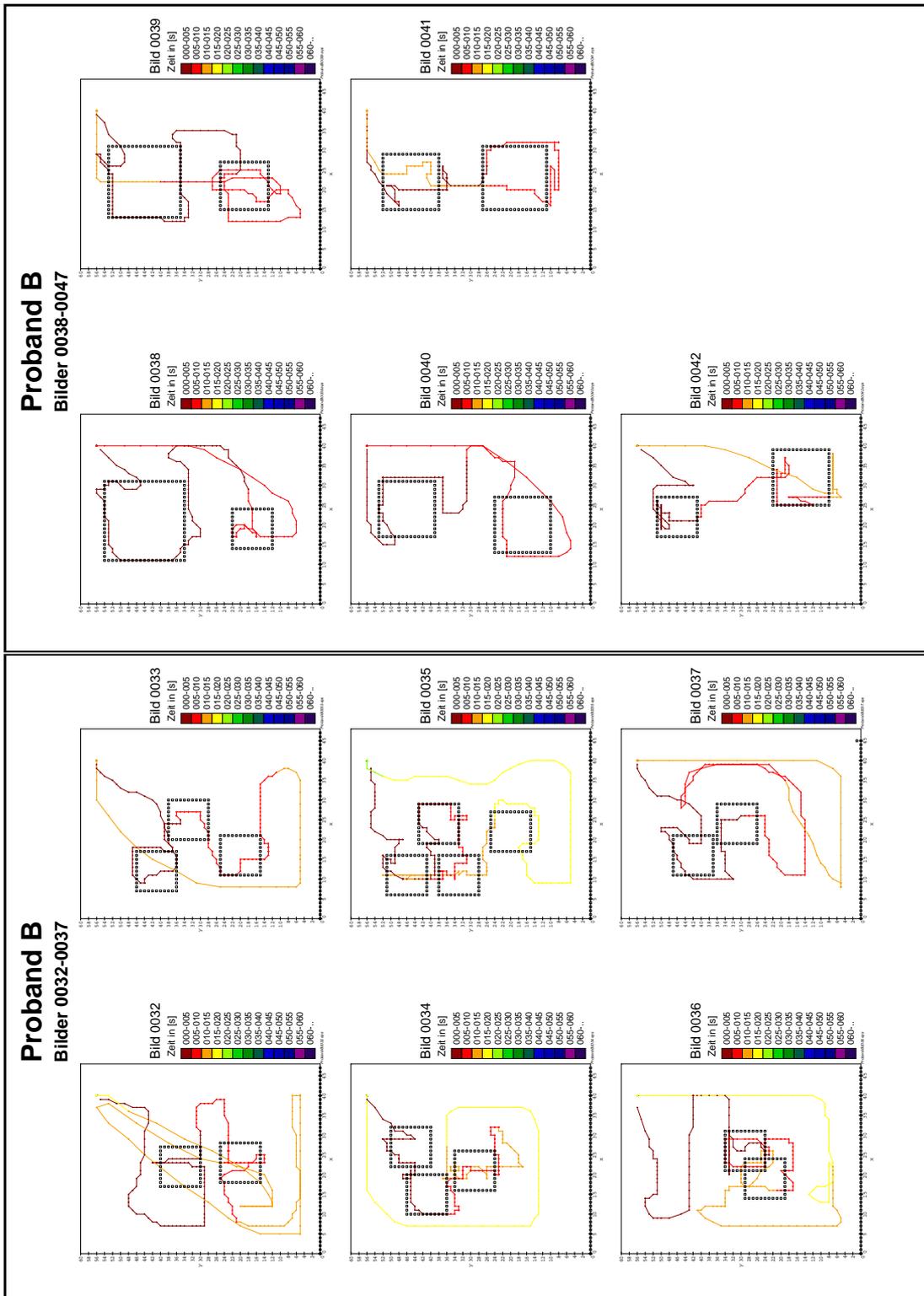


Abbildung F.22: Weg-Zeit-Plots des Probanden B Bild 0032–0042

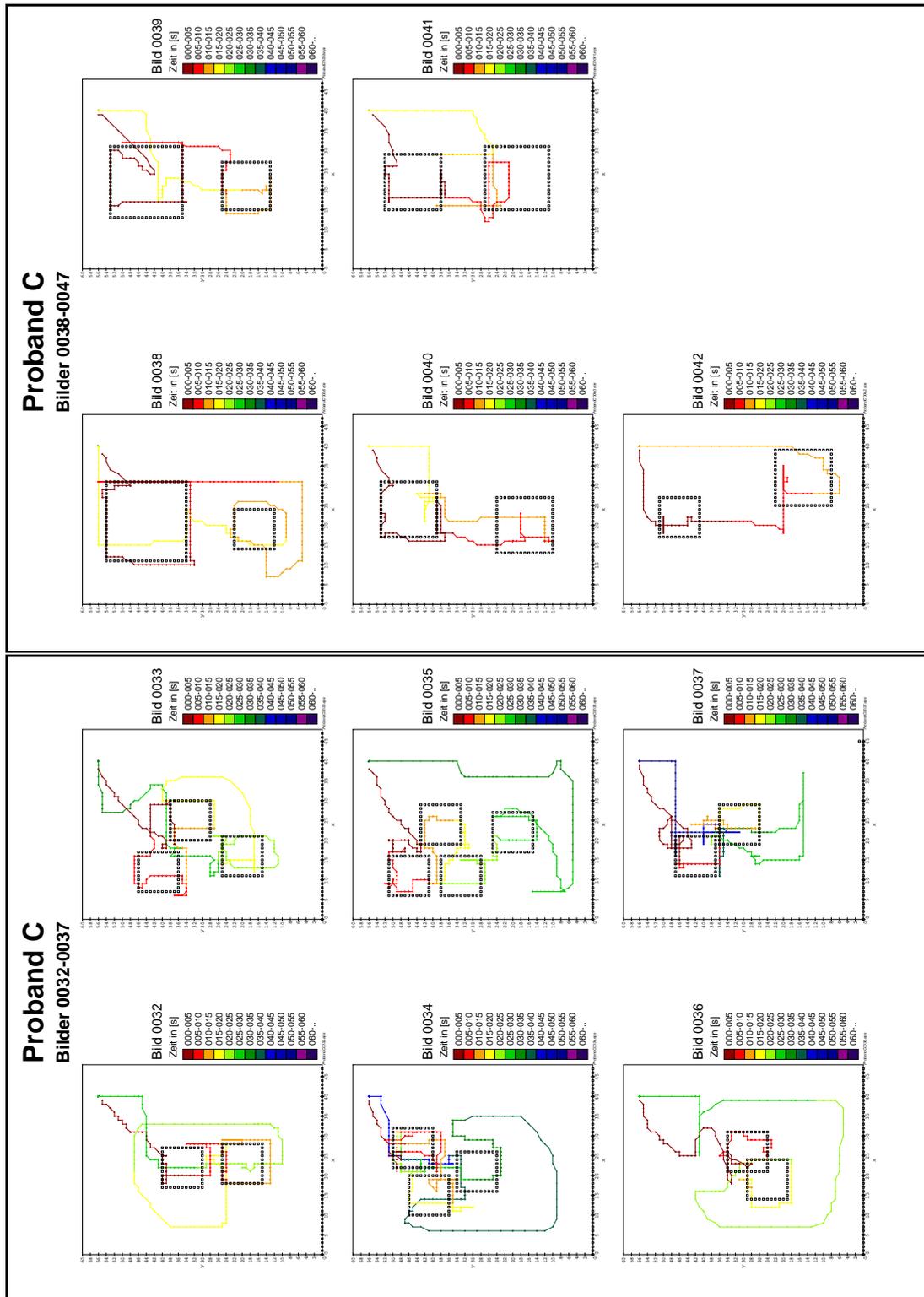


Abbildung F.23: Weg-Zeit-Plots des Probanden C Bild 0032–0042

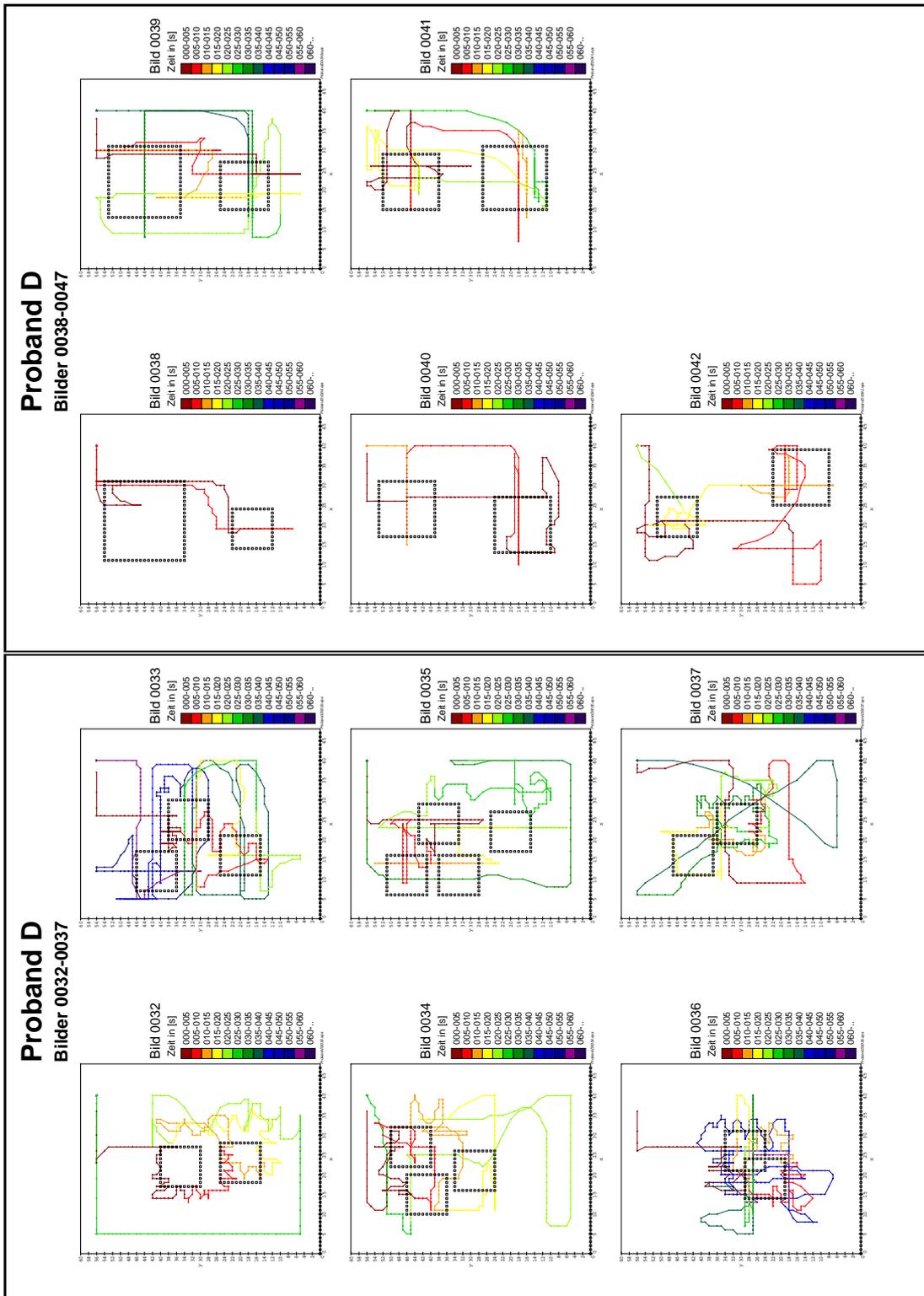


Abbildung F.24: Weg-Zeit-Plots des Probanden D Bild 0032–0042

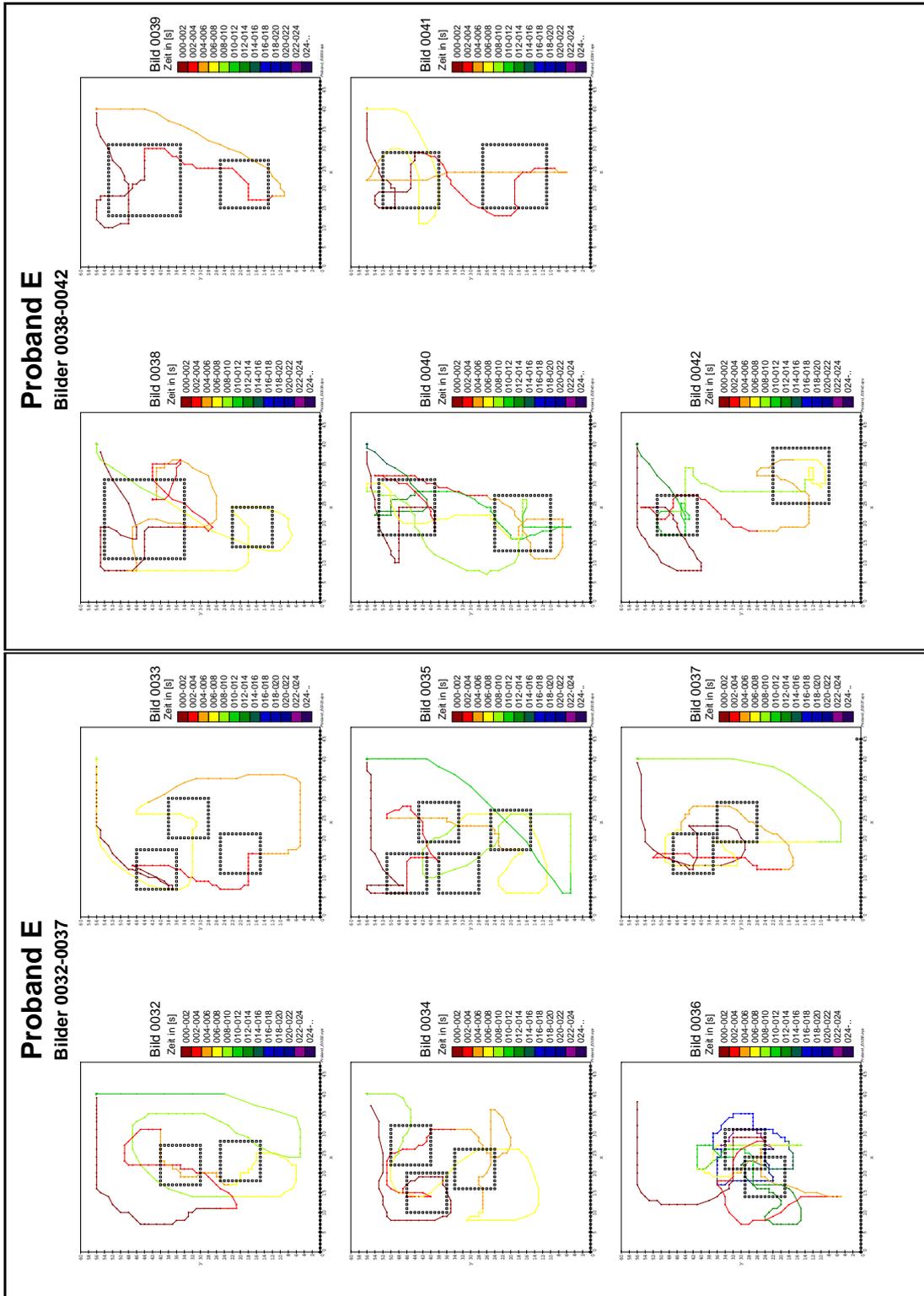


Abbildung F.25: Weg-Zeit-Plots des Probanden E Bild 0032–0042

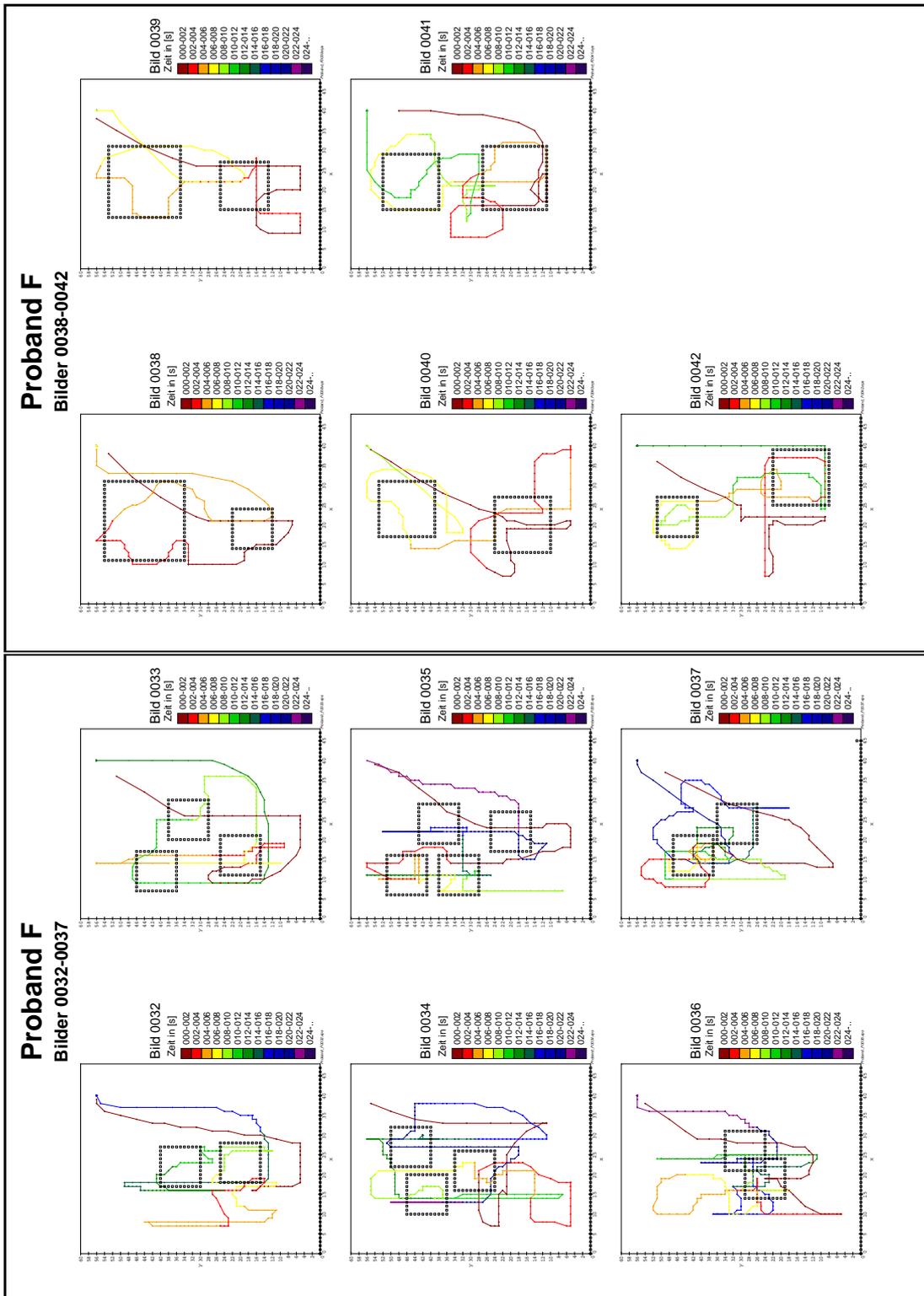


Abbildung F.26: Weg-Zeit-Plots des Probanden F Bild 0032–0042

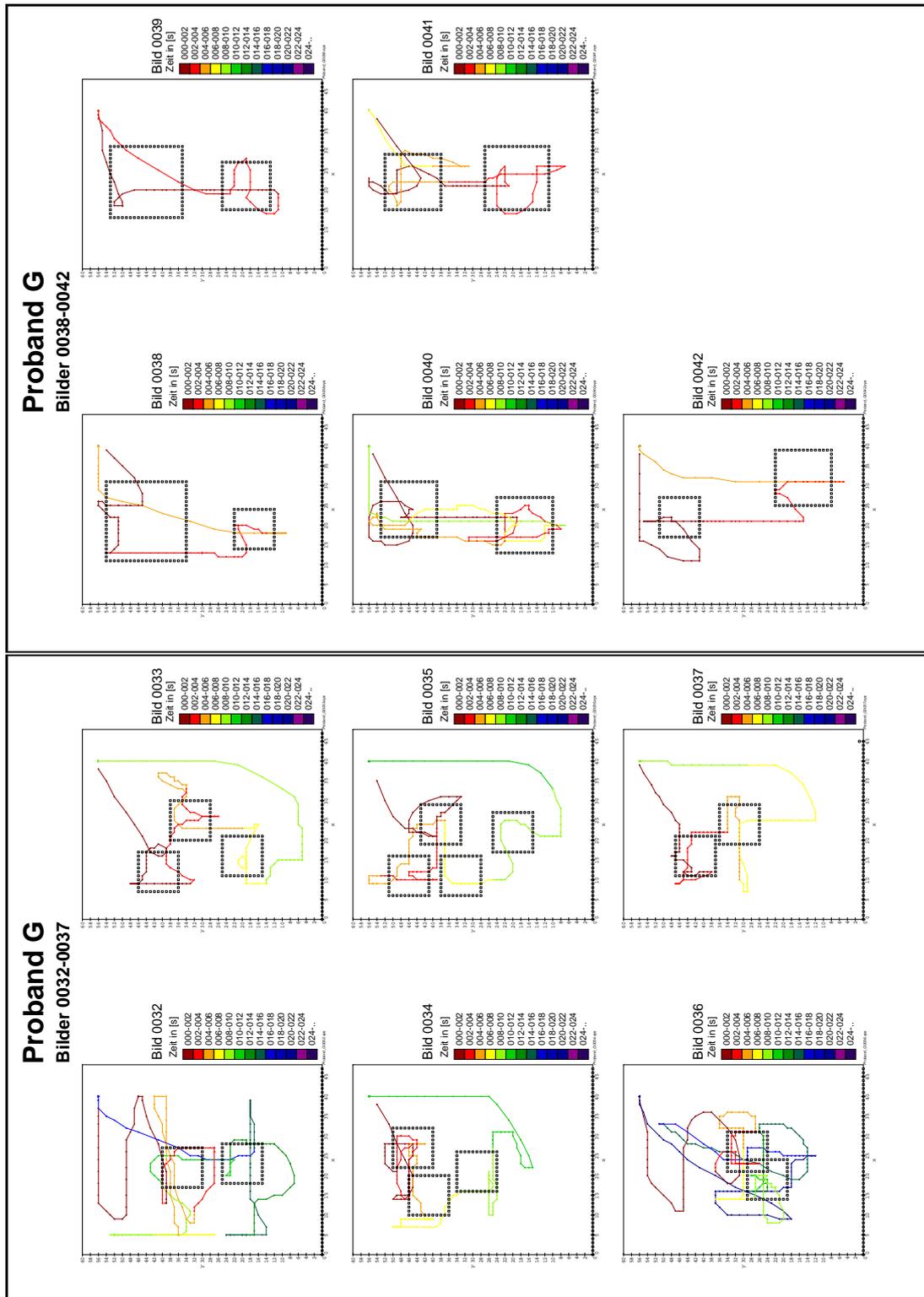


Abbildung F.27: Weg-Zeit-Plots des Probanden G Bild 0032–0042

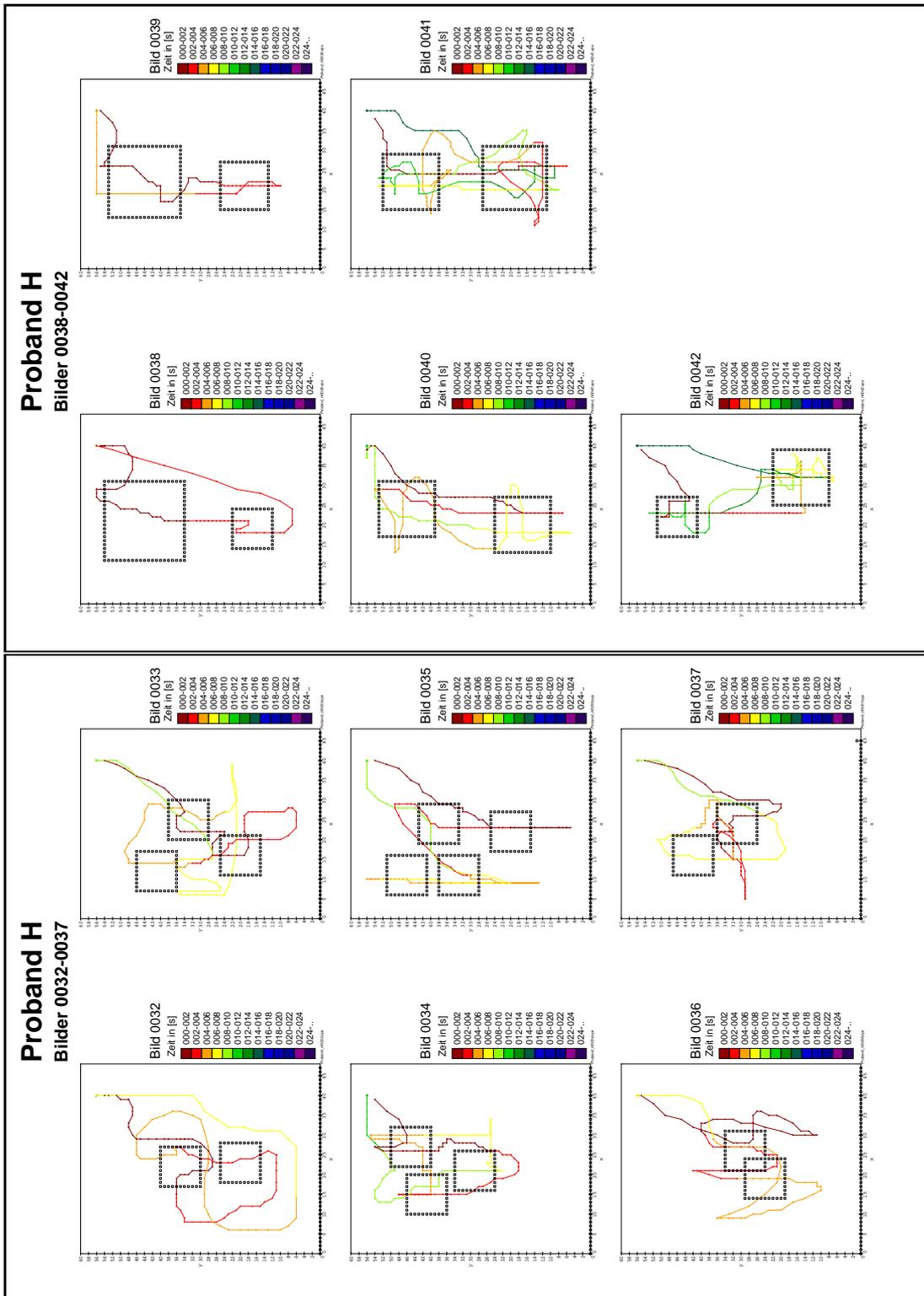


Abbildung F.28: Weg-Zeit-Plots des Probanden H Bild 0032–0042

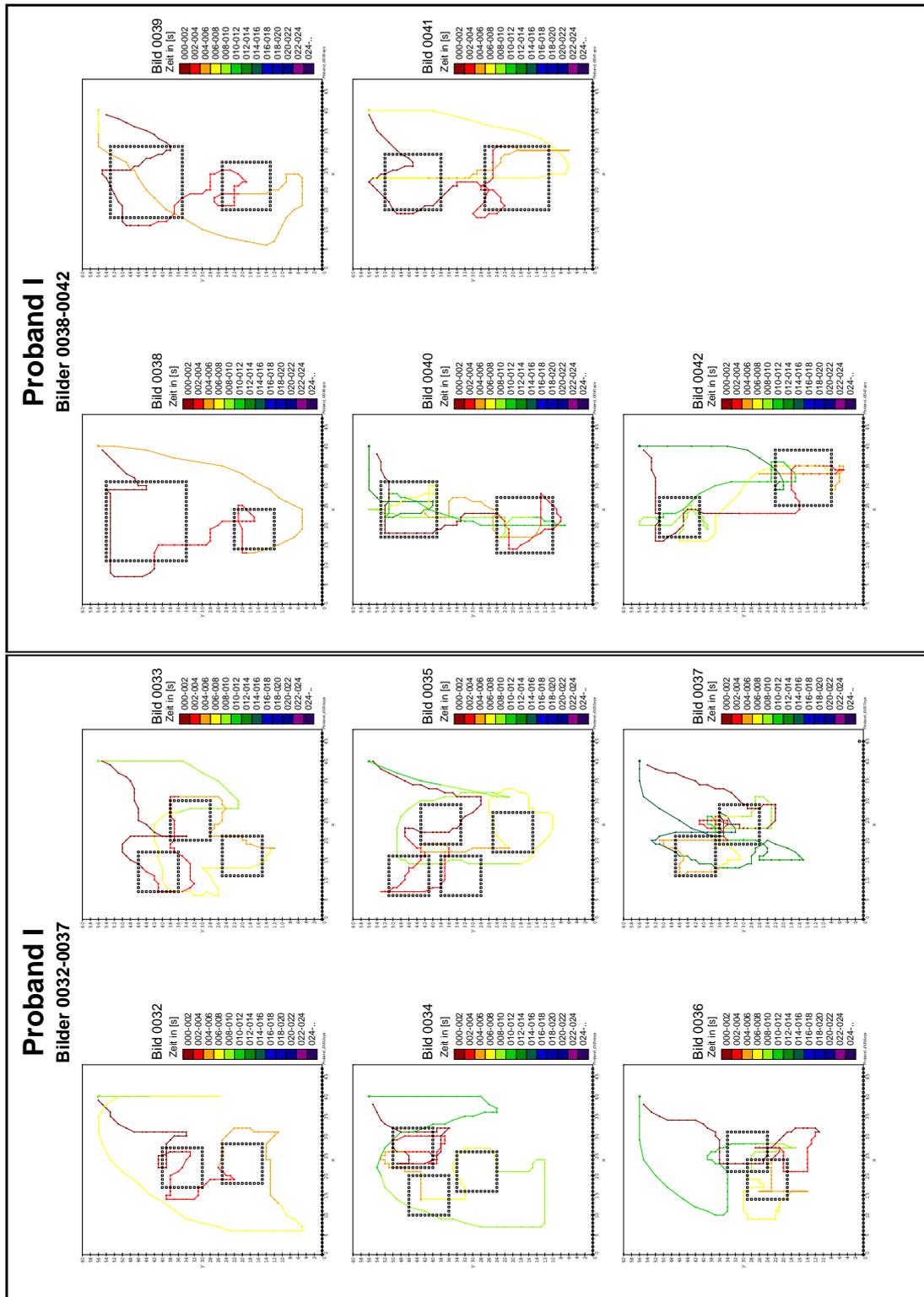


Abbildung F.29: Weg-Zeit-Plots des Probanden I Bild 0032–0042

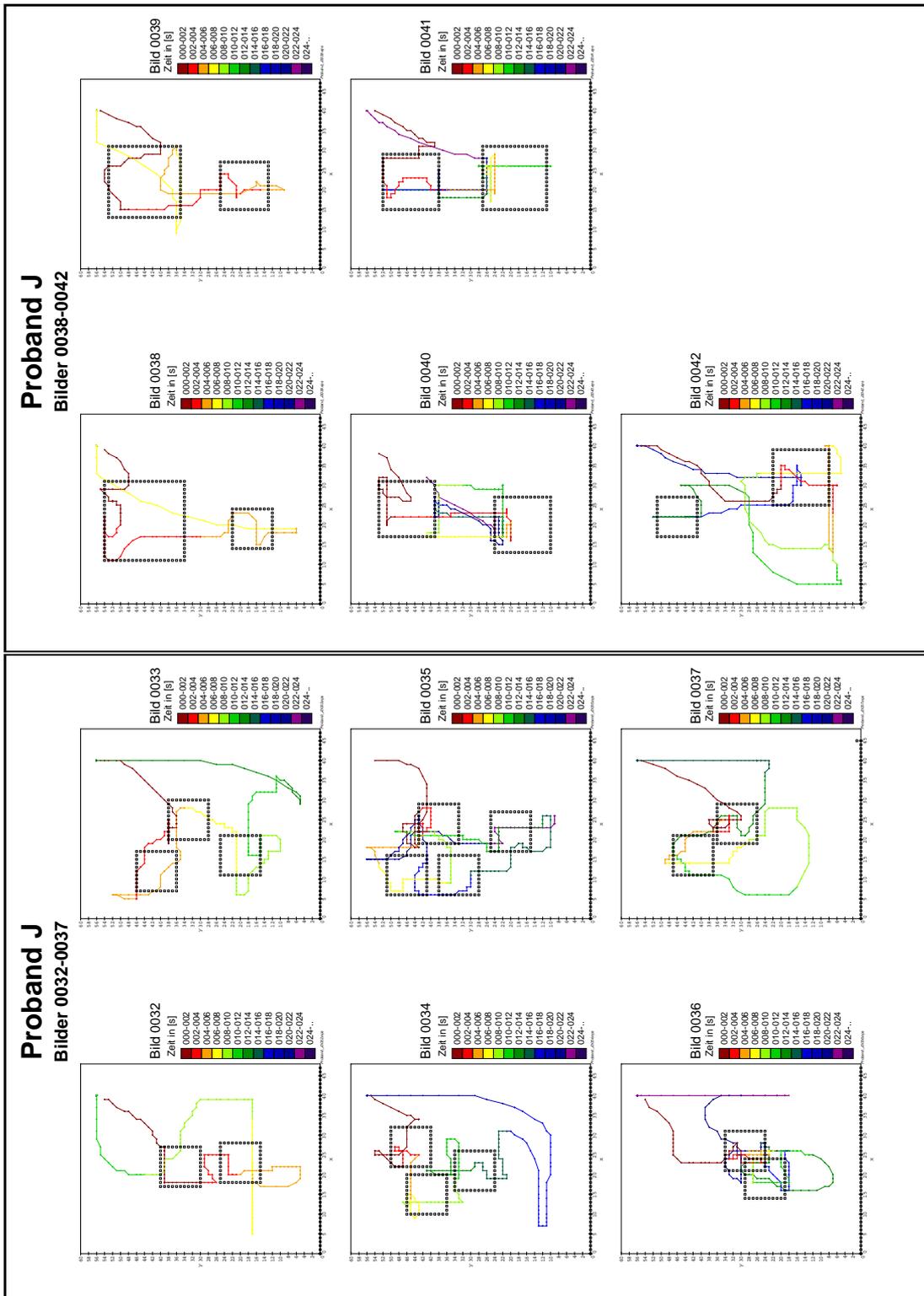


Abbildung F.30: Weg-Zeit-Plots des Probanden J Bild 0032–0042

Anhang G

Ort-Zeit-Plots

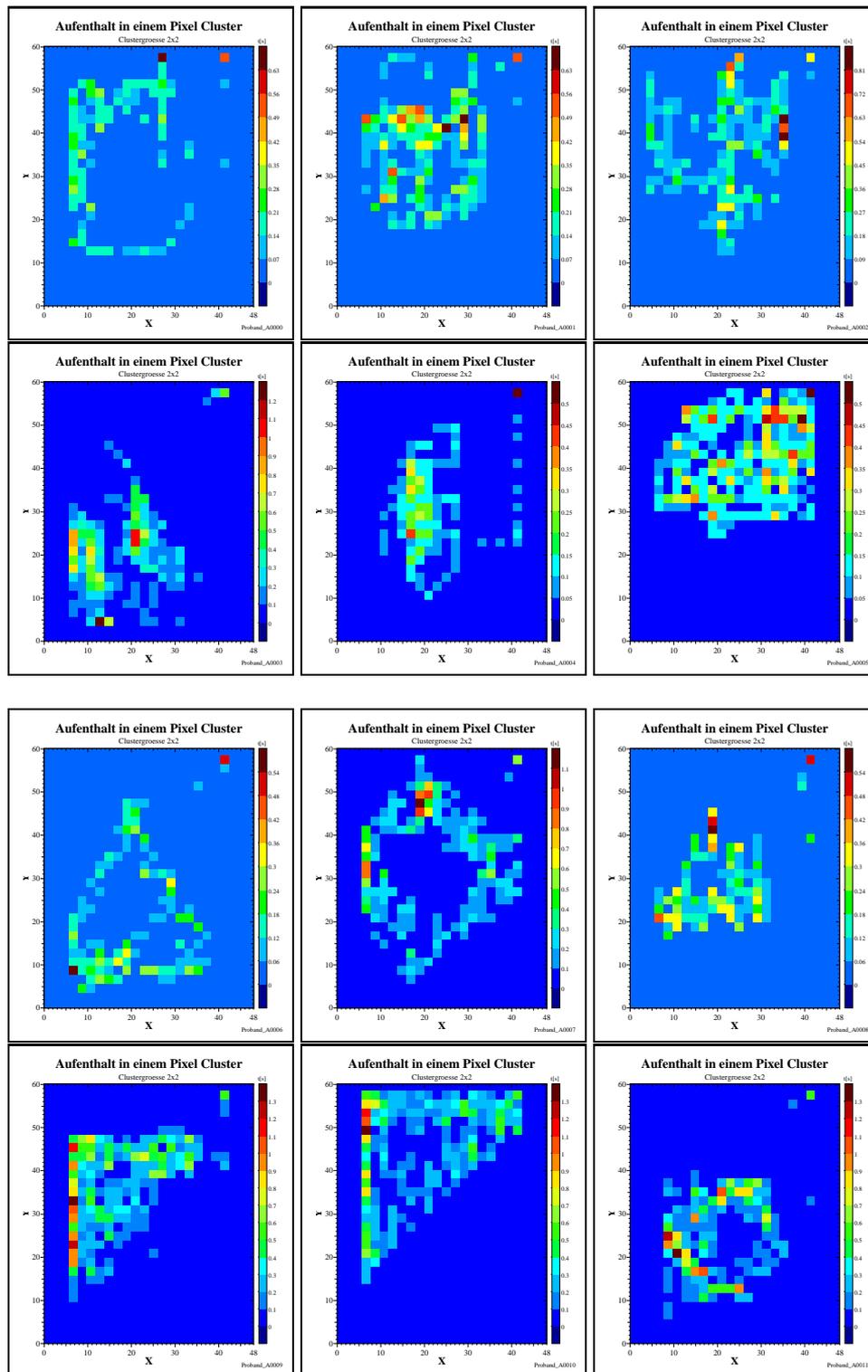


Abbildung G.1: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband A für die Testreihen 2–3 Bilder 0000-0011

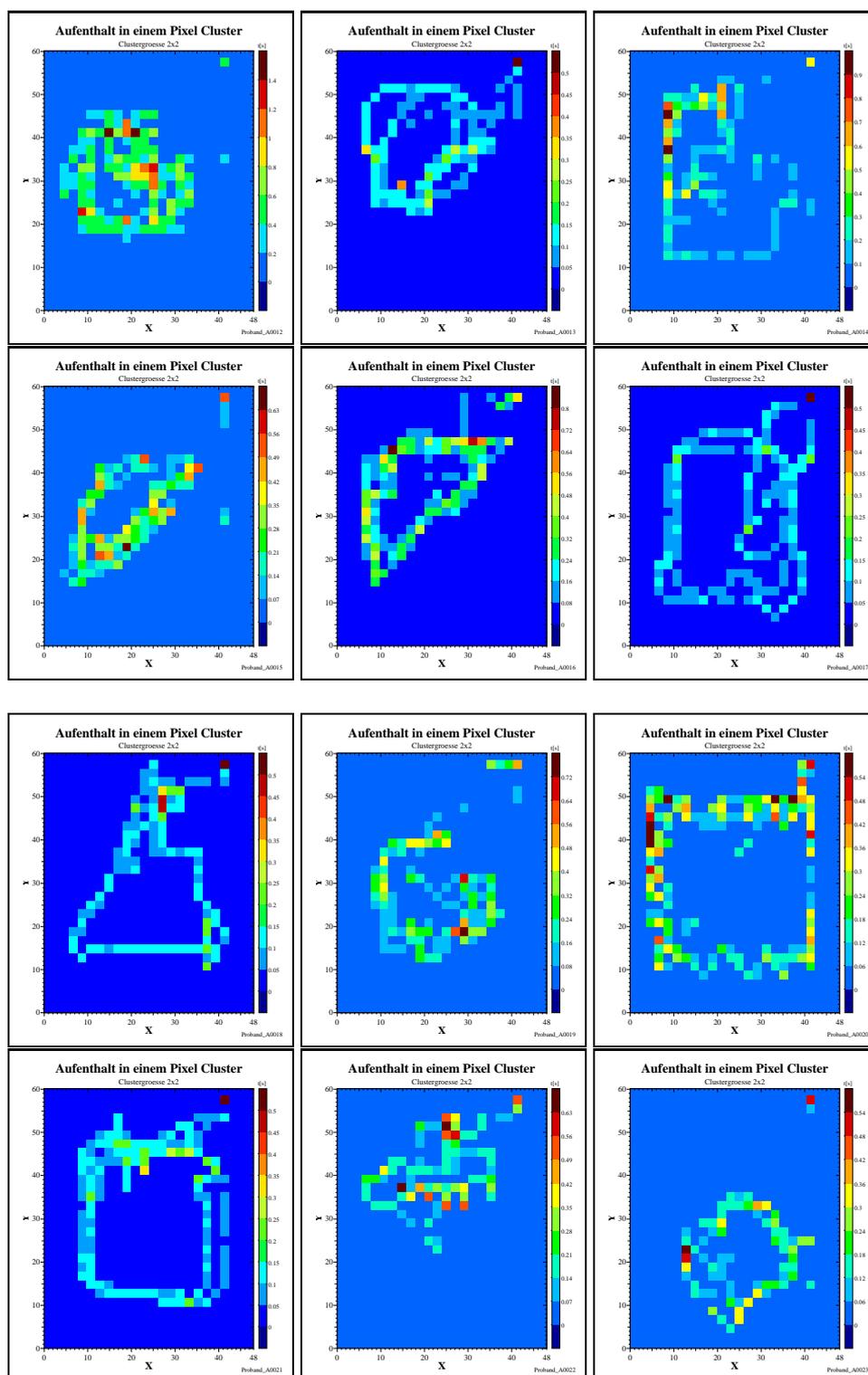


Abbildung G.2: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband A für die Testreihen 4–5 Bilder 0012–0023

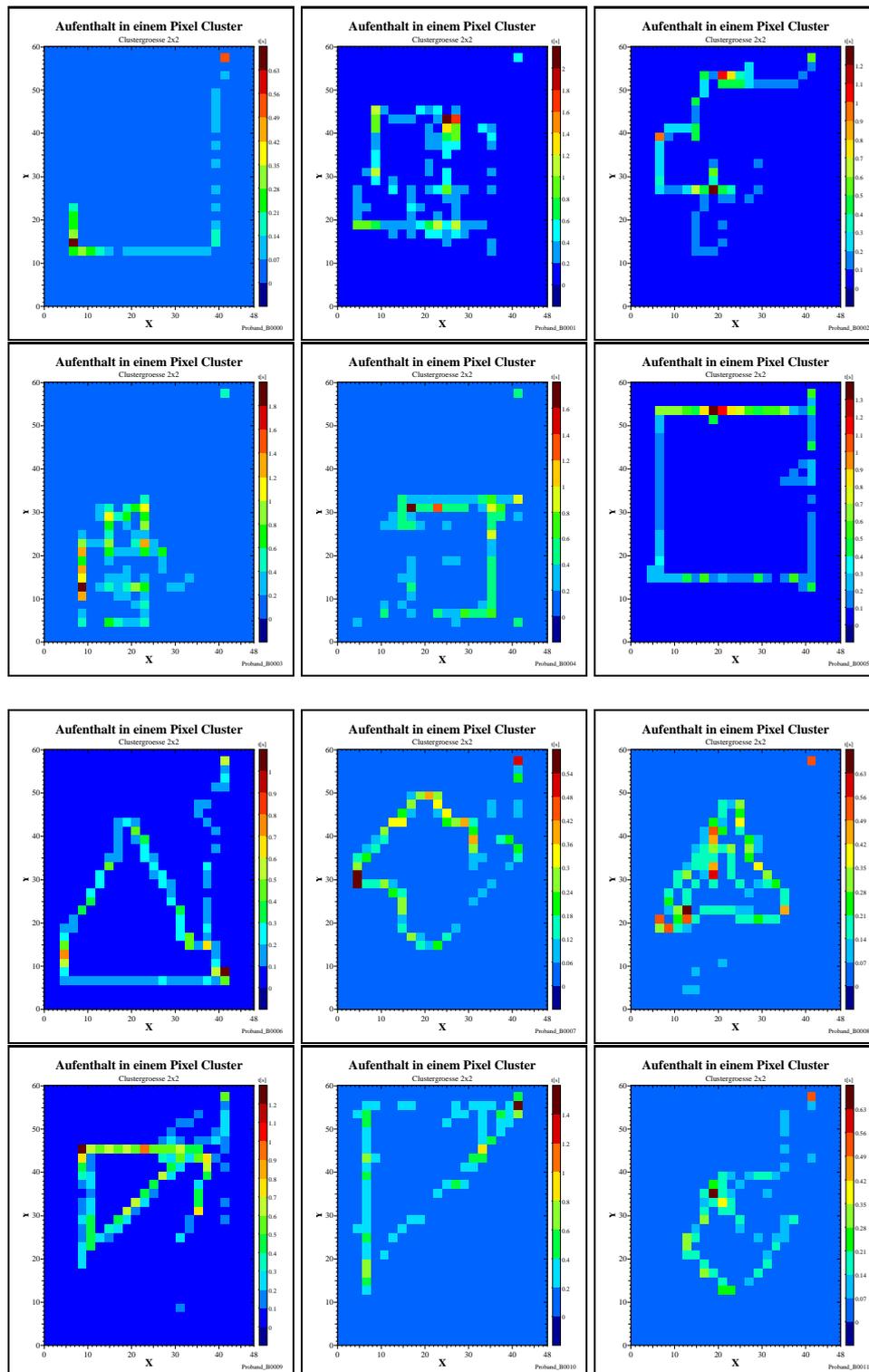


Abbildung G.3: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband B für die Testreihen 2–3 Bilder 0000-0011

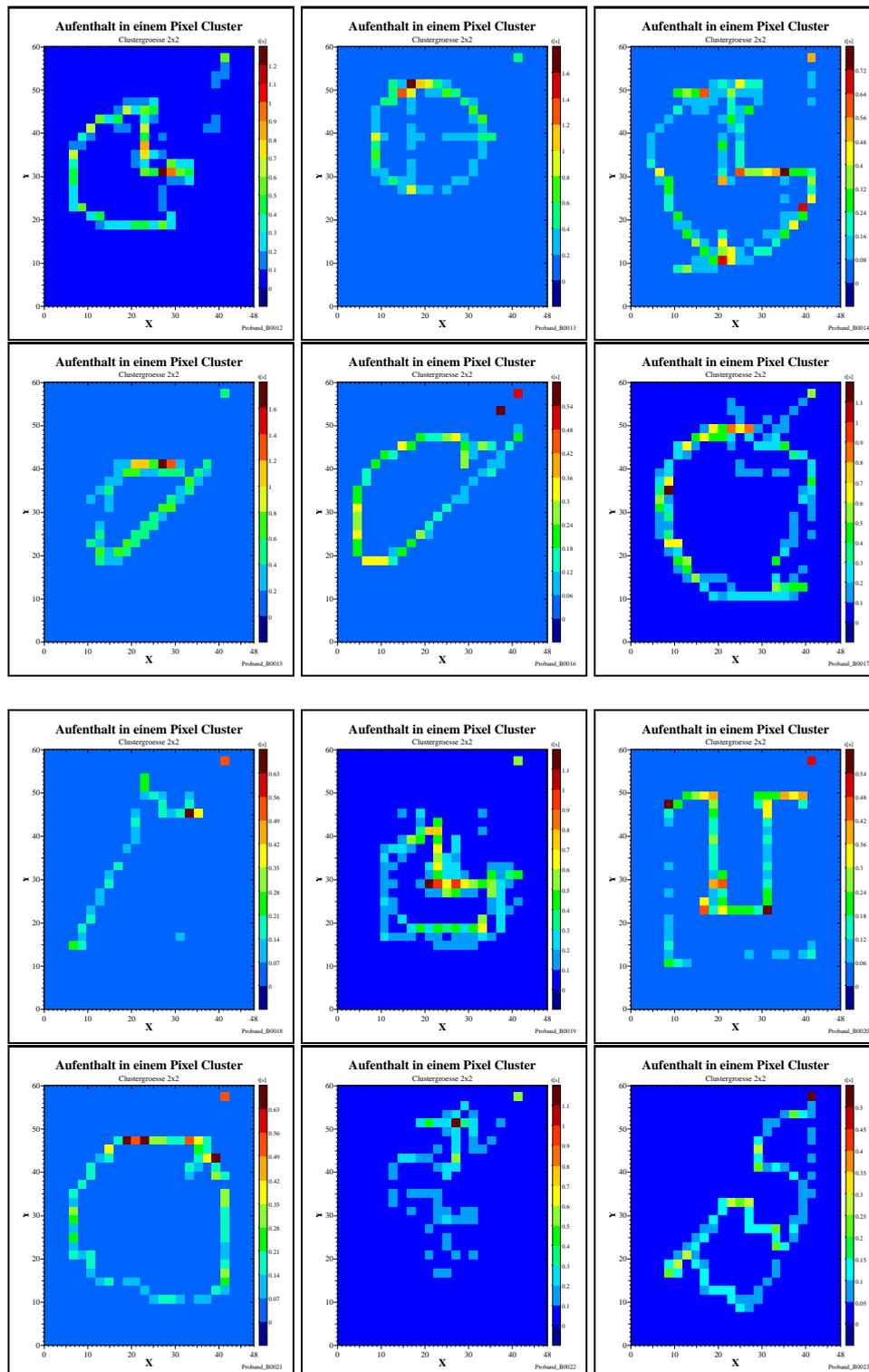


Abbildung G.4: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband B für die Testreihen 4–5 Bilder 0012–0023

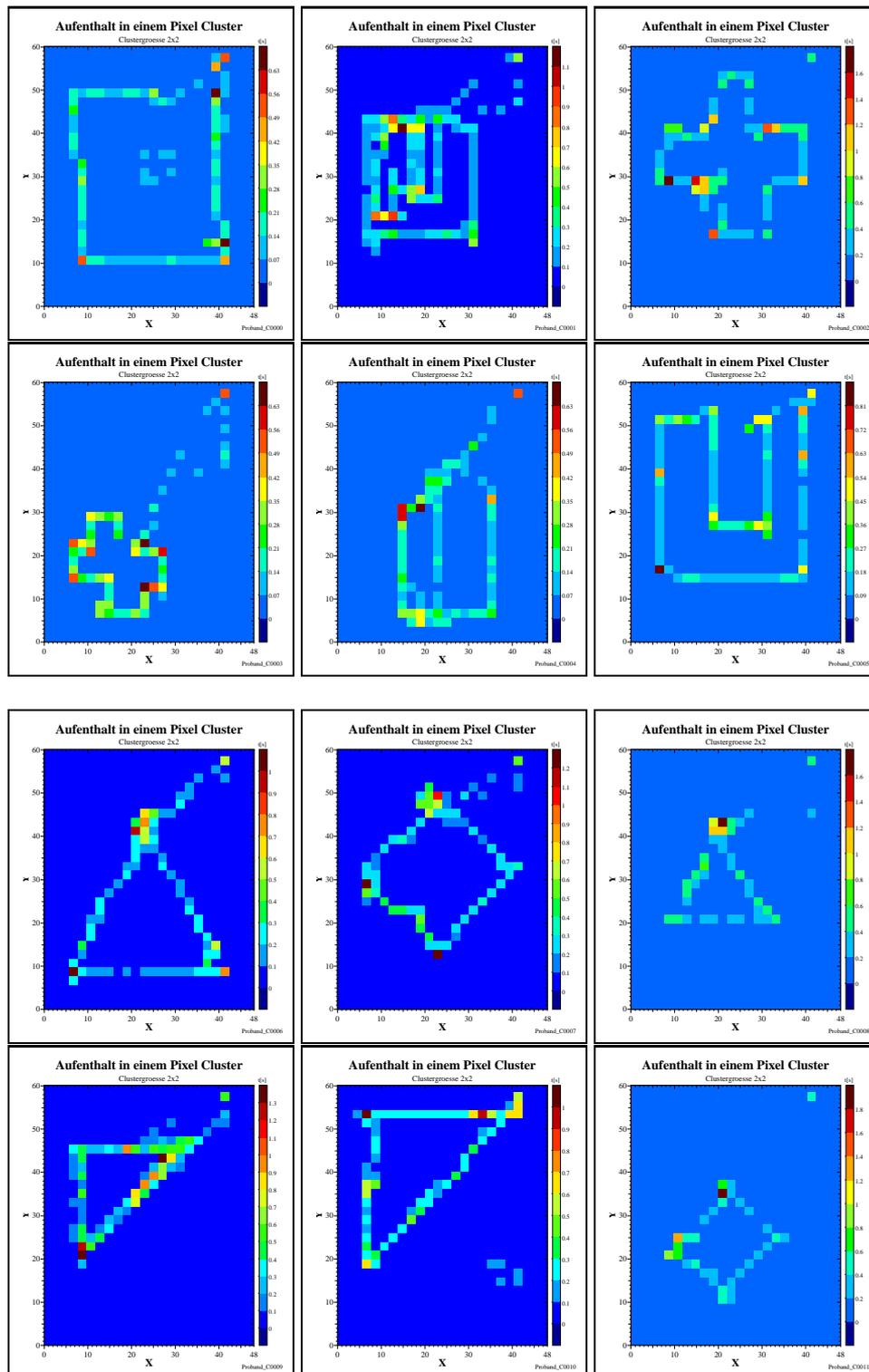


Abbildung G.5: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband C für die Testreihen 2–3 Bilder 0000-0011

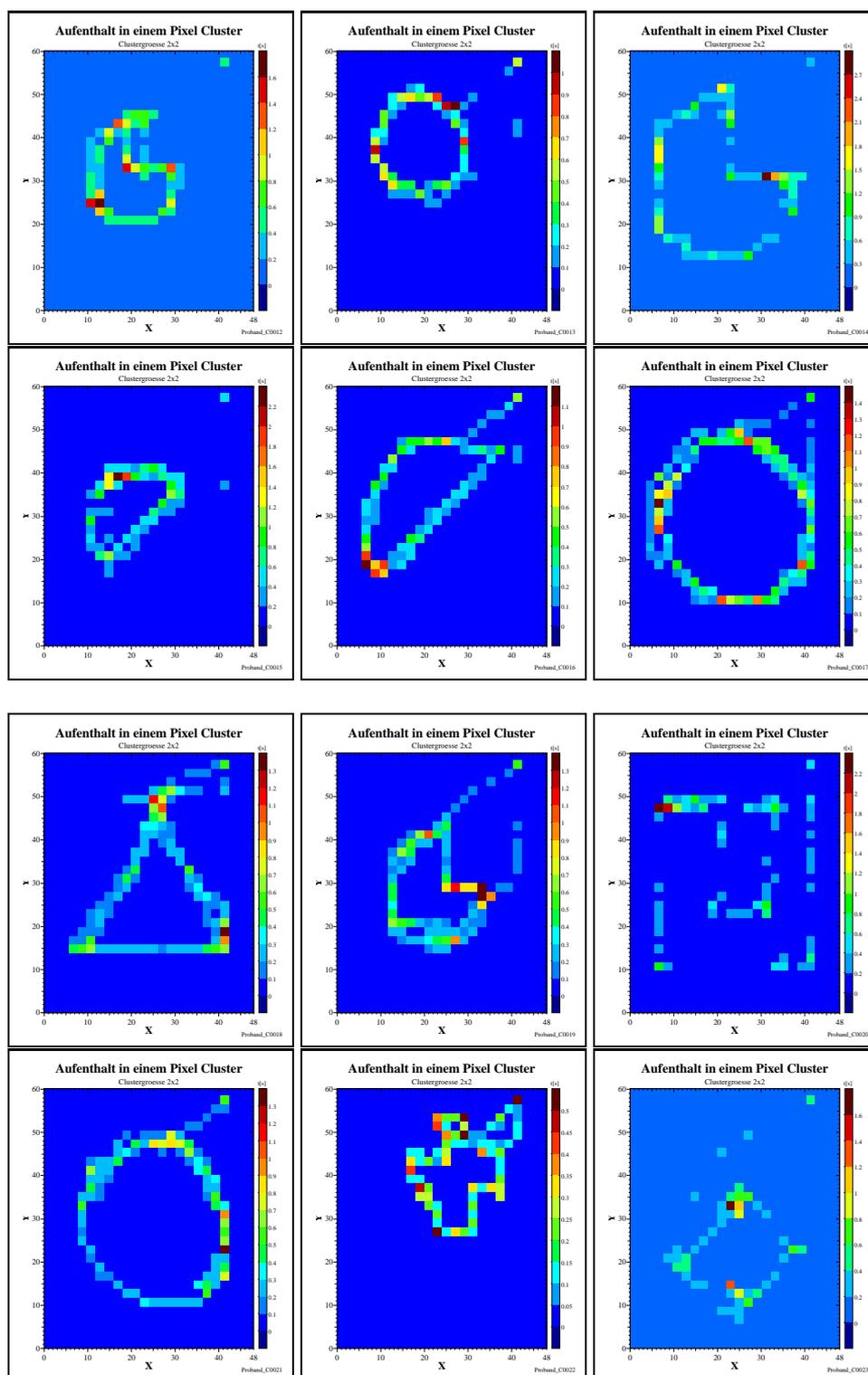


Abbildung G.6: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband C für die Testreihen 4–5 Bilder 0012–0023

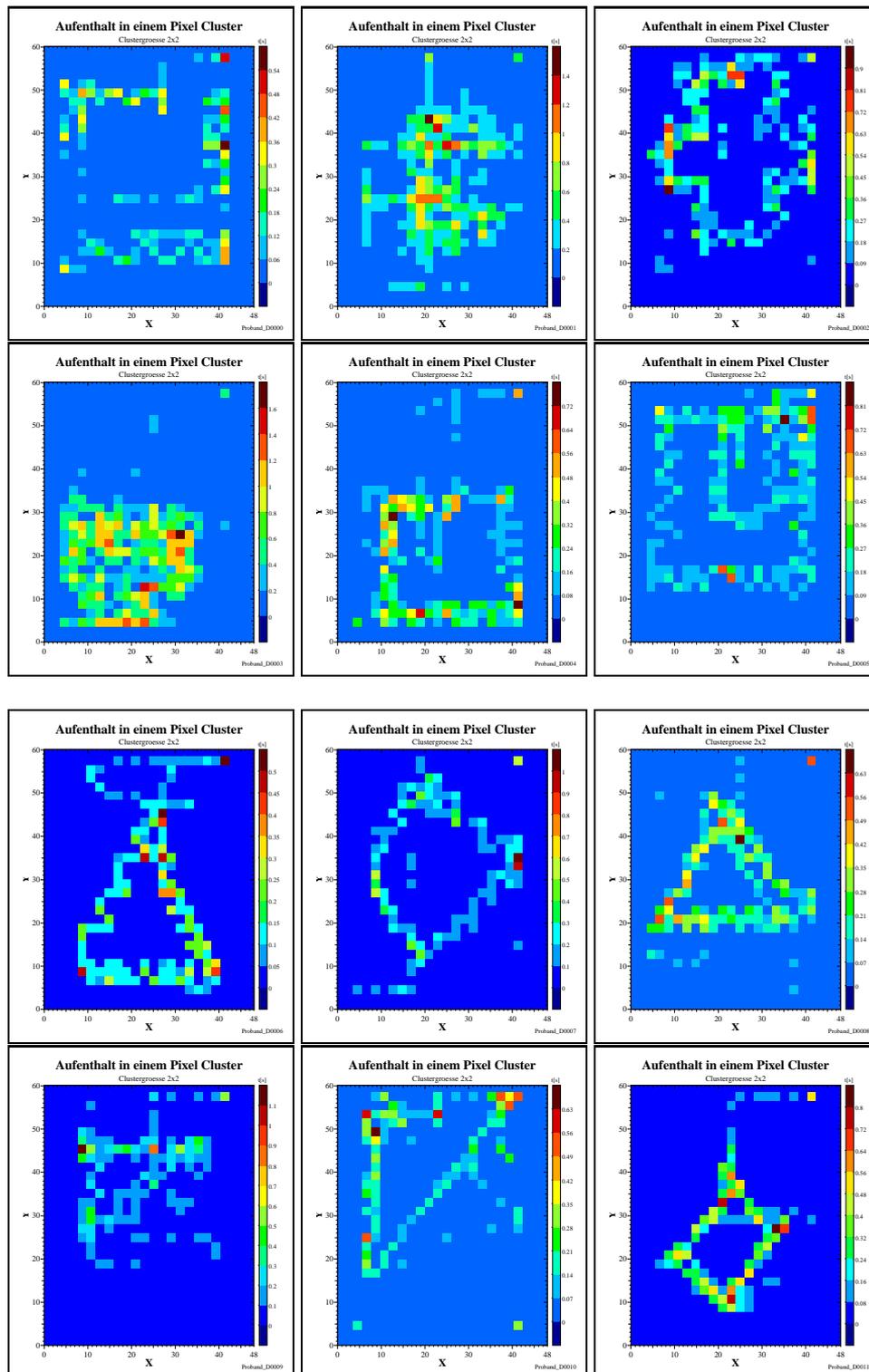


Abbildung G.7: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband D für die Testreihen 2–3 Bilder 0000-0011

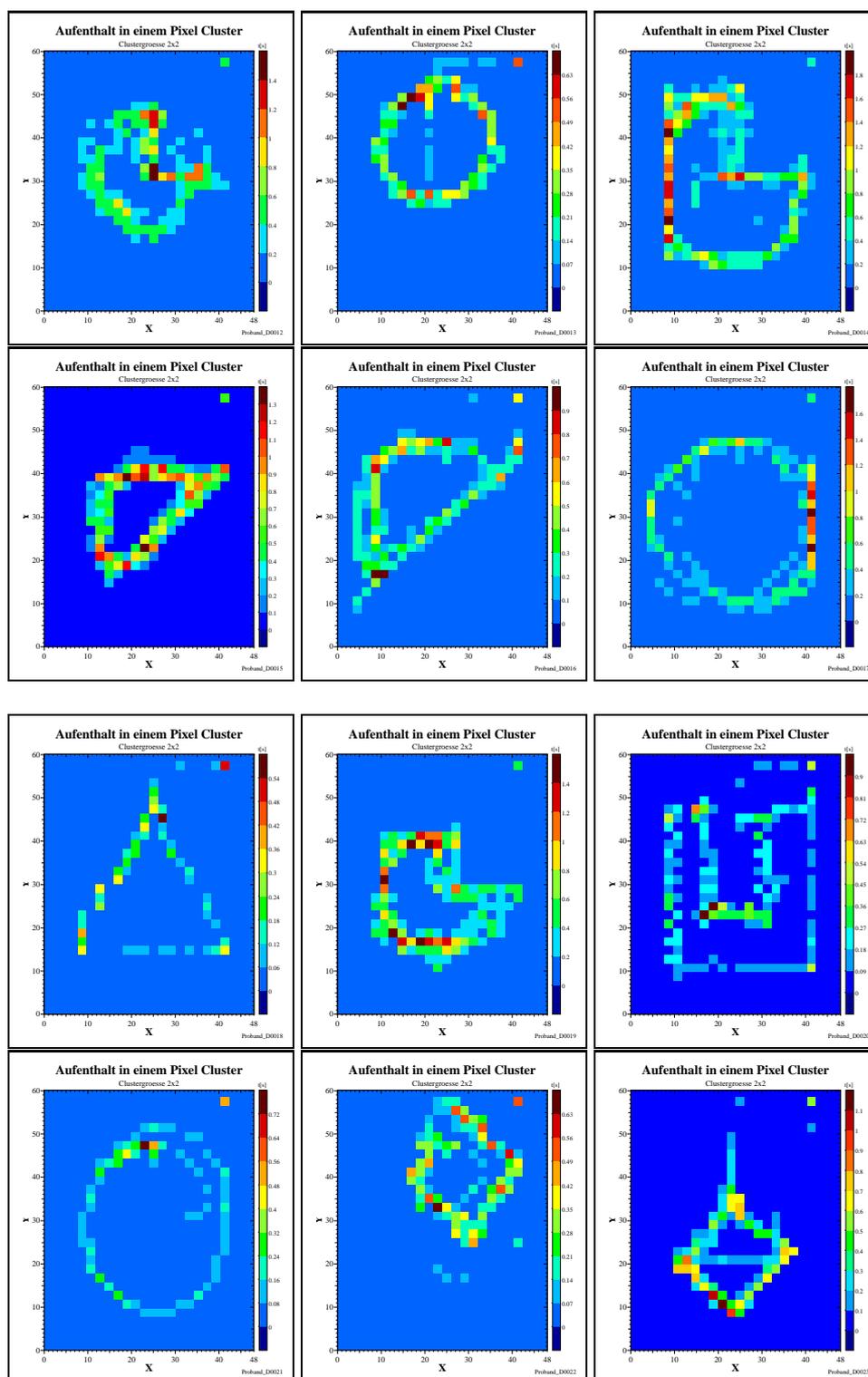


Abbildung G.8: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband D für die Testreihen 4–5 Bilder 0012–0023

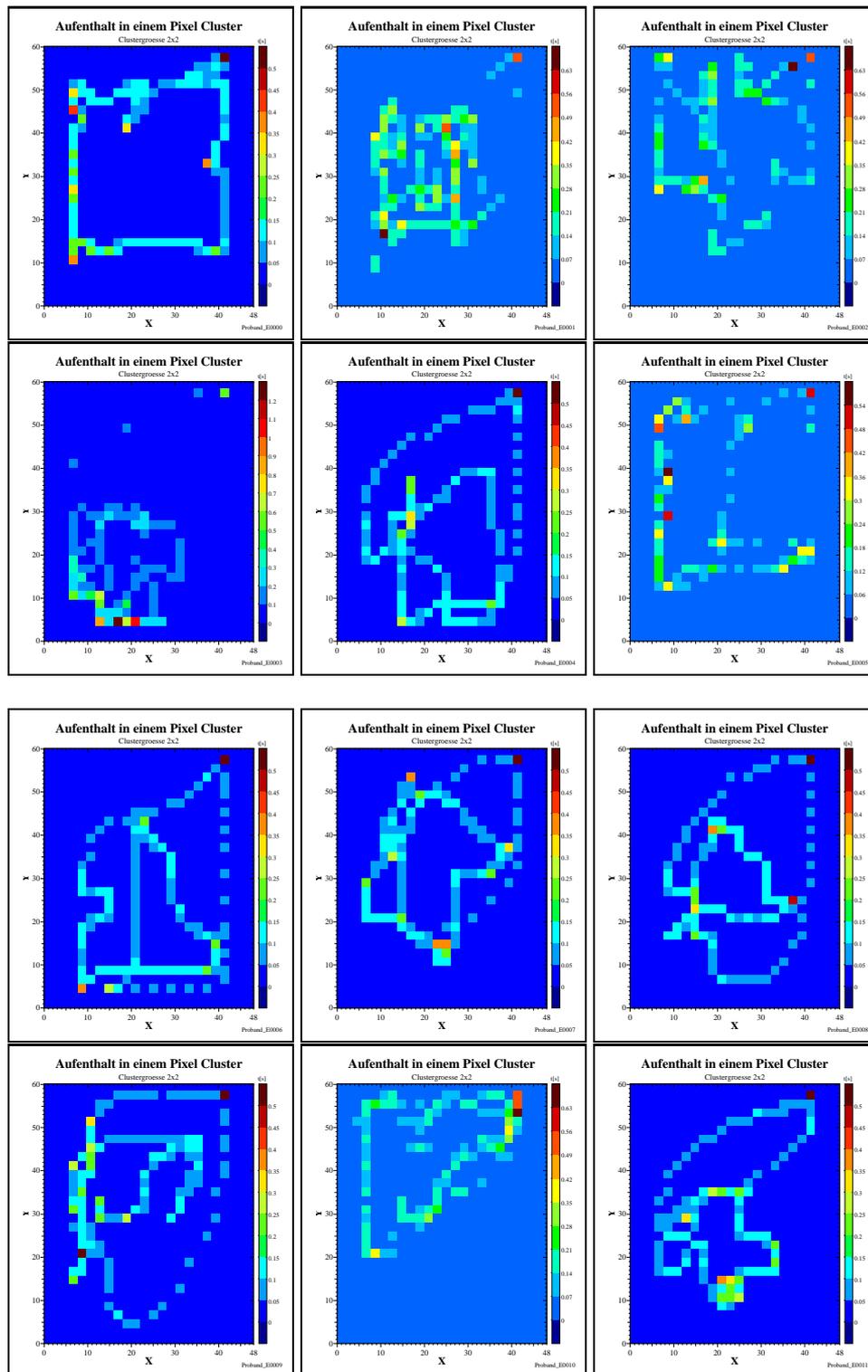


Abbildung G.9: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband E für die Testreihen 2–3 Bilder 0000-0011

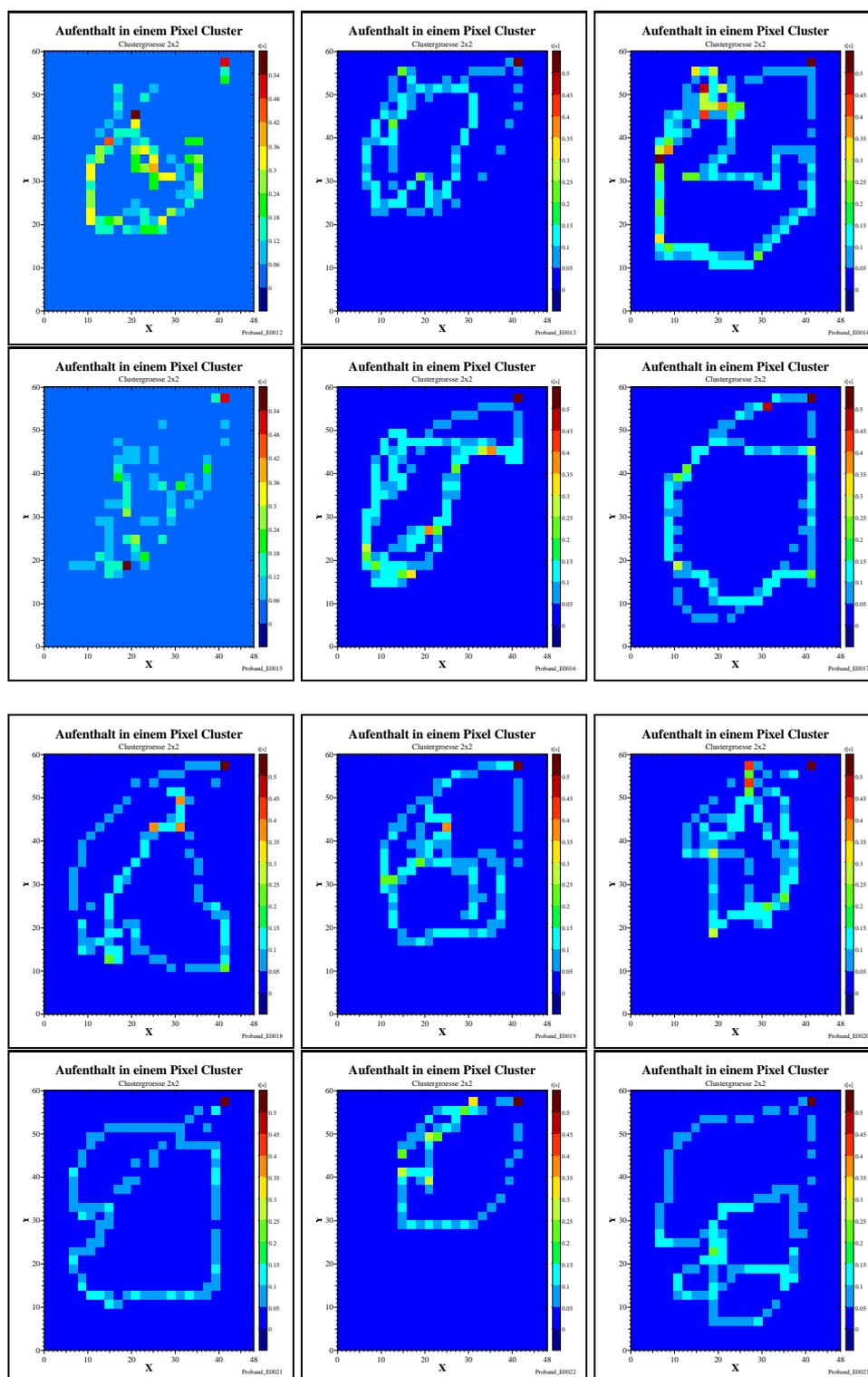


Abbildung G.10: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband E für die Testreihen 4–5 Bilder 0012–0023

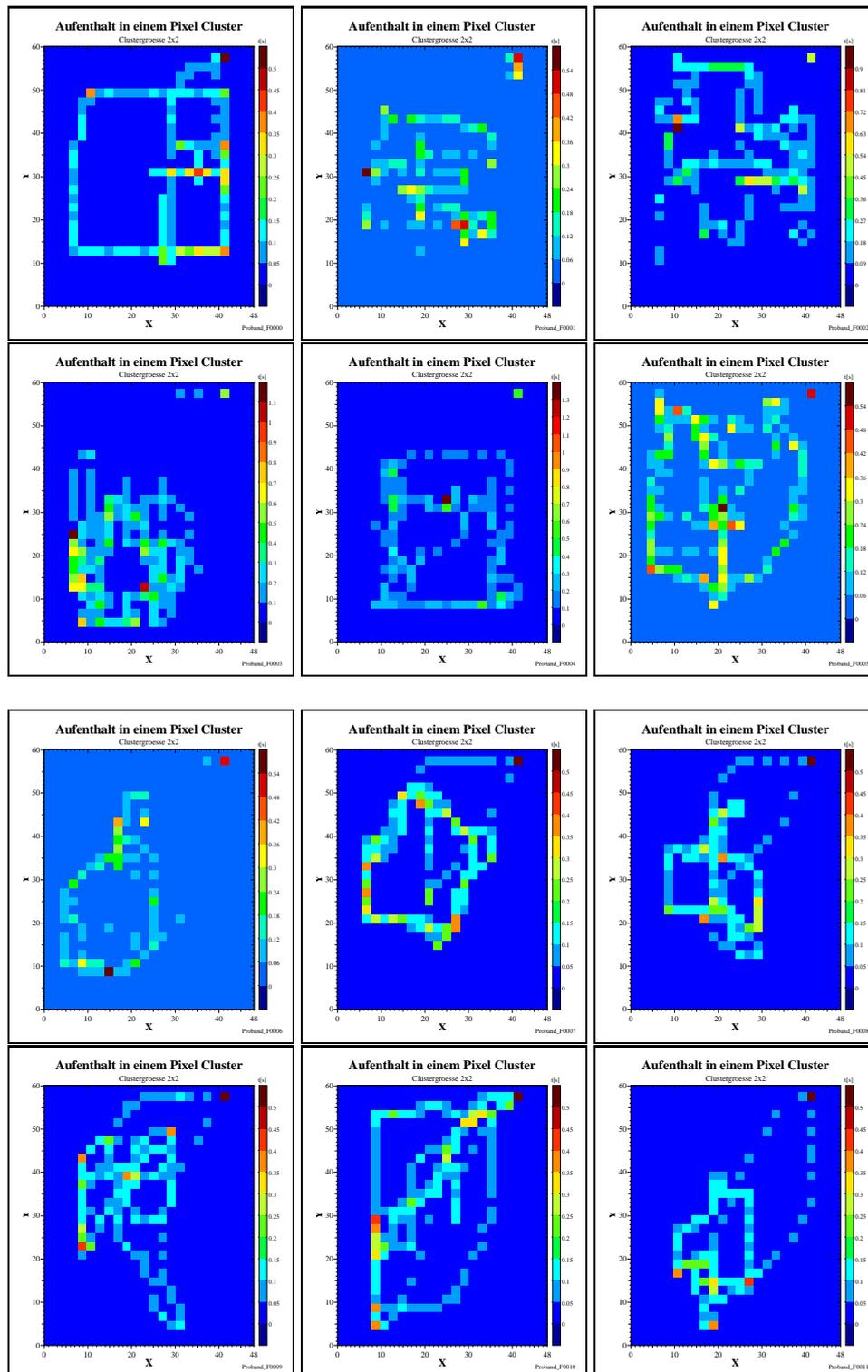


Abbildung G.11: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband F für die Testreihen 2–3 Bilder 0000-0011

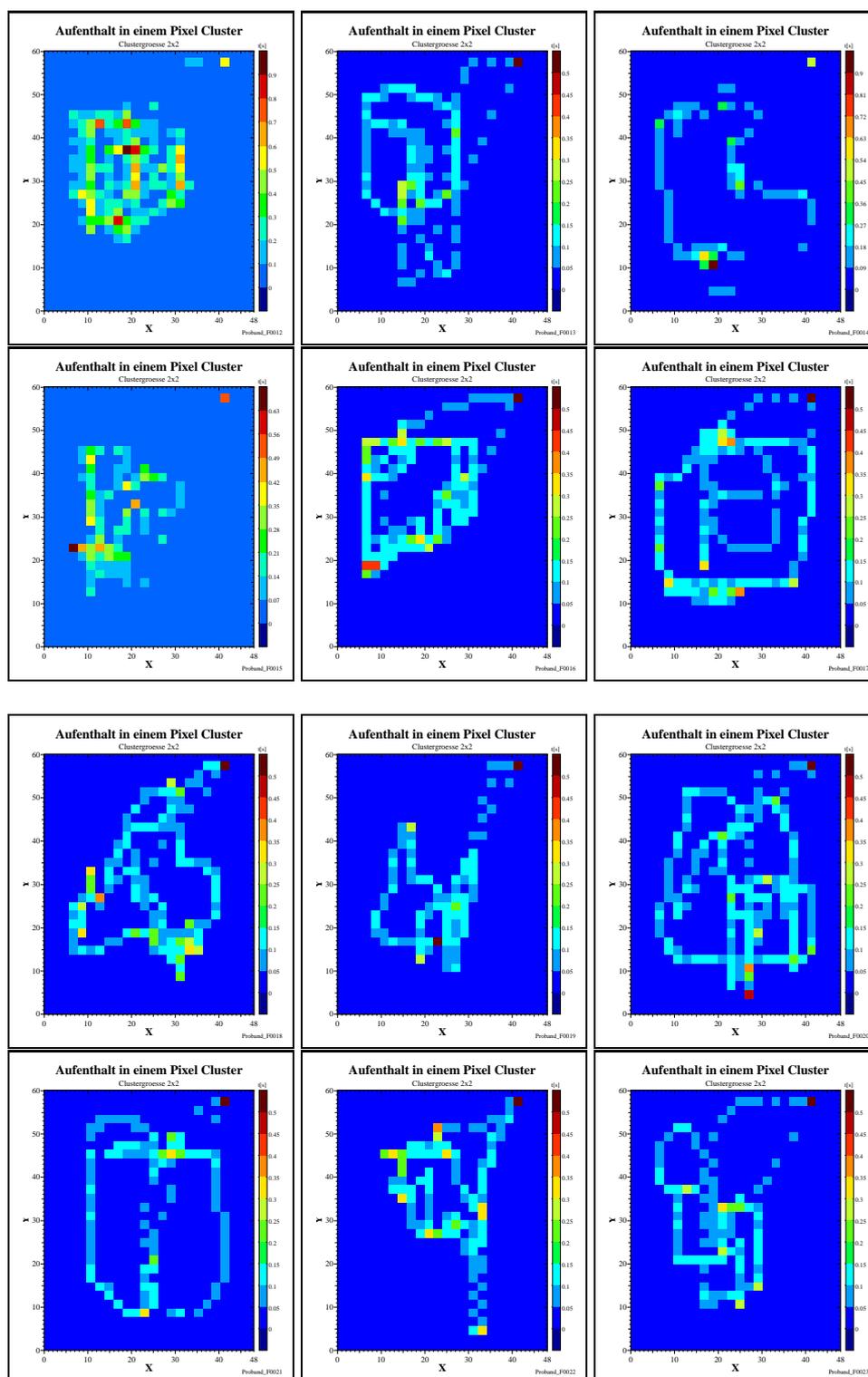


Abbildung G.12: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband F für die Testreihen 4–5 Bilder 0012–0023

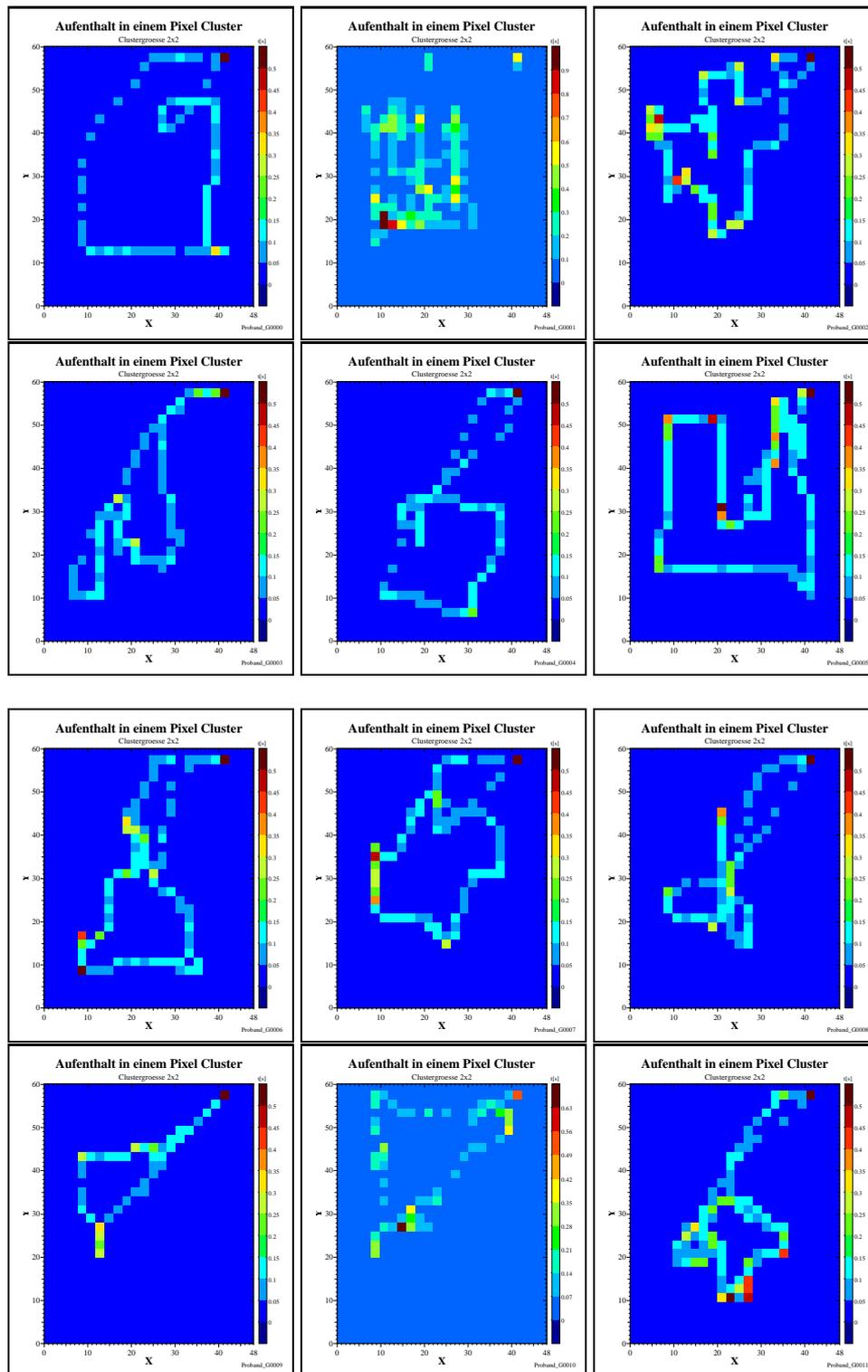


Abbildung G.13: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband G für die Testreihen 2–3 Bilder 0000-0011

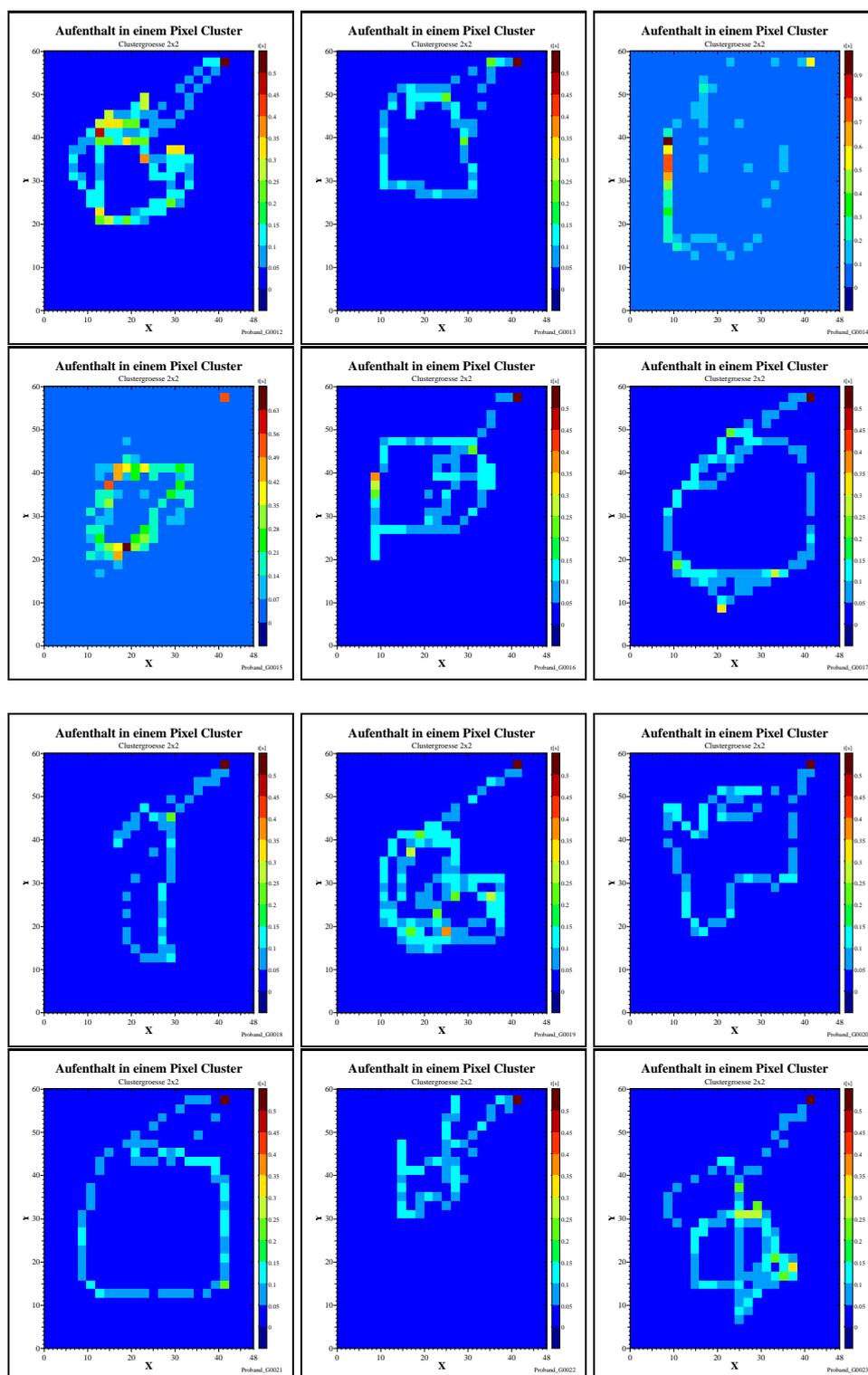


Abbildung G.14: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband G für die Testreihen 4–5 Bilder 0012–0023

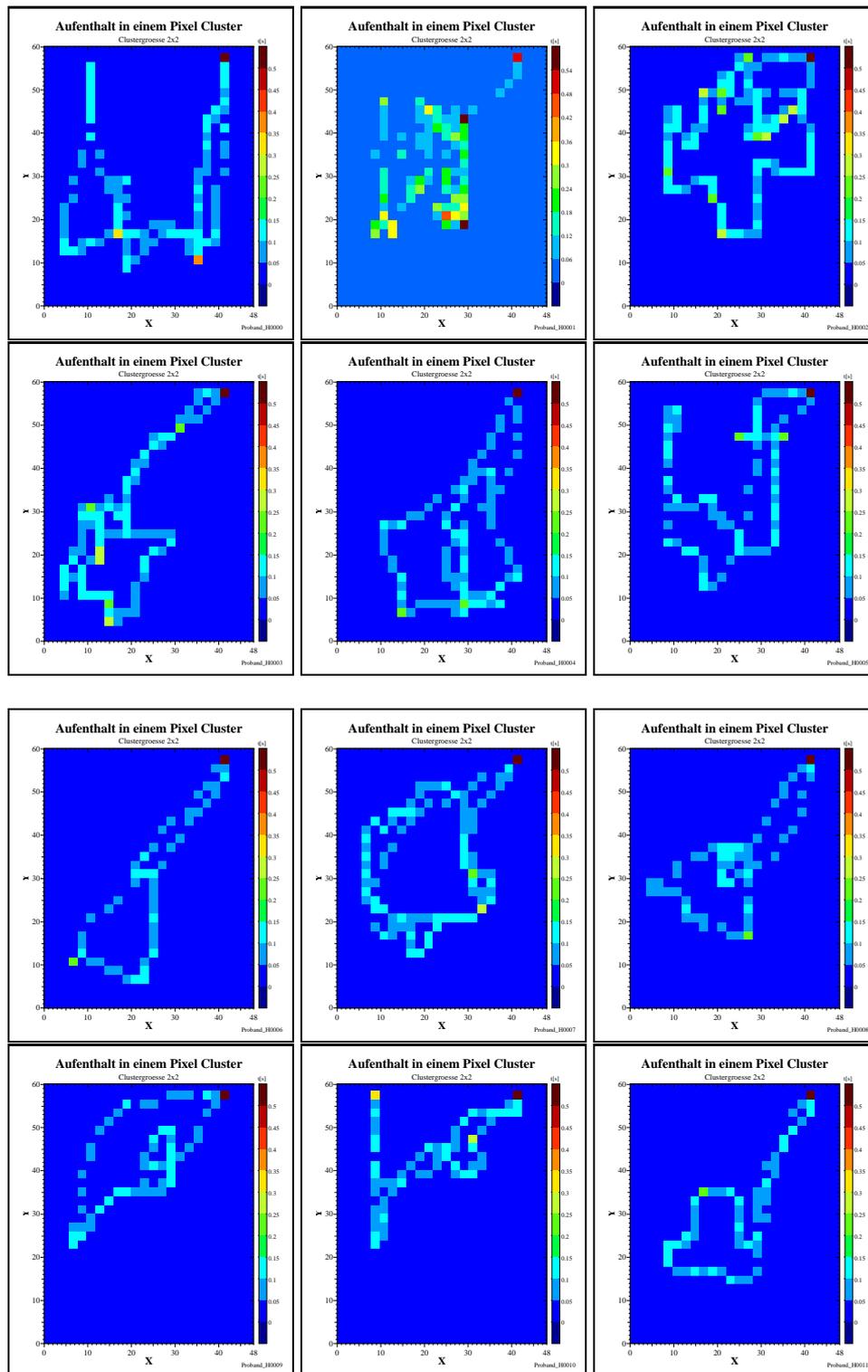


Abbildung G.15: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband H für die Testreihen 2–3 Bilder 0000-0011

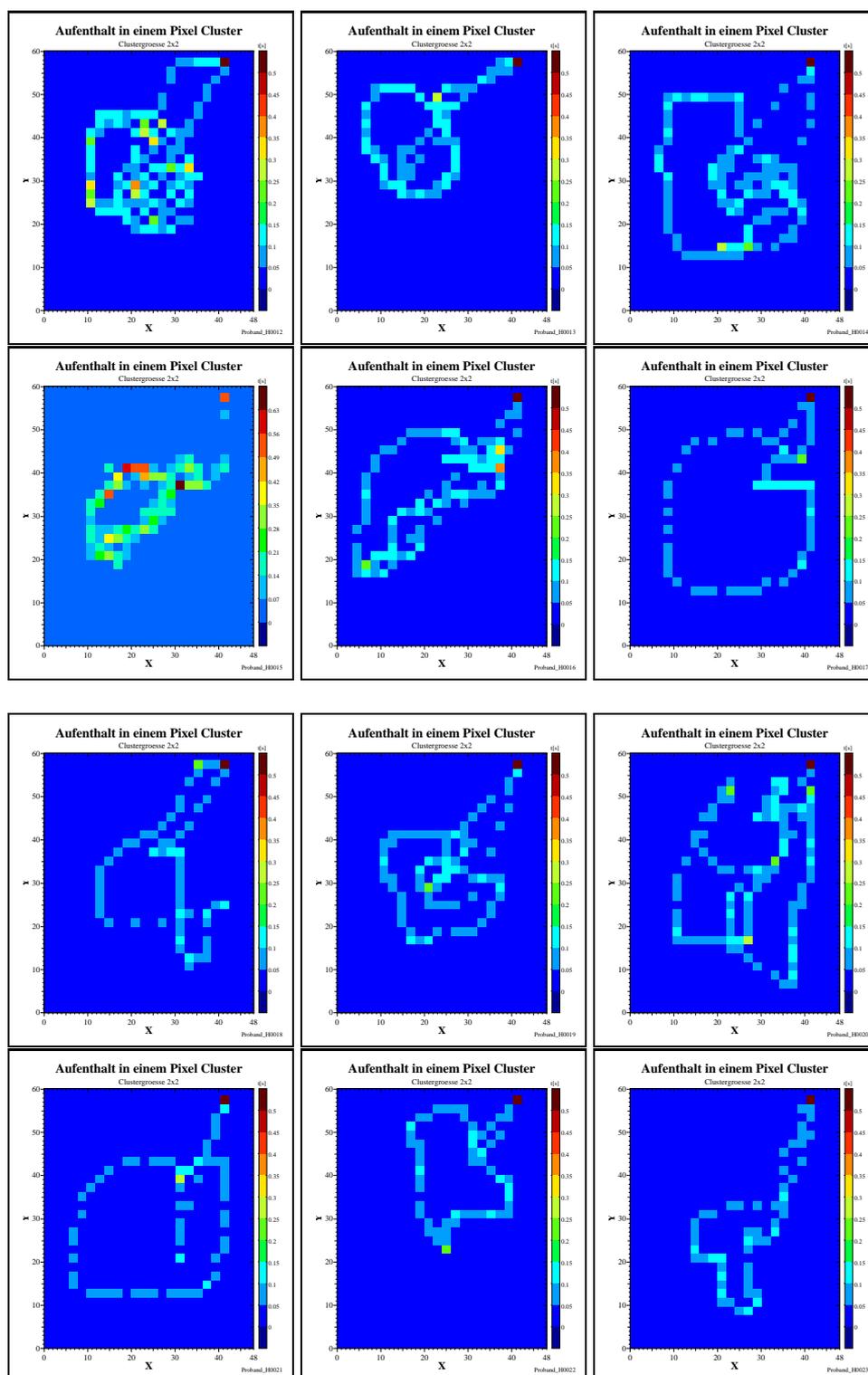


Abbildung G.16: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband H für die Testreihen 4–5 Bilder 0012–0023

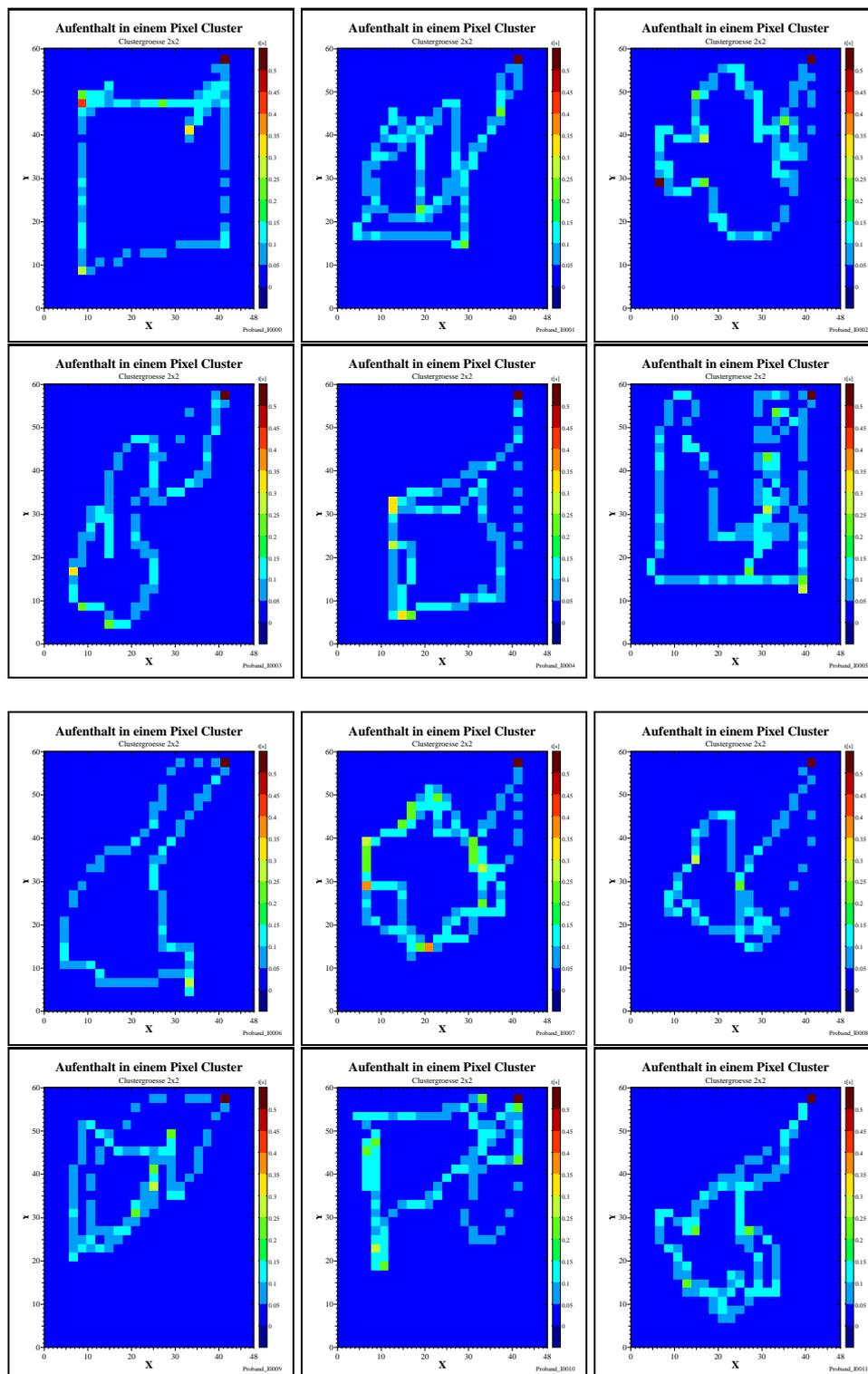


Abbildung G.17: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband I für die Testreihen 2–3 Bilder 0000-0011

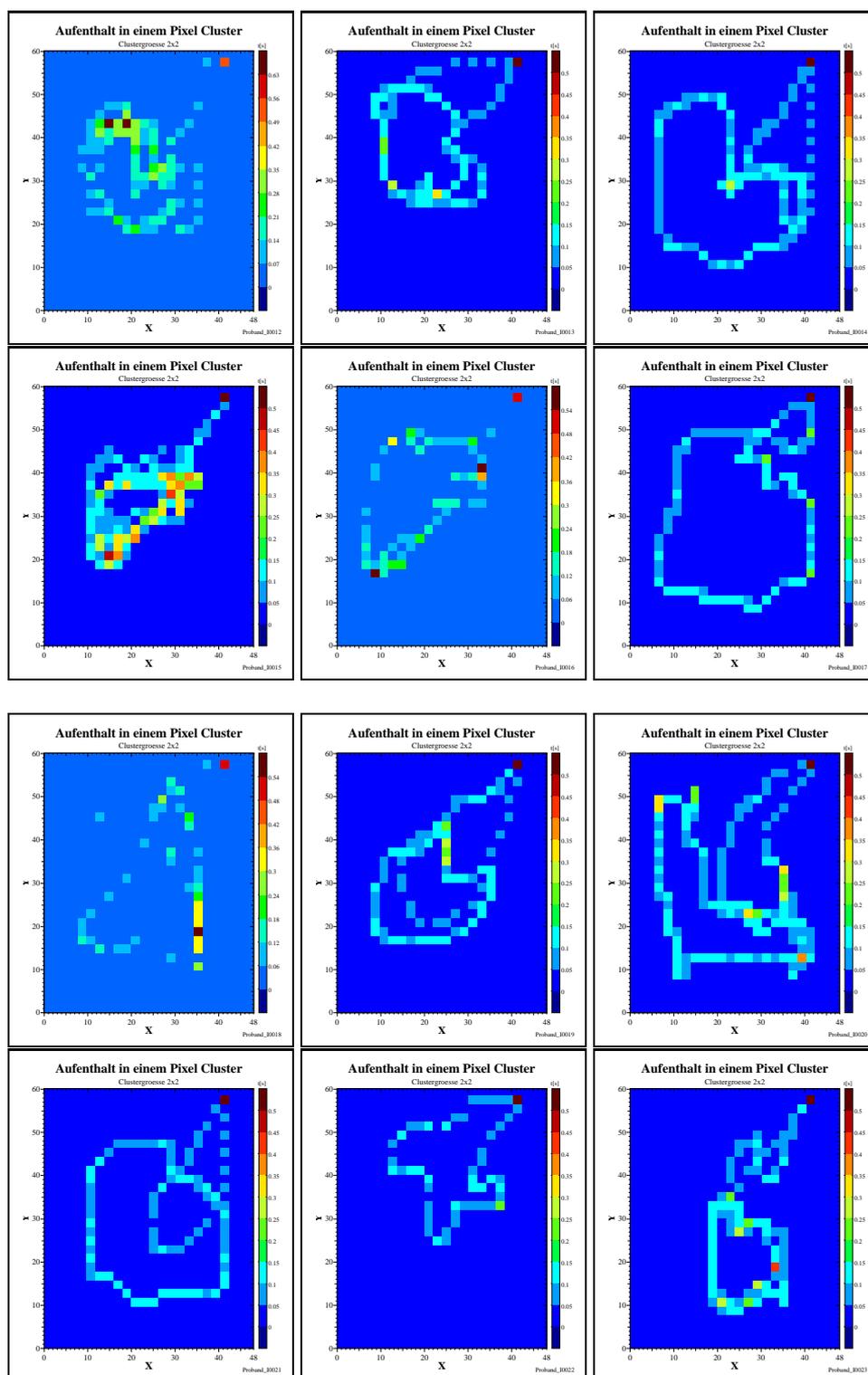


Abbildung G.18: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband I für die Testreihen 4–5 Bilder 0012–0023

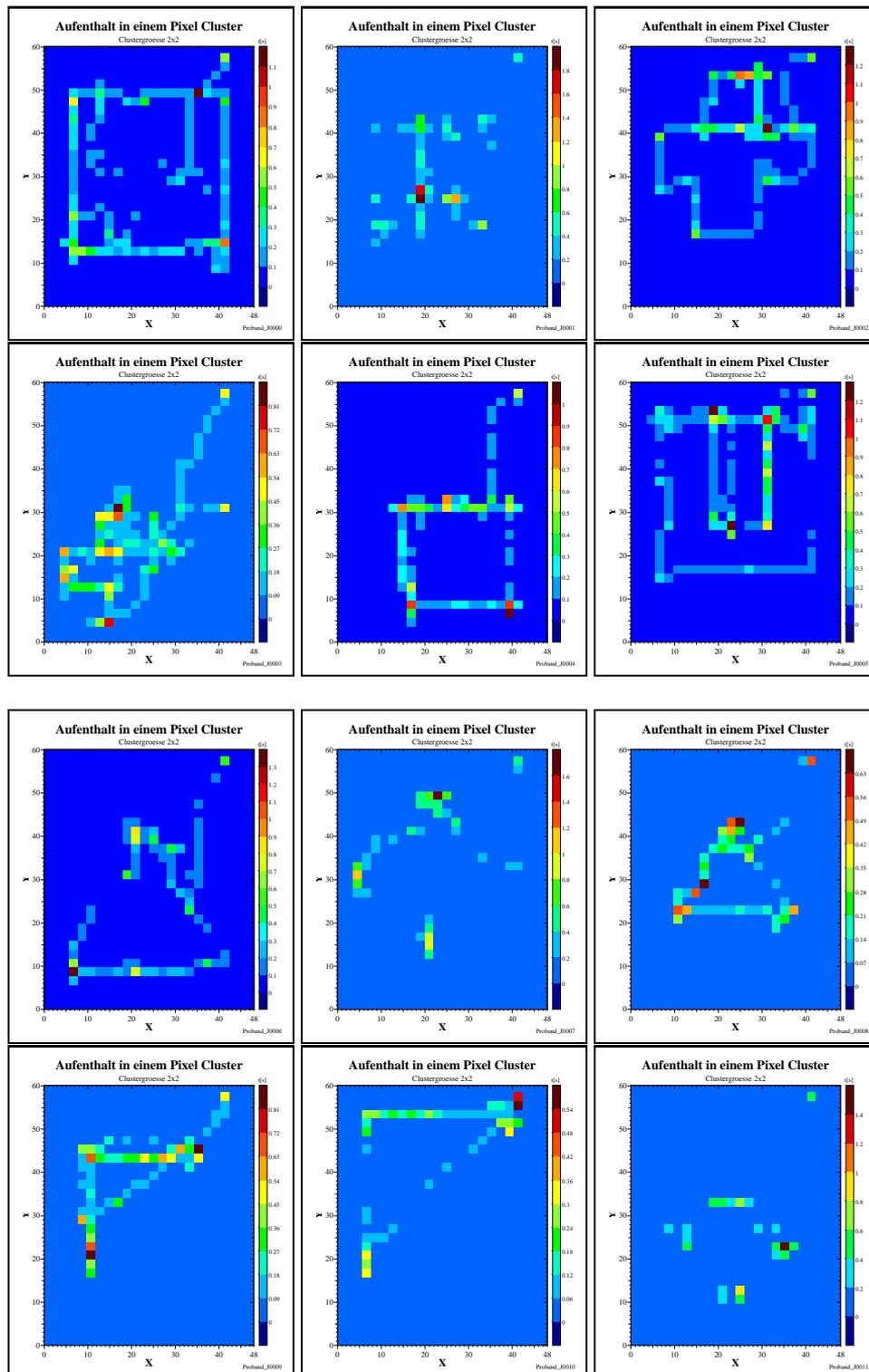


Abbildung G.19: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband J für die Testreihen 2–3 Bilder 0000-0011

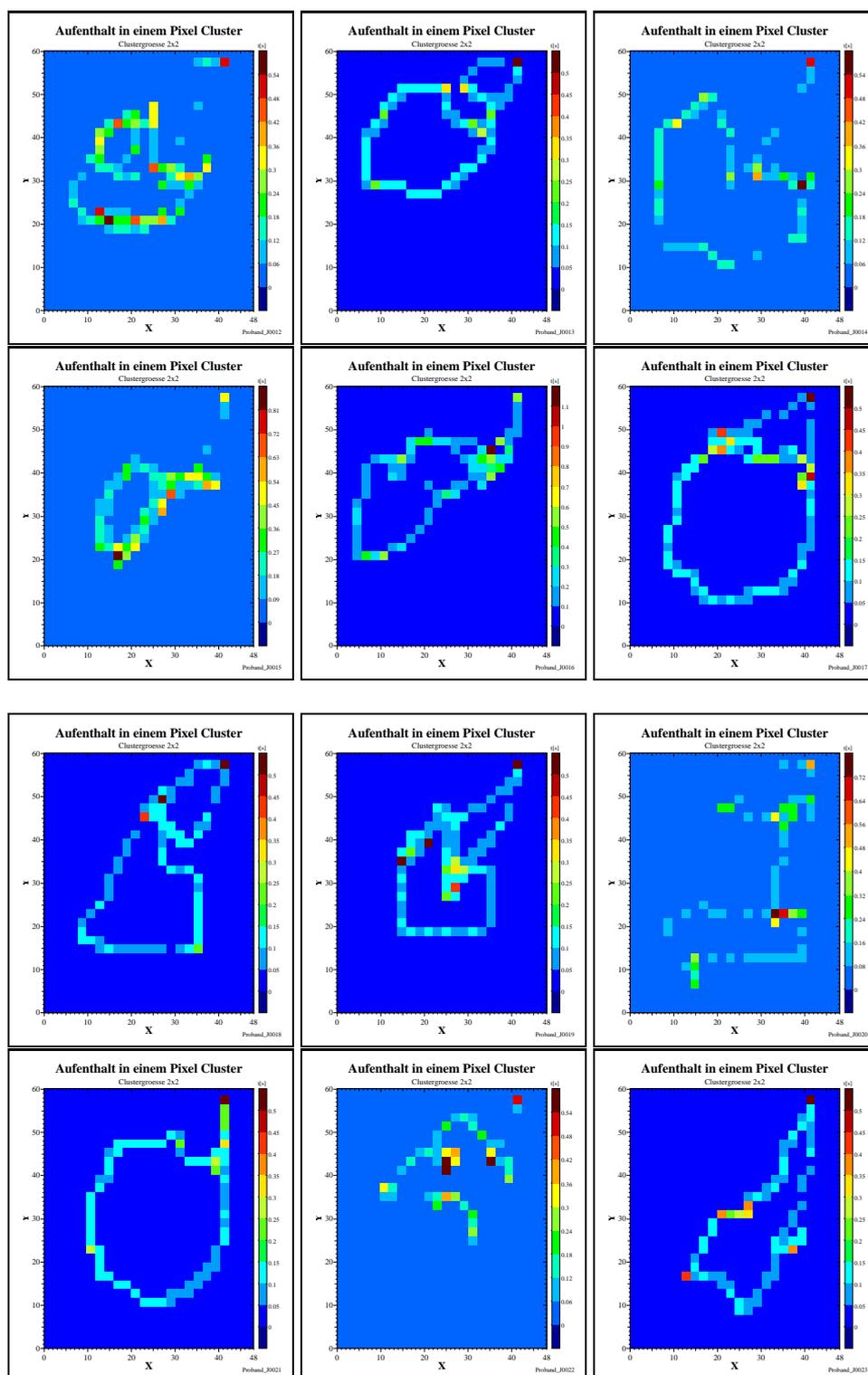


Abbildung G.20: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband J für die Testreihen 4–5 Bilder 0012–0023

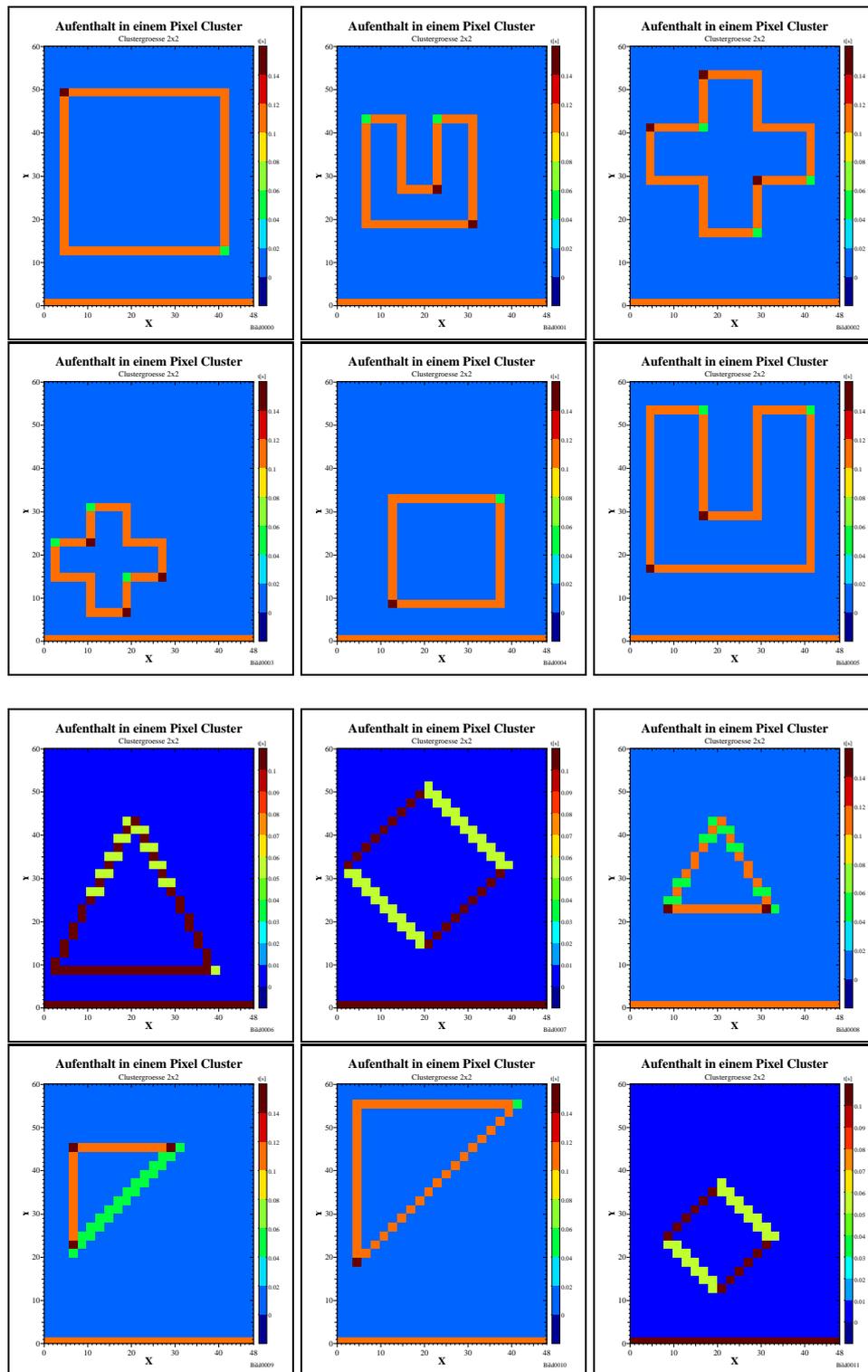


Abbildung G.21: Zum Vergleich die vorgelegten Bilder 0000–0011 im dem gleichen Maßstab wie die *Ort-Zeit-Plots*

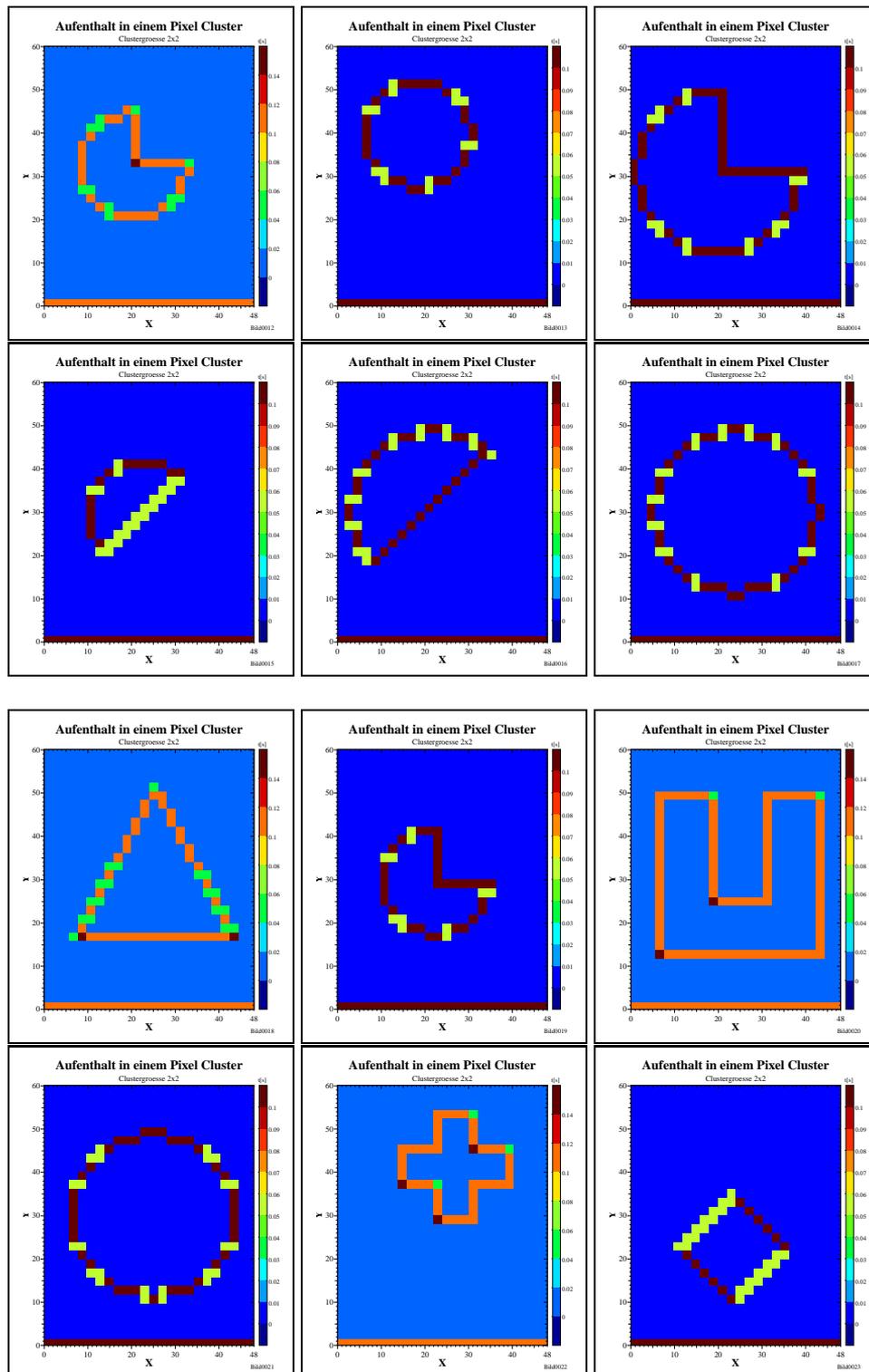


Abbildung G.22: Zum Vergleich die vorgelegten Bilder 0012–0023 im dem gleichen Maßstab wie die *Ort-Zeit-Plots*

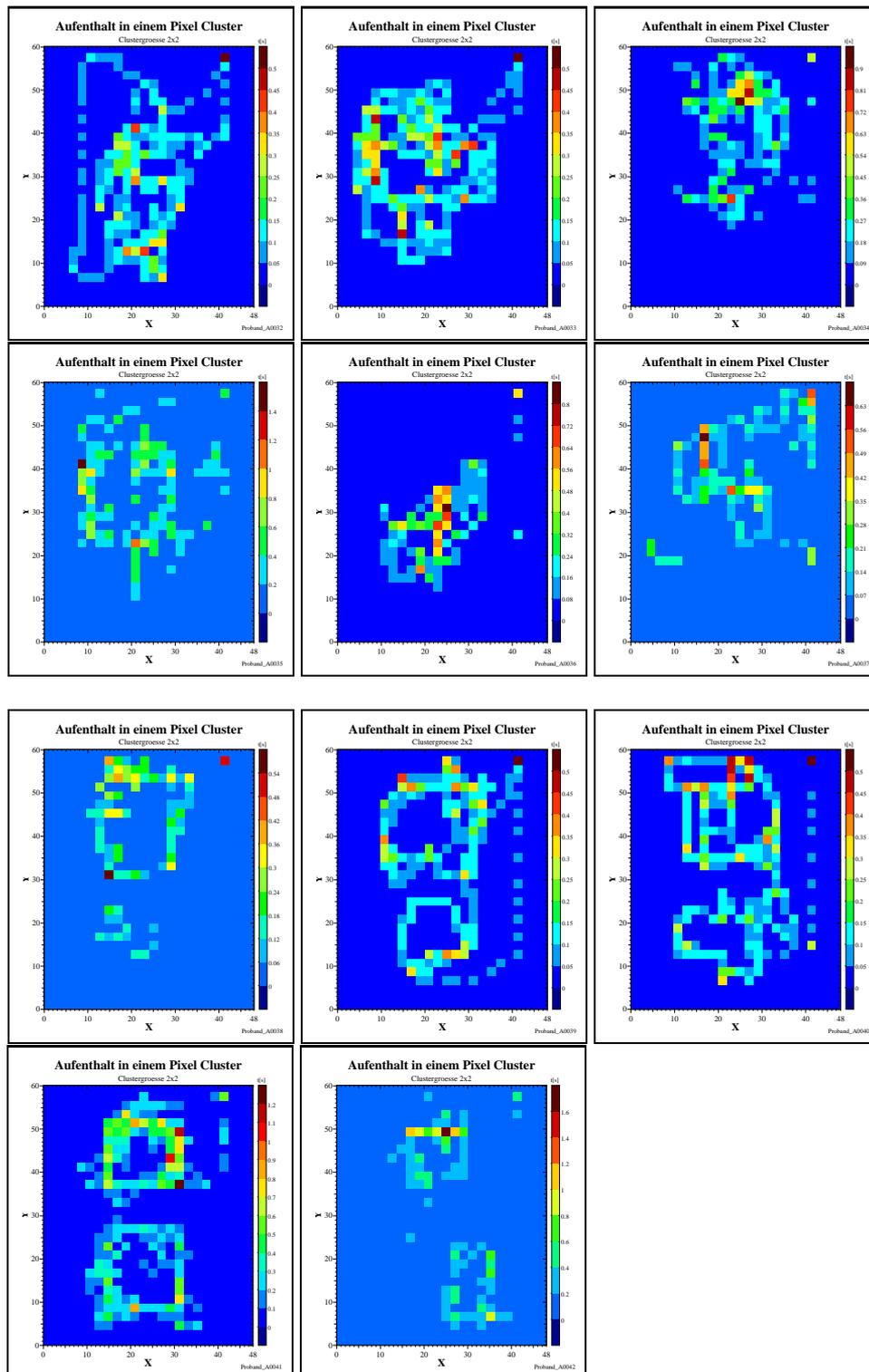


Abbildung G.23: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband A für die Testreihen 7–8 Bilder 0032-0042

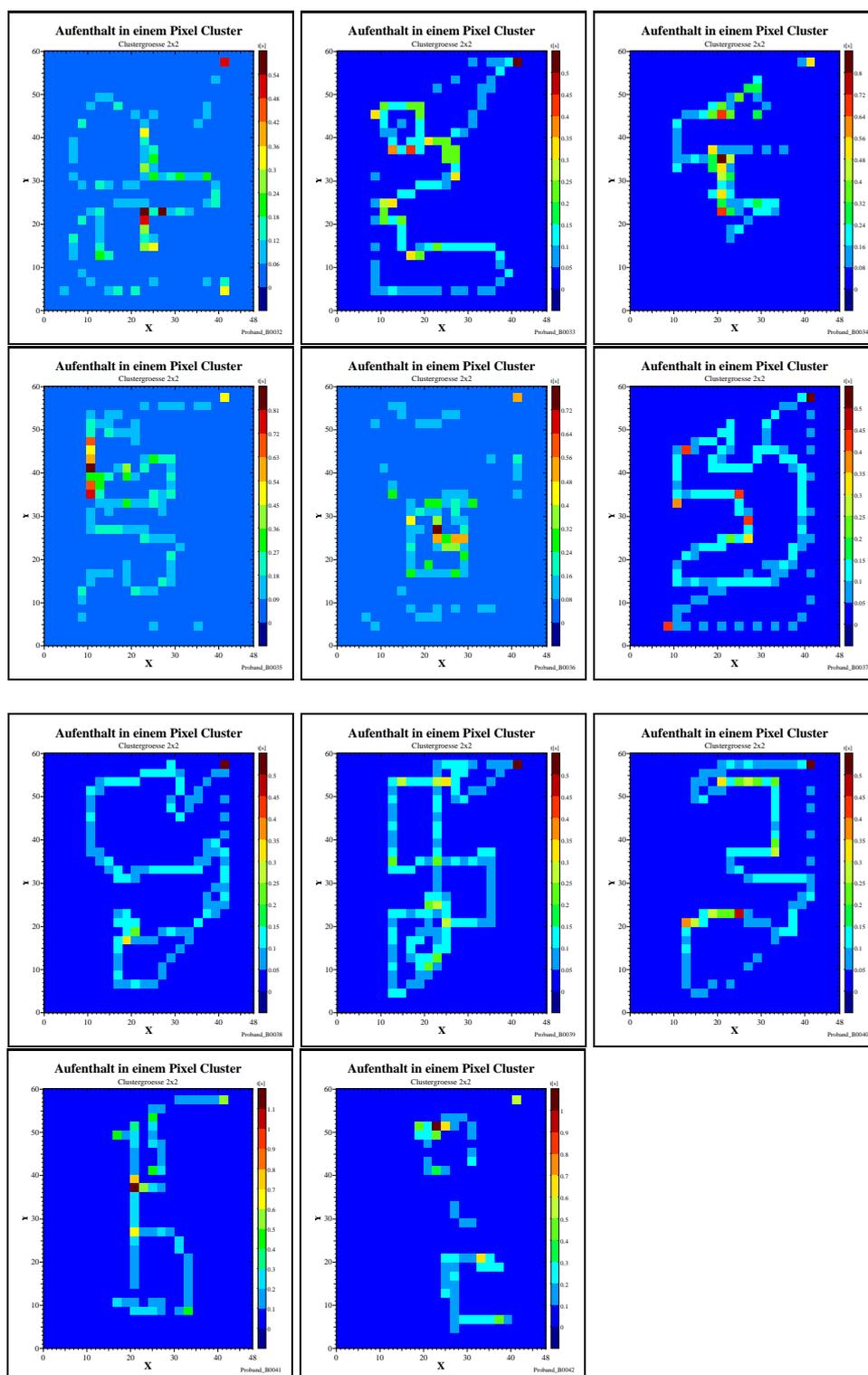


Abbildung G.24: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband B für die Testreihen 7–8 Bilder 0032-0042

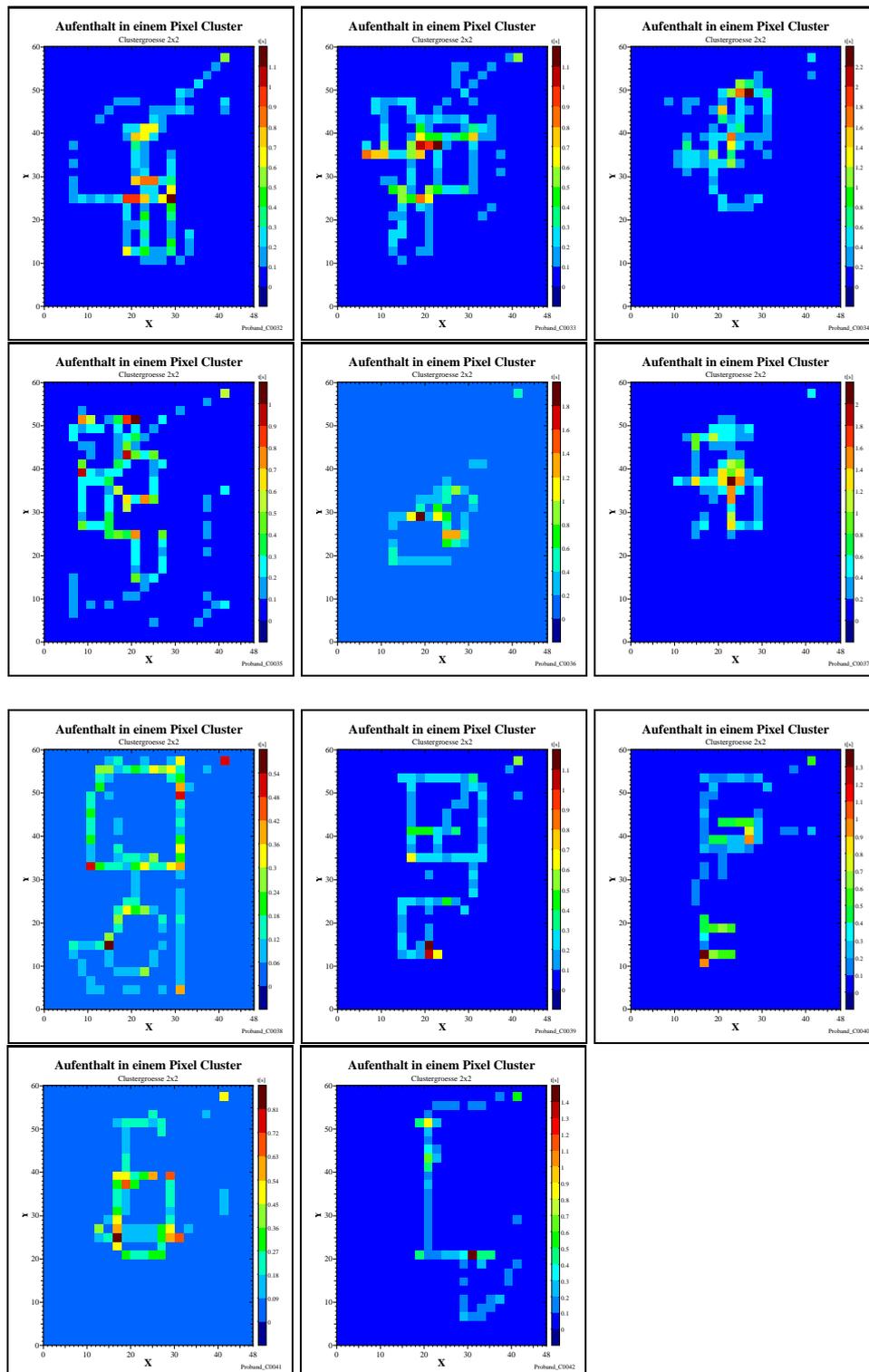


Abbildung G.25: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband C für die Testreihen 7–8 Bilder 0032-0042

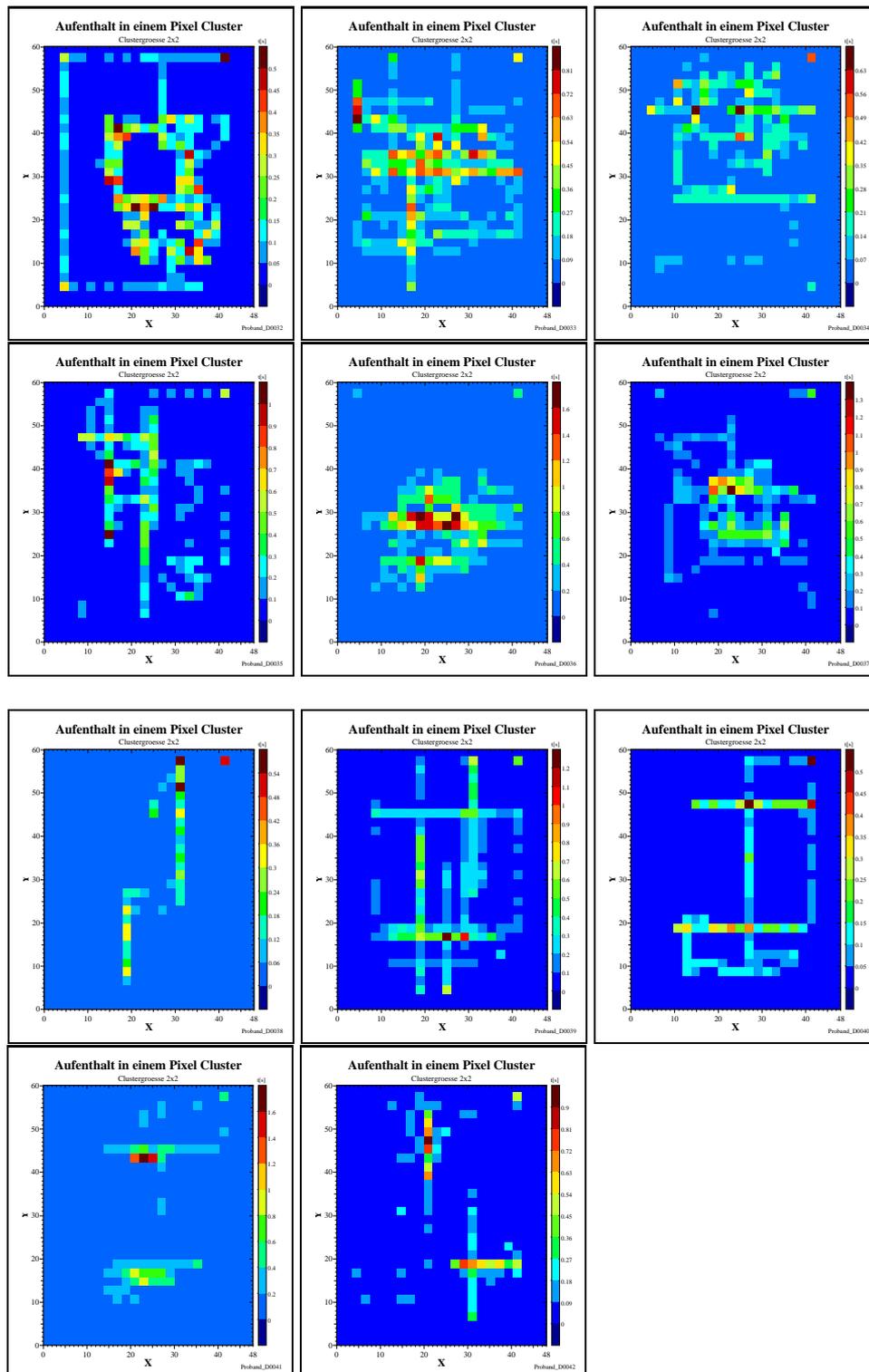


Abbildung G.26: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband D für die Testreihen 7–8 Bilder 0032-0042

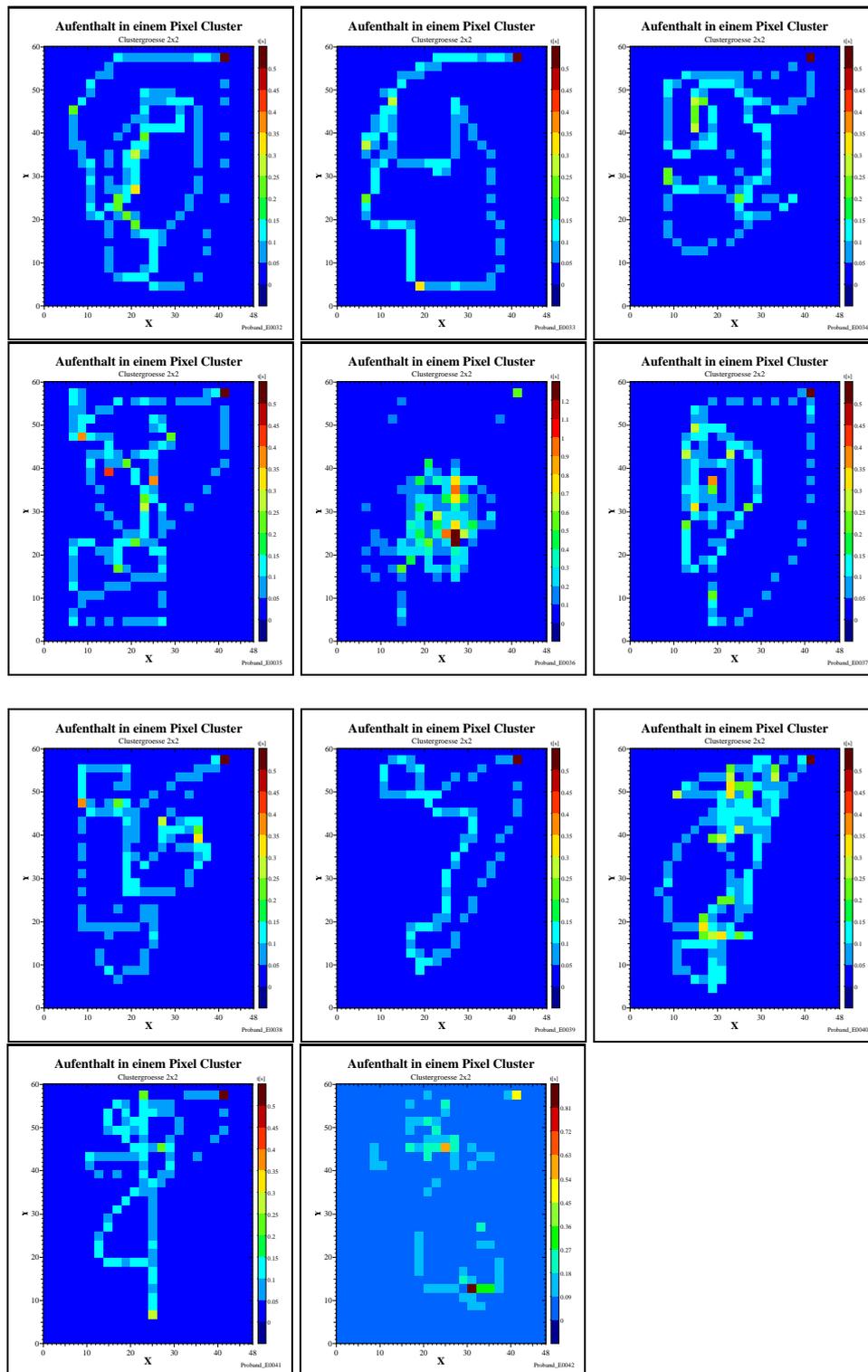


Abbildung G.27: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband E für die Testreihen 7–8 Bilder 0032-0042

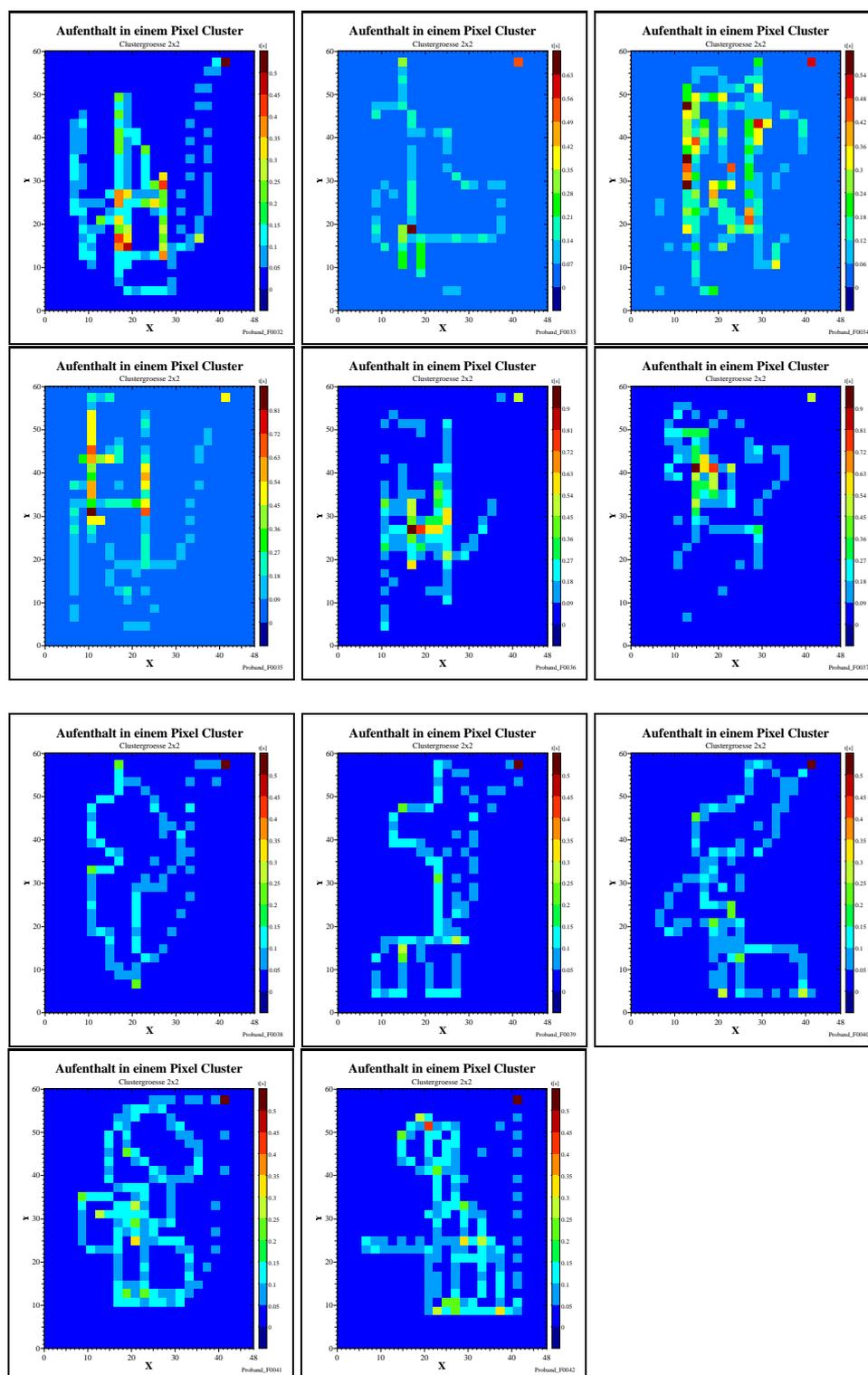


Abbildung G.28: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband F für die Testreihen 7–8 Bilder 0032-0042

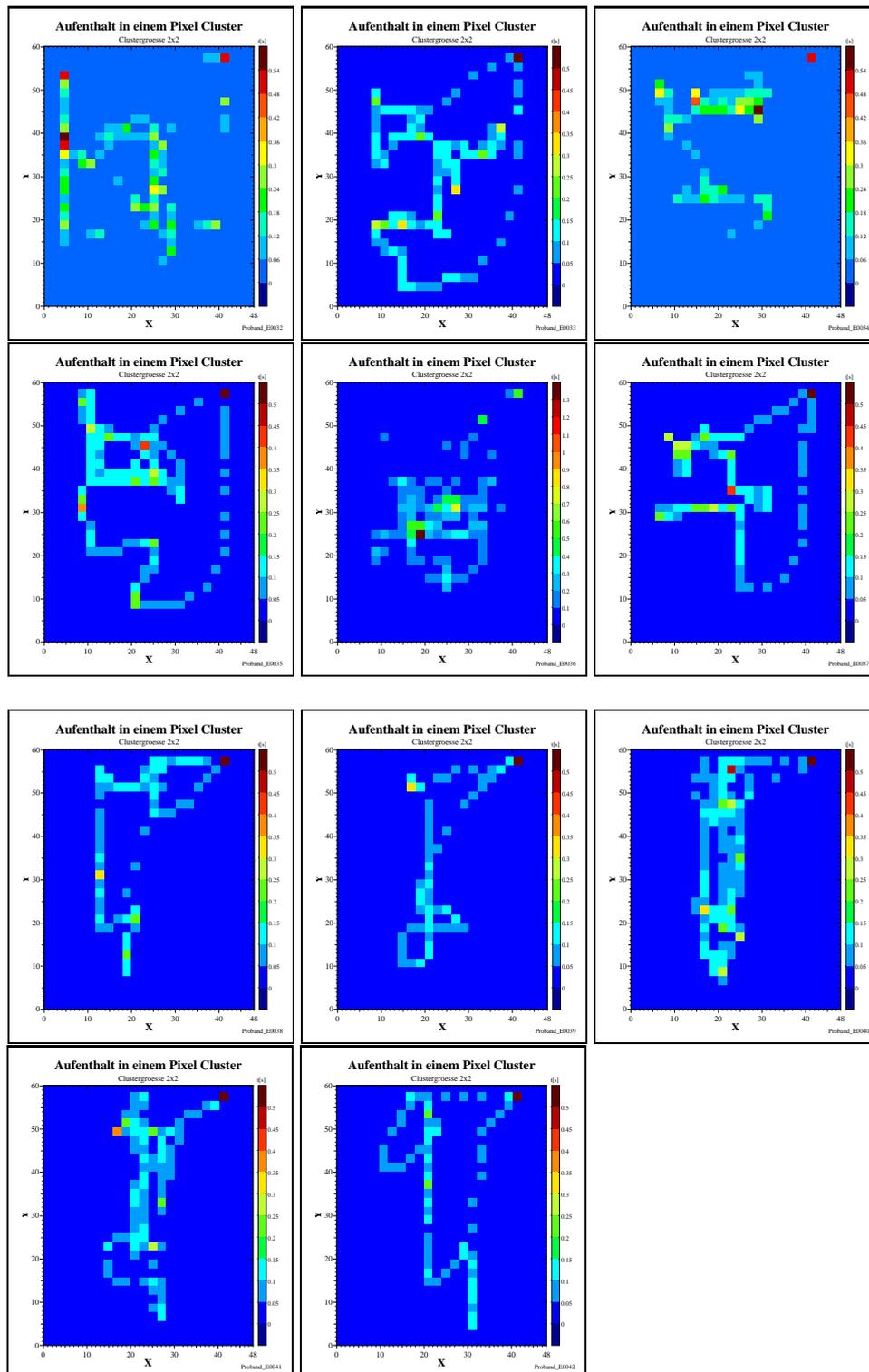


Abbildung G.29: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband G für die Testreihen 7–8 Bilder 0032-0042

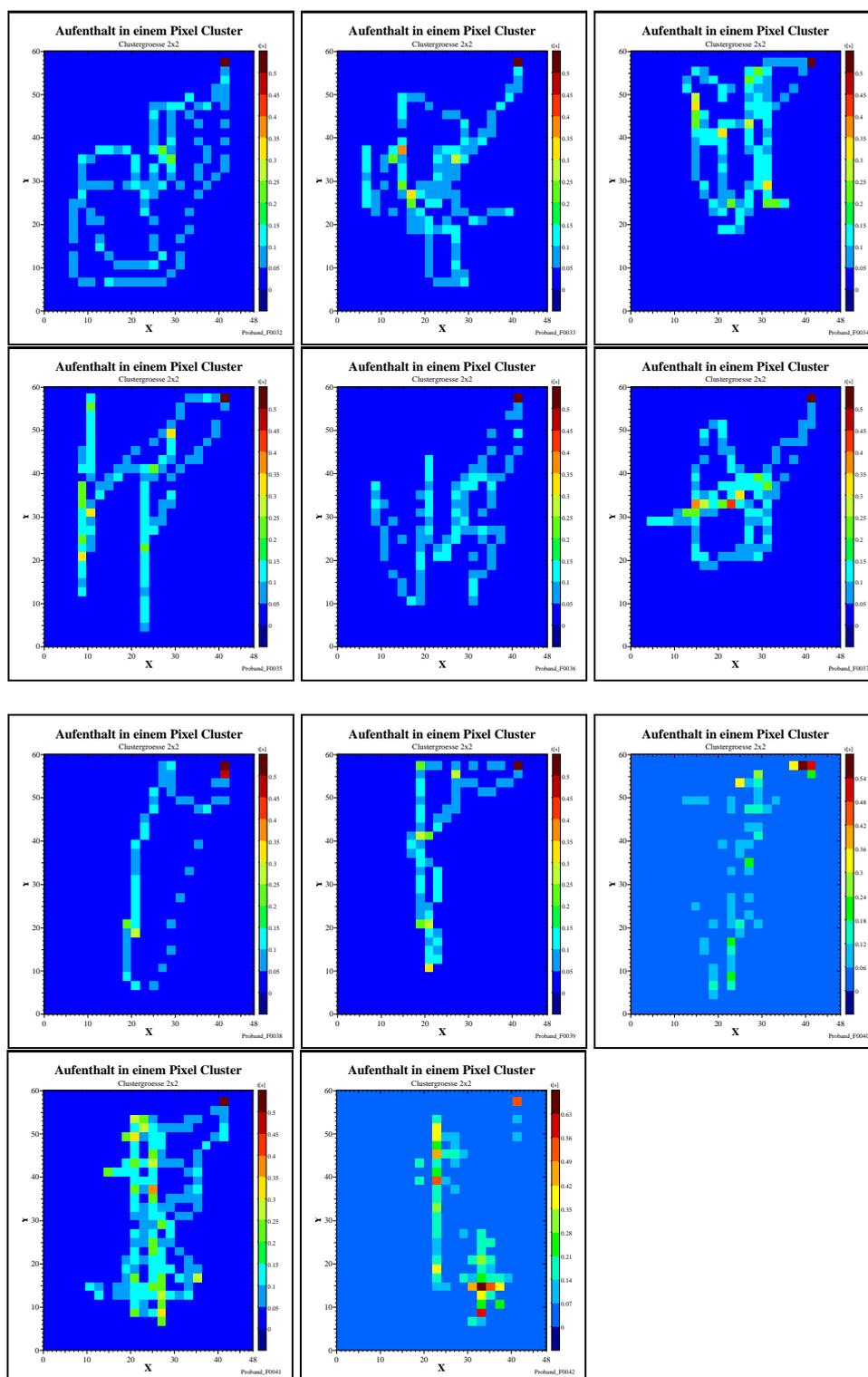


Abbildung G.30: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband H für die Testreihen 7–8 Bilder 0032-0042

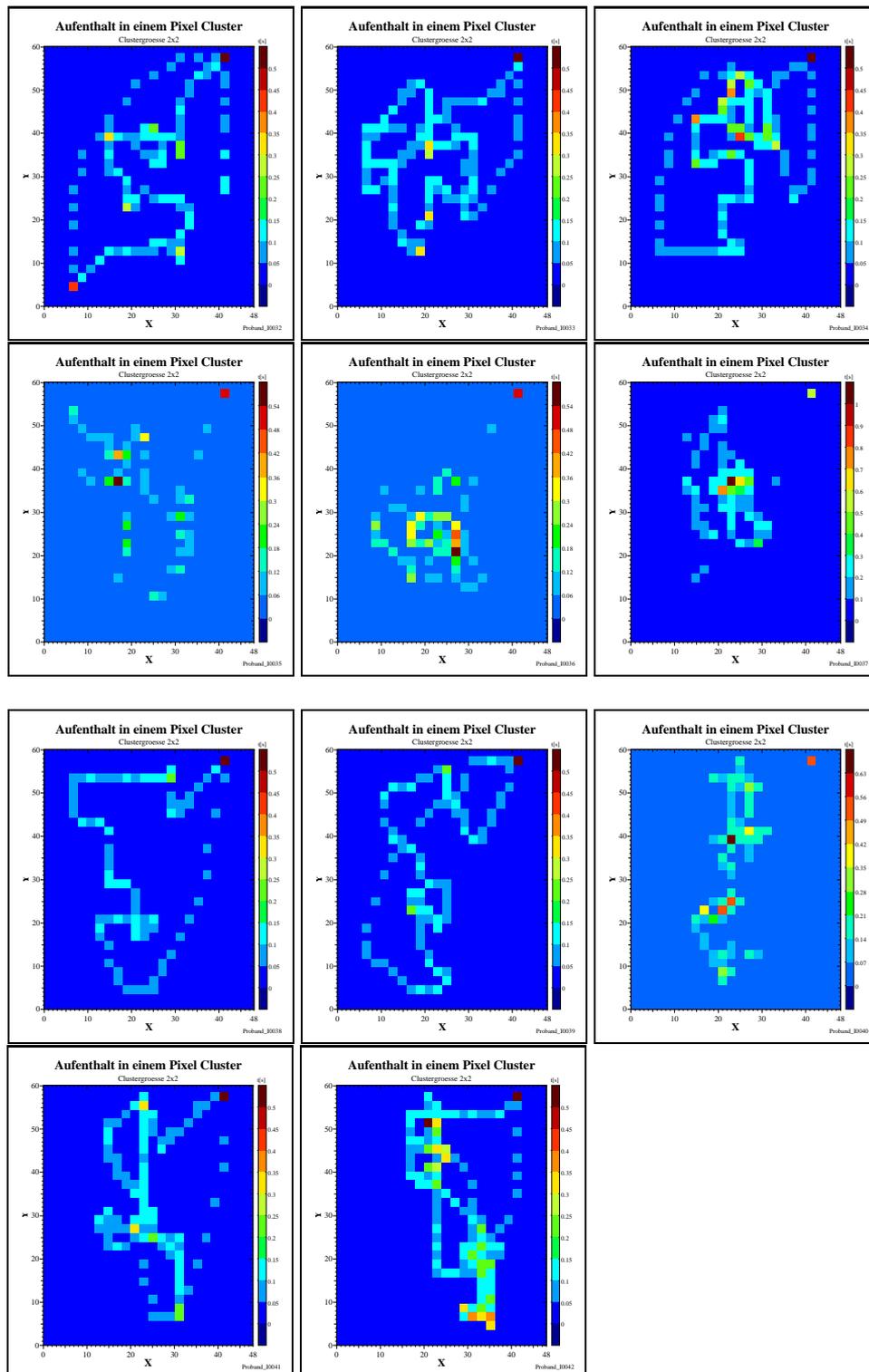


Abbildung G.31: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband I für die Testreihen 7–8 Bilder 0032-0042

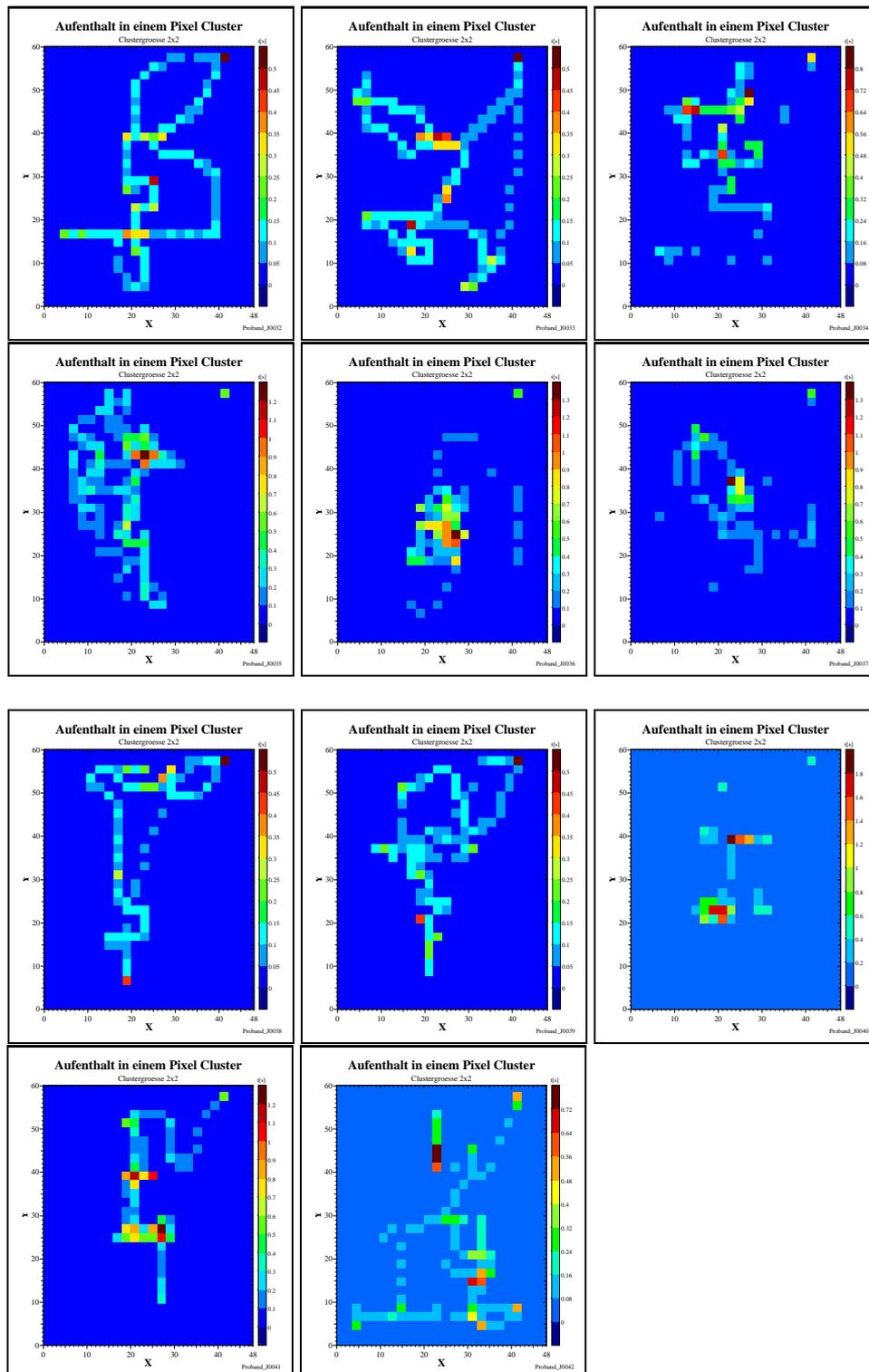


Abbildung G.32: Die Diagramme zeigen die *Ort-Zeit-Plots* des Proband J für die Testreihen 7–8 Bilder 0032-0042

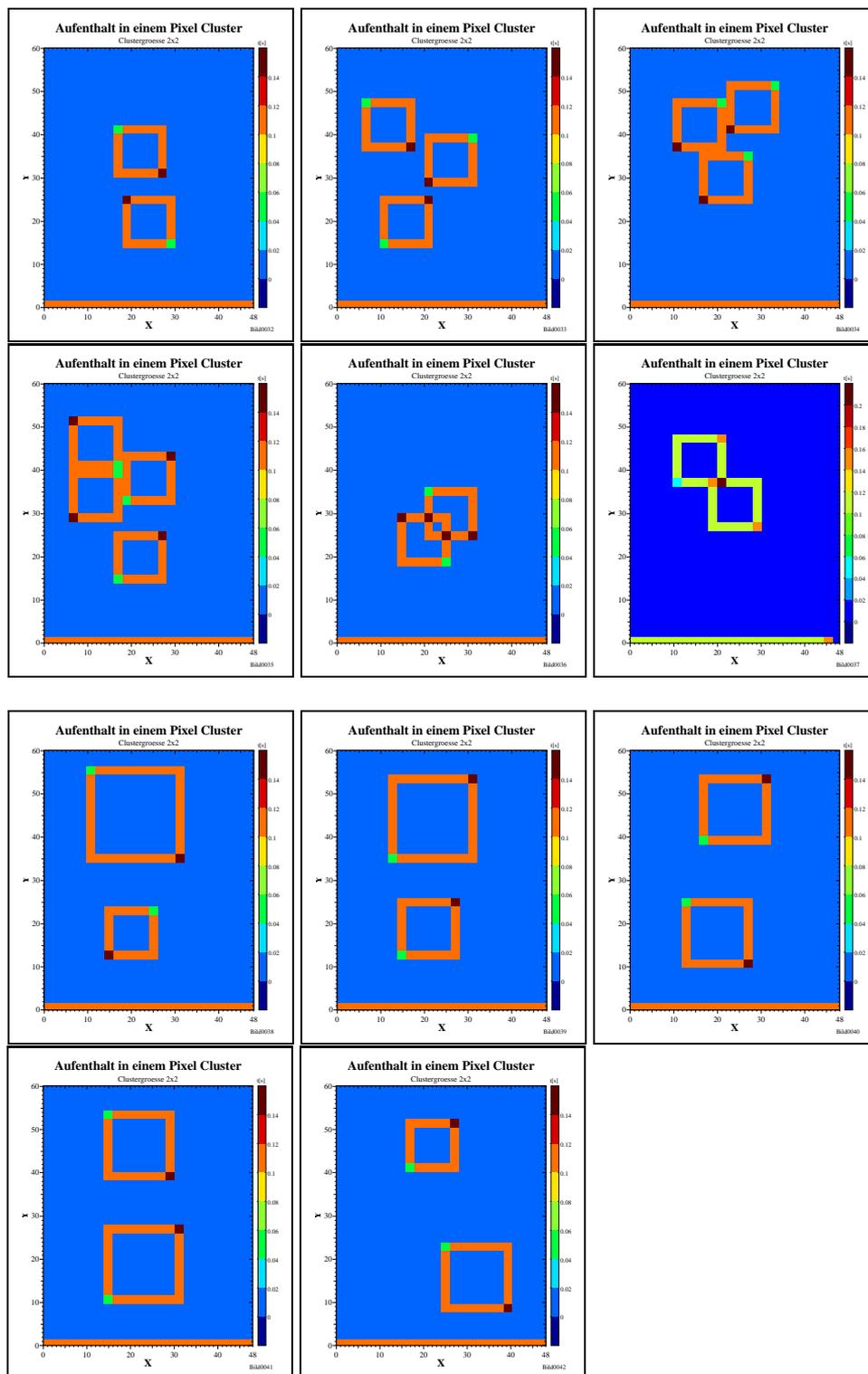


Abbildung G.33: Zum Vergleich die vorgelegten Bilder 0032–0042 im dem gleichen Maßstab wie die *Ort-Zeit-Plots*

Literaturverzeichnis

- [Bach-y-Rita 69] P. Bach-y-Rita, C. C. Collins, F. Saunders, F. White and L. Scadden, „*Vision Substitution by Tactile Image Projection*“, Nature 221, 963 (1969)
- [Bach-y-Rita 71] P. Bach-y-Rita, „*A tactile vision substitution system based on sensory plasticity*“, Proceedings of The Second Conference on Visual Prosthesis, Academic Press New York and London 1971, pp. 281 - 290
- [Bach-y-Rita 72] Paul Bach-y-Rita, „*Brain Mechanisms in Sensory Substitution*“, Academic Press New York 1972
- [Bach-y-Rita 84] P. Bach-y-Rita & B. Hughes, „*Tactile vision substitution: some instrumentation and perceptual considerations*“, in D. H. Warren & E. R. Strelow, „*Electronic Spatial Sensing for the Blind*“, Nato Advanced Research Workshop on Visual Spatial Prostheses for The Blind, Lake Arrowhead, Calif., 1984 (pp. 171 - 186)
- [Bach-y-Rita 95] P. Bach-y-Rita, „*Nonsynaptic Diffusion Neurotransmission and Late Brain Reorganization*“, Demos Publication, New York, 1995
- [Collins 71] C. C. Collins, „*Tactile vision synthesis*“, Proceedings of The Second Conference on Visual Prosthesis, Academic Press New York and London 1971, pp. 267 - 279
- [Craig 82] J. C. Craig, E. Sherrick, „*Dynamik tactile displays*“, in W. Schiff & E. Flulke(Eds.), „*Tactual perception: A source book*“ (pp. 209 - 233), New York Canbrige University Press , 1982
- [expo2000] Gesellschaft zur Vorbereitung und Durchführung der Weltausstellung *expo2000* in Hannover GmbH, Homepage, „<http://www.expo2000.de>“
- [Fischer 95] H. Fischer, „*Entwicklung der Visuellen Wahrnehmung*“, Beltz, Physiologie-Verl.-Union, Weinheim, 1995
- [Goldstein 97] E. Bruce. Goldstein, „*Wahrnehmungspsychologie: eine Einführung*“, Spektrum, Akad. Verl., Heidelberg, Berlin, Oxford, 1997
- [INA 96] Firma INA Lineartechnik oHG, „*Druckschrift LIF Linearführungen*“

- [Jähne 93] B. Jähne, „*Digitale Bildverarbeitung*“, Springer Verlag Heidelberg, 3. Auflage 1993
- [Jeschke 96] K. Jeschke, „*Entwicklung und Bau eines taktilen Blindenhilfssystems*“, Diplomarbeit im Institut für Angewandte Physik, Heidelberg, 1996
- [Kennedy 97] John M. Kennedy, „*How the Blind Draw*“, Scientific American, Januar 1997 pp. 60 - 63
- [Kessen 67] W. Kessen, Sucking and Looking, „*Two organized congenial patterns of behavior in the human newborn*“, in H. W. Stevenson, *Early behavior: Comparative and developmental approaches*, John Wiley & Sons, New York, 1967
- [Klette 95] R. Klette, P. Zamperoni, „*Handbuch der Operatoren für die Bildverarbeitung*“, Vielweg Verlag Braunschweig, 1995
- [Kosa 95] U. Kosa, „*EDV für Sehgeschädigte*“, Deutscher Studien Verlag, Weinheim 1995
- [Koy-Oberthür 87] R. Koy-Oberthür, „*Ein Kontur-Wahrnehmungs-System für Blinde*“, VDI-Verlag, Düsseldorf (1987)
- [Loomis 91] J. M. Loomis, R. L. Katzky, S. J. Lederman, „*Similarity of tactual and visual picture recognition with limited view*“, *Preception* **20**, 1996, pp. 167 - 177
- [Loose 96] M. Loose, „*Layout und Test eines Systems adaptiver Photorezeptoren in analoger CMOS-Technologie*“, Diplomarbeit im Institut für Hochenergiephysik, Heidelberg, 1996
http://wwwasic.ihep.uni-heidelberg.de/asic/notes_german.html
- [Loose 98] M. Loose, K. Meier, J. Schemmel, „*CMOS image sensor with logarithmic response and self calibrating fixed pattern noise correction*“, „*International Symposium on Electronic Image Capture and Publishing - Advanced Focal Plane Array and Electronic Cameras*, T. Bernard, ed., Proc. SPIE 3410(1998)
- [MOVIS 95] B. Neumann, H. Kirschke, „*MOVIS - Anforderungen und Entwurf*“, persönliche Mitteilung
- [Perfetti 85] C. A. Perfetti, „*Reading ability*“, Oxford University Press, New York, 1985
- [Sampaio 98] E. Sampaio, Laboratoire de Psychologie du Développement, Université Louis Pasteur, Strasbourg, persönliche Mitteilungen

- [Schemmel 97] J. Schemmel, „*Design und Test einer Single-Chip Kamera mit integrierter Analog/Digital-Wandlung auf der Basis adaptiver Photorezeptoren*“, Diplomarbeit im Institut für Hochenergiephysik, Heidelberg, 1997
siehe auch http://wwwasic.ihep.uni-heidelberg.de/asic/notes_german.html
- [Schmidt 80] R.F. Schmidt, „*Grundrisse der Sinnesphysiologie*“, Springer Verlag Heidelberg, 4. Auflage 1980
- [Snodgrass 80] J. G. Snodgrass, M. A. Vanderwart, „*A standardized set of 260 pictures: Norms for name agreement, image agreement, familiarity, and visual complexity*“, *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, November 1980 pp. 174 - 215
- [Sonic 98] T. Heyes, Homepage, <http://ariel.ucl.ac.uk/~heyest/quest.ge.html>

Abbildungsverzeichnis

1.1	TVSS	5
1.2	Sonargaräte	6
1.3	Vorstellung des MOVIS-Projektes in der <i>expo2000</i>	7
1.4	<i>Optacon</i>	8
1.5	Der pneumatische Ausgabegürtel	9
2.1	Das <i>HTVSS</i> als Gesamtsystem	11
2.2	Das <i>VTD</i> und seine Funktionselemente	12
2.3	Die Kamera	14
3.1	Das <i>VTD</i> und seine mechanischen Komponenten im Maßstab 1 : 4	17
3.2	Linearführungen	18
3.3	Die Ausgabeeinheit im Maßstab 1 : 1	20
3.4	Abtastmatrix	21
3.5	Die Verteilung der verschiedenen Signalleitungen auf dem <i>VTD</i> .	23
3.6	Folienkabel	24
3.7	Mainboard	25
3.8	Schaltung für die Stromversorgung der Piezomodule	25
3.9	Aufnahmen der Rauschspannung	26
3.10	Schaltung für die LED und den Fototransistor des Nullpunktsensors.	27
3.11	<i>Sobelfilter</i>	31
3.12	<i>Morphologischer Kantenfilter</i>	32
3.13	<i>Pingpong-Modul</i>	34
3.14	<i>VTD-Out</i>	35
3.15	Ausschnitt aus einer aufgezeichneten Datei.	36
3.16	Darstellung des zeitlichen Ablaufes innerhalb des <i>Visor-Programmes</i> .	38
4.1	Vorbereitungs-Testreihe	43
4.2	Testreihe 2-5	44
4.3	Testreihe 6	44
4.4	Testreihe 7	44
4.5	Testreihe 8	45
4.6	Testreihe 9	45
4.7	Testreihe 10	45

4.8	Veranschaulichung der Cluster in den einzelnen <i>Ort-Zeit-Plots</i> und der Gewichtungsfaktoren $g_{\mu\nu}$ zur Schwerpunktsbestimmung.	52
4.9	Erkennungszeit und Geschwindigkeit über die Bilder 00–23 und 32–42	54
4.10	Vergleich die Aufenthaltsdauer in einem Cluster für das Bild 0014	55
4.11	Schwerpunkt der ausgegebenen Dots	57
4.12	Anzahl der ausgegebenen Dots	57
4.13	Vergleich der r -Werte	58
4.14	Erkennungszeit in der Testreihe 6	59
4.15	Erkennungszeit in der Testreihe 9	60
4.16	Augenbewegungen von zwei Kleinkindern bei in verschiedenen Positionen gezeigten Dreiecken	63
4.17	Ergebnisse bei der Messung über 16 Stunden	67
4.18	Verteilung der Interrupts innerhalb der Zeit	68
B.1	Datenbogen und Auswertungsbögen für Vorbereitung	76
B.2	Auswertungsbögen für Testreihe 1–2	77
B.3	Auswertungsbögen für Testreihe 3–4	78
B.4	Auswertungsbögen für Testreihe 5–6	79
B.5	Auswertungsbögen für Testreihe 7–8	80
B.6	Auswertungsbögen für Testreihe 9–10	81
C.1	Bilder der Vorbereitung und der Testreihe 2–10	84
D.1	Überblick über die Anzahl der richtig, falsch und nicht erkannten Bilder aller Testreihen bei allen Probanden	88
D.2	Überblick über die Anzahl der richtig, falsch und nicht erkannten Bilder aller Testreihen bei den sehenden und den blinden Probanden	89
D.3	Vergleich der Zeiten, die die sehenden Probanden benötigen, um die einzelnen Aufgaben zu lösen	90
D.4	Vergleich der Zeiten, die die blinden Probanden benötigen, um die einzelnen Aufgaben zu lösen	91
D.5	Detaillierte Überblick über die r -werte der blinden Probanden	92
E.1	Erkennungszeiten bei den einzelnen Bildern für die taktile Wahrnehmung	94
E.2	Vergleich der Erkennungszeit bei den beiden Gruppen	95
E.3	Vergleich der Geschwindigkeiten bei der Gruppe der Sehenden und der Gruppe der Blinden	95
E.4	Abhängigkeit zwischen der Geschwindigkeit und der Erkennungszeit im Vergleich der beiden Gruppen.	96
E.5	Vergleich des minimalen Abstandes bei der Gruppe der Sehenden und der Gruppe der Blinden	97
E.6	Vergleich der Zeit ohne Kontakt bei der Gruppe der Sehenden und der Gruppe der Blinden	98
E.7	Vergleich der Zeit ohne Kontakt beim Kreis	98

E.8	Vergleich der Zeit ohne Kontakt beim Kreuz	99
E.9	Vergleich der Zeit ohne Kontakt beim Dreieck	99
E.10	Vergleich der Leistungen bei wiederholter Darstellung von identischen und kongruenten Figuren	100
E.11	Leistungen der einzelnen Probanden bei der wiederholten Darstellung von identischen und kongruenten Figuren	101
E.12	Vergleich der Erkennungszeiten von allen identischen Bildern ohne Berücksichtigung der Richtigkeit der Antwort.	102
F.1	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden A Bild 0000–0011	104
F.2	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden A Bild 0012–0023	105
F.3	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden B Bild 0000–0011	106
F.4	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden B Bild 0012–0023	107
F.5	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden C Bild 0000–0011	108
F.6	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden C Bild 0012–0023	109
F.7	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden D Bild 0000–0011	110
F.8	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden D Bild 0012–0023	111
F.9	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden E Bild 0000–0011	112
F.10	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden E Bild 0011–0023	113
F.11	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden F Bild 0000–0011	114
F.12	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden F Bild 0011–0023	115
F.13	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden G Bild 0000–0011	116
F.14	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden G Bild 0011–0023	117
F.15	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden H Bild 0000–0011	118
F.16	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden H Bild 0011–0023	119
F.17	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden I Bild 0000–0011	120
F.18	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden I Bild 0011–0023	121
F.19	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden J Bild 0000–0011	122
F.20	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden I Bild 0011–0023	123
F.21	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden A Bild 0032–0042	124
F.22	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden B Bild 0032–0042	125
F.23	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden C Bild 0032–0042	126
F.24	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden D Bild 0032–0042	127
F.25	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden E Bild 0032–0042	128
F.26	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden F Bild 0032–0042	129
F.27	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden G Bild 0032–0042	130
F.28	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden H Bild 0032–0042	131
F.29	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden I Bild 0032–0042	132
F.30	<i>Weg-Zeit-Plots</i> des Probanden J Bild 0032–0042	133
G.1	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband A für die Testreihen 2–3	136
G.2	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband A für die Testreihen 4–5	137
G.3	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband B für die Testreihen 2–3	138

G.4	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband B für die Testreihen 4–5	139
G.5	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband C für die Testreihen 2–3	140
G.6	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband C für die Testreihen 4–5	141
G.7	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband D für die Testreihen 2–3	142
G.8	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband D für die Testreihen 4–5	143
G.9	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband E für die Testreihen 2–3	144
G.10	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband E für die Testreihen 4–5	145
G.11	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband F für die Testreihen 2–3	146
G.12	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband F für die Testreihen 4–5	147
G.13	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband G für die Testreihen 2–3	148
G.14	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband G für die Testreihen 4–5	149
G.15	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband H für die Testreihen 2–3	150
G.16	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband H für die Testreihen 4–5	151
G.17	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband I für die Testreihen 2–3	152
G.18	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband I für die Testreihen 4–5	153
G.19	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband J für die Testreihen 2–3	154
G.20	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband J für die Testreihen 4–5	155
G.21	Bilder 0000–0011 im Maßstab der <i>Ort-Zeit-Plots</i>	156
G.22	Bilder 0012–0023 im Maßstab der <i>Ort-Zeit-Plots</i>	157
G.23	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband A für die Testreihen 7–8	158
G.24	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband B für die Testreihen 7–8	159
G.25	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband C für die Testreihen 7–8	160
G.26	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband D für die Testreihen 7–8	161
G.27	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband E für die Testreihen 7–8	162
G.28	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband F für die Testreihen 7–8	163
G.29	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband G für die Testreihen 7–8	164
G.30	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband H für die Testreihen 7–8	165
G.31	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband I für die Testreihen 7–8	166
G.32	<i>Ort-Zeit-Plots</i> des Proband J für die Testreihen 7–8	167
G.33	Bilder 0032–0042 im Maßstab der <i>Ort-Zeit-Plots</i>	168

Tabellenverzeichnis

3.1	Steckerbelegung von Stecker P2, P3, P4	29
4.1	Zuordnung von identischen und kongruenten Figuren innerhalb der Testreihen.	46
A.1	Technische Daten des <i>VTD</i>	74
D.1	Antworten der Gruppe der Sehenden beim Erkennen der Figuren	86
D.2	Antworten der Gruppe der Blinden beim Erkennen der Figuren	87
E.1	Bilder für die Beobachtungen zur taktilen Wahrnehmung	93

Danke

Herzlichen Dank an alle, die zur Durchführung meiner Diplomarbeit beigetragen haben.

Besonders danken möchte ich:

- Herrn Prof. K. Meier für die Bereitstellung dieses sehr interessanten Themengebietes und die außergewöhnlich intensive Betreuung.
- Frau Prof. A. Blankenagel und ihrem Team für die wissenschaftliche Unterstützung bei der Durchführung der Testreihen, im Besonderen möchte ich hierbei Herrn I. Bruder danken, für die hilfreiche Unterstützung bei einigen Tests.
- Frau Prof. H. Weinleder für die fruchtbaren Diskussionen zur Entwicklung der Testreihen.
- Herrn Prof. J. Bille für die Übernahme des Zweitgutachtens.
- Den Schülern der Schloss-Schule-Ilvesheim für die interessierte Mitarbeit bei der Testdurchführung.
Herrn Direktor Schlipper und seinen Mitarbeitern für die schnelle und unkomplizierte Organisation des Testablaufes sowie auch Frau H. Born und Herrn R. Bernd, die mit ihren Anregungen weitere Impulse für das Projekt einbrachten.
- Allen Probanden, die verständlicherweise nicht mit Namen genannt werden können.
- Herrn Dr. M. Wunsch für die Lösung kniffligster \LaTeX Probleme.
- Herrn M. Keller für die vielfältigen und freundlichen Hilfestellungen bei allen Fragen bezüglich der Software-Infrastruktur.
- Herrn M. Loose und J. Schemmel für die Entwicklung einzelner Komponenten des *HTVSS* und der überaus zahlreichen Ideen bei der Entwicklung des *VTD* sowie bei der Auswertung der Testergebnisse.
- Herrn J. Langeheine mit dem ich manches langes Wochenende verbringen durfte und der mir während der Arbeit einer der wichtigsten Diskussionspartner war.
- Herrn U. Trunk und R. Achenbach für die zahlreichen informativen Gespräche.
- Allen Mitgliedern des ASIC-Labors für die angenehme Arbeitsatmosphäre.
- Ein extra Dankeschön an Frau B. Schneider und C. Schlindwein sowie Herrn T. Naegler und L. Schmidt-Mende für das sorgfältige Korrekturlesen des Manuskriptes.
- An meine Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben.

