



Automatische See-Through Kalibrierung

Lutz Prieße
Frank Schmitt
Paul Lemke

Nr. 7/2007

**Arbeitsberichte aus dem
Fachbereich Informatik**

Die Arbeitsberichte aus dem Fachbereich Informatik dienen der Darstellung vorläufiger Ergebnisse, die in der Regel noch für spätere Veröffentlichungen überarbeitet werden. Die Autoren sind deshalb für kritische Hinweise dankbar. Alle Rechte vorbehalten, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen – auch bei nur auszugsweiser Verwertung.

The “Arbeitsberichte aus dem Fachbereich Informatik“ comprise preliminary results which will usually be revised for subsequent publication. Critical comments are appreciated by the authors. All rights reserved. No part of this report may be reproduced by any means or translated.

Arbeitsberichte des Fachbereichs Informatik

ISSN (Print): 1864-0346

ISSN (Online): 1864-0850

Herausgeber / Edited by:

Der Dekan:
Prof. Dr. Paulus

Die Professoren des Fachbereichs:

Prof. Dr. Bátori, Jun.-Prof. Dr. Beckert, Prof. Dr. Burkhardt, Prof. Dr. Diller, Prof. Dr. Ebert, Prof. Dr. Furbach, Prof. Dr. Grimm, Prof. Dr. Hampe, Prof. Dr. Harbusch, Jun.-Prof. Dr. Hass, Prof. Dr. Krause, Prof. Dr. Lautenbach, Prof. Dr. Müller, Prof. Dr. Oppermann, Prof. Dr. Paulus, Prof. Dr. Priese, Prof. Dr. Rosentahl, Prof. Dr. Schubert, Prof. Dr. Staab, Prof. Dr. Steigner, Prof. Dr. Troitzsch, Priv.-Doz. Dr. von Kortzfleisch, Prof. Dr. Walsh, Prof. Dr. Wimmer, Prof. Dr. Zöbel

Kontakt Daten der Verfasser

Lutz Priese, Frank Schmitt, Paul Lemke
Institut für Computervisualistik
Fachbereich Informatik
Universität Koblenz-Landau
Universitätsstraße 1
D-56070 Koblenz
EMail: priese@uni-koblenz.de, fschmitt@uni-koblenz.de, lemke@uni-koblenz.de

Automatische See-Through Kalibrierung

Technical Report

Lutz Priese, Frank Schmitt, Paul Lemke

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	4
2	Szenario	5
3	Vorgehen zur Lösung der Aufgabenstellung	6
4	Eyetracking	7
5	Theoretische Zusammenhänge der Kameraverschiebungen	9
5.1	Relevante Größen	9
5.2	Berechnung des Bildwinkels	10
5.3	Horizontale Verschiebungen der Kamera	14
5.4	Vertikale Verschiebungen der Kamera	15
5.5	Verschiebungen der Kamera in der Z-Achse	15
5.6	Berücksichtigung von Augenbewegungen	17
5.7	Rotationen der Kamera	18
6	Versuchsaufbau	20
6.1	Stativ	20
6.2	Auge	20
6.3	Dioden	20
6.4	Maximale zulässige Bestrahlung	22
7	Experimente	23
7.1	Programme und Versuchsablauf	23
7.2	Verschiebung in der X-Achse	23
7.3	Verschiebung in der Z-Achse	24
7.4	Kombinierte Verschiebungen	24
A	Experimentelle Bestimmung des Bildwinkels	26
B	Beispiele analysierter Augenbilder	27
B.1	Künstliches Auge	27
B.2	Echtes Auge	28

C	Tabellarische Auflistung der Werte zu den Versuchsreihen	29
C.1	Legende	29
C.2	Messreihe 1	29
C.3	Messreihe 2	33
C.4	Messreihe 3	35
C.5	Messreihe 4	40
C.6	Messreihe 5	43
C.7	Messreihe 6	47

1 Aufgabenstellung

In Enhanced Reality Umgebungen nimmt der Betrachter die Umgebung und zusätzliche, in eine halbdurchsichtige Datenbrille eingeblendete Informationen wahr.

Das Kalibrierungsproblem der Datenbrille ist die Aufgabe, die eingeblendete Information mit dem korrekten realen Hintergrund zur Deckung zu bringen. Heutige Datenbrillen sind vergleichsweise klobig und schwer, deshalb kommt es häufig zu leichtem Verrutschen der Brille. Wird dieses Verrutschen nicht in die Position der Einblendung in der Brille einbezogen, so passt die Einblendung nicht mehr zum realen Hintergrund. Dies wird in Abbildung 1.1 exemplarisch dargestellt.



(a) Korrekte Einblendung

(b) Fehlerhafte Einblendung nach Verrutschen der Datenbrille

Abbildung 1.1: Virtuelles viertes Stockwerk eingeblendet in eine Datenbrille

Nach initialer Kalibrierung der teildurchsichtigen Datenbrille auf das Auge des Betrachters soll deshalb bei relativer Lageveränderung der Datenbrille zum Auge (durch leichtes Verrutschen) eine Re-Kalibrierung in Echtzeit automatisch erfolgen. Eine automatische Re-Kalibrierung bei Verrutschen wird von uns erstmalig erforscht.

2 Szenario

Um die Bewegung der Datenbrille relativ zum Auge zu berechnen wird das Auge mittels Infrarotdioden beleuchtet und mit einer Videokamera aufgenommen.

Wir gehen im folgenden davon aus, dass sowohl Dioden, als auch die Videokamera starr an der Datenbrille befestigt sind. Da wir also davon ausgehen, dass die Kamera starr an der Brille befestigt ist, entspricht eine Verrutschung der Brille einer Verschiebung der Kamera relativ zum Auge. Deshalb abstrahieren wir im folgenden und betrachten nur noch eine solche Verschiebung der Kamera relativ zum Auge.

Die verwendeten Dioden sind sehr klein und könnten problemlos am Brillenrand befestigt werden. Die momentan verwendete Kamera ist zwar relativ klein, zusammen mit dem verwendeten Objektiv aber immer noch zu schwer und klobig um ebenfalls am Brillenrand befestigt zu werden. In einem Prototypen könnte entweder eine Miniaturkamera verwendet werden, oder die Kamera könnte sich seitlich am Kopf befinden und das Auge mittels eines Spiegels filmen.

Es können theoretisch 6 Arten von Verschiebungen auftreten, 3 Translationen und 3 Rotationen:

- Verschiebungen nach links bzw. recht (Verschiebung in der X-Achse)
- Verschiebungen nach oben bzw. unten (Verschiebung in der Y-Achse)
- Verschiebungen nach vorne bzw. hinten (Verschiebung in der Z-Achse)
- Drehen nach oben/unten (Rotation über die X-Achse)
- Drehen nach links/rechts (Rotation über die Y-Achse)
- Drehen um die optische Achse (Rotation über die Z-Achse)

Dabei haben Verschiebungen in der X-/Y-Achse die größten Auswirkungen auf in der Datenbrille eingeblendete Informationen. Es wurde ein Versuchsaufbau konstruiert, mit dem das Verrutschen einer Brille in fünf der sechs Freiheitsgraden simuliert werden kann (siehe Abschnitt 6).

3 Vorgehen zur Lösung der Aufgabenstellung

Wir gehen davon aus, dass während der initialen Kalibrierung einmalig der genaue Abstand zwischen Brille und Auge bestimmt wird. Basierend auf diesem Abstand, der Größe der Iris im Videobild und den bekannten Parametern des Kamerasystems kann nun die reale Größe der Iris errechnet werden. Änderungen des Abstands zwischen Kamera und Auge werden über Beobachtung der Größe der Iris im Bild automatisch detektiert.

Nachdem somit der Abstand zwischen Kamera und Auge bekannt ist, kann mittels einfachen geometrischen Funktionen aus der Veränderung des Videoabbildes des Auges die Verrutschung der Kamera rückgerechnet werden.

Wenn sich die Blickrichtung des Benutzers im Vergleich zur initialen Kalibrierung nicht geändert hat, kann eine Verschiebung der Brille in der X- und Y-Achse über den Mittelpunkt der Pupille berechnet werden. Aus der Kenntnis des Vektors zwischen dem Pupillenmittelpunkt während der Kalibrierung und dem Pupillenmittelpunkt am aktuellen Zeitpunkt kann durch eine einfache lineare Gleichung die Verschiebung der Brille berechnet werden. Dazu muss jedoch der Abstand zwischen Brille und Auge bekannt sein.

Der Abstand zwischen Brille und Auge lässt sich über Messen der Größe der Iris im Bild berechnen. Im Gegensatz zur Pupille ist die Iris in ihrer Größe zwar von Mensch zu Mensch unterschiedlich, jedoch nicht variabel. Wurde also während der Kalibrierung der Zusammenhang zwischen Abstand der Brille (und somit der Kamera) und Irisgröße gemessen, kann über die Größe der Iris im aktuellen Bild der aktuelle Abstand zwischen Brille und Auge bestimmt werden.

4 Eyetracking

Für unser Verfahren ist eine stabile und echtzeitfähige Lokalisation des Auges im Videobild Voraussetzung. Wir verwenden das von Rainer Schian im Rahmen seiner Promotion entwickelte Verfahren (siehe [Sch99], [SBPP98], [SP97]), welches hier nur kurz vorgestellt werden soll. Der Algorithmus detektiert Iris, Pupille und Purkinje-Reflexe erster und vierter Ordnung im Bild.

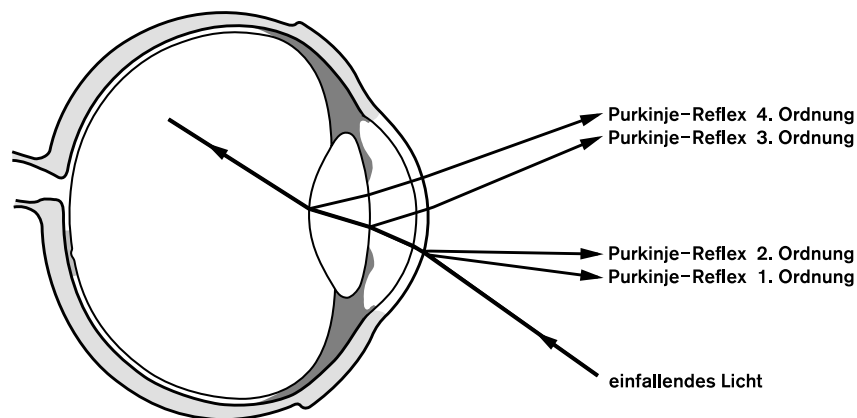


Abbildung 4.1: Die Spiegelbilder an den optischen Grenzflächen des Auges

Purkinje-Reflexe sind Reflexionen einfallenden Lichts an den optischen Grenzflächen des Auges. Von einer hellen punktförmigen Lichtquelle ist ein deutlich sichtbares Spiegelbild an der Hornhautoberfläche, der Purkinje-Reflex erster Ordnung, zu sehen (siehe Abbildung 4.1). An der Hornhaurückfläche entsteht eine weitere Spiegelung, der Purkinje-Reflex zweiter Ordnung, dieser wird jedoch von dem Reflex erster Ordnung verdeckt. An der Linsenvorderfläche entsteht ein diffuses Spiegelbild, der Purkinje-Reflex dritter Ordnung. Ein weiteres scharf abgegrenztes Spiegelbild ist von der Linsenrückfläche zu sehen, der Purkinje-Reflex vierter Ordnung. Er ist jedoch recht lichtschwach, etwa $1/100$ der Helligkeit des Purkinje-Reflexes erster Ordnung, und somit sehr schwer zu detektieren.

Wenn bei einem fest auf einen Punkt fixierten Auge die Lichtquelle bewegt wird, dann bewegt sich der Purkinje-Reflex erster Ordnung gleichsinnig mit. Der Purkinje-Reflex vierter Ordnung bewegt sich hingegen gegensinnig. Somit könnte eine Verschiebung einer Datenbrille über Beobachtung der Reflexe erster und vierter Ordnung detektiert werden. Da die Reflexe vierter Ordnung außerhalb von Laborbedingungen jedoch nicht zuverlässig gefunden werden können, werden im weiteren nur die Reflexe erster Ordnung verwendet (siehe Abschnitt 5.6).

Der Eyetracking-Algorithmus führt zunächst eine CSC-Segmentierung des in der Auflösung reduzierten Bildes durch. Innerhalb der generierten Segmente wird dann die Pupille gesucht.

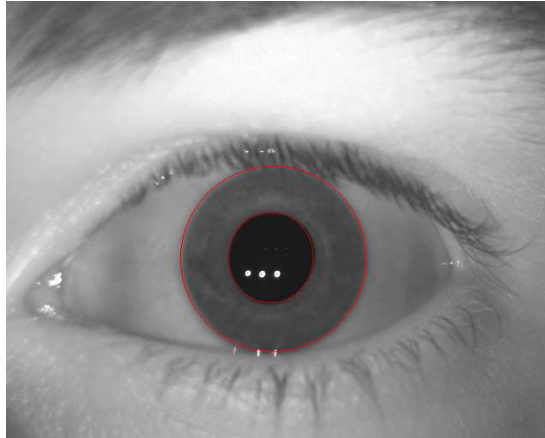


Abbildung 4.2: Auge mit detektierter Iris, Pupille und Purkine-Reflexen 1. und 4. Ordnung

Dieser erste Schritt ist kritisch für den Erfolg des ganzen Verfahrens, da eine fehlerhafte Pupillen-Groblokalisierung dazu führt, dass alle nachfolgenden Schritte ebenfalls scheitern.

Von allen CSC-Segmenten, deren mittlerer Grauwert unter einem Schwellwert liegt wird die Pixelzahl und der Freemancode bestimmt. Diese beiden Maße dienen zum Aussondern zu kleiner oder zu länglicher Segmente. Die übrig gebliebenen Segmente werden durch ein 24-Eck (Quattuorvigintieck) angenähert. Mit Hilfe dieses Polygons kann schnell die Kreisförmigkeit, die Dichte und der Abstand zum Mittelpunkt des Bildes eines Segments bestimmt werden. Es ergeben sich also insgesamt folgende Kriterien:

- Pixelzahl
- Helligkeit
- Länglichkeit
- Dichte
- Kreisförmigkeit
- Abstand zur Bildmitte

Das Segment, das in der Summe all dieser Merkmale am günstigsten bewertet wurde, wird als Pupille angesehen.

Als nächstes wird ausgehend von der grob bestimmten Pupillenposition nach optimalen Randpunkten der Pupille gesucht. Aus diesen wird dann eine die Pupille approximierende Ellipse gebildet. Über vom Mittelpunkt der gefundenen Pupille ausgehende Suchstrahlen werden dann optimale Randpunkte der Iris gesucht und durch einen Kreis approximiert.

Die Lokalisierung der Purkinje-Reflexe erfolgt über spezielle Filtermasken (19x19 für die Reflexe erster Ordnung, 7x7 für die Reflexe 4. Ordnung), die an solchen Stellen des Bildes hohe Werte liefern, an denen helle Kreise passender Größe auf dunklem Grund existieren. Der Filter wird nur innerhalb des detektierten Auges angewendet.

5 Theoretische Zusammenhänge der Kameraverschiebungen

5.1 Relevante Größen

Für die folgenden theoretischen Überlegungen sind folgende Größen relevant:

- Der horizontale (α) und vertikale (β) Bildwinkel des Kamerasystems (Der Bildwinkel einer Kamera ist die Größe des Feldes, das vom Objektiv auf den Film bzw den Chip abgebildet wird. Er hängt ab vom Objektiv, der Chipgröße der Kamera und der Fokusebene)
- Die Auflösung der Kamera ¹ in X- und Y-Richtung in Pixeln (konstant und aus Datenblatt bekannt: 1380x1024 Pixel)
- Die Brennweite f des Objektivs ² (konstant und aus Datenblatt bekannt: 25 mm)
- Die Größe des Bildaufnahme-Chips der Kamera (konstant und aus Datenblatt bekannt: 8,8x6,6 mm)
- Die Entfernung der Kamera zum Auge (d) und davon abhängig die Fokusebene der Kamera (variabel)
- Die Größe des Auges in der Welt (Irisgröße konstant, aber bei jedem Probanden unterschiedlich, Pupillengröße abhängig von Beleuchtung)
- Die Verschiebung der Kamera ($\Delta x_w, \Delta y_w, \Delta z_w$) in der Welt
- Die Verschiebung des Auges ($\Delta x_b, \Delta y_b$) im Bild

Die im folgenden verwendeten Zusammenhänge zwischen diesen Größen sind allgemein bekannt und gehen auf einfache geometrische Zusammenhänge zurück. Herleitungen sind zum Beispiel in [Hec87] nachzulesen.

Grundsätzlich zu beachten ist auch die Verzerrung des Objektivs. Diese wird im folgenden vernachlässigt, muss jedoch entweder aus dem Bild entfernt werden (entzerren) oder in die Berechnungen einfließen.

Es wurde bereits mit Hilfe von Routinen aus der OpenCV-Bibliothek ein Modul geschrieben, das die Parameter der Verzerrung der Kamera bestimmen und die Bilder der Kamera gemäß diesen Parametern entzerren kann. Die Verzerrung teilt sich auf in radiale und tangentielle Verzerrung, die durch jeweils zwei Parameter repräsentiert werden können. Für unsere Kamera ergibt sich die Parametermatrix $[-0.560232, 2.28844, -0.0113217, -0.00567525]$ wobei die ersten zwei Spalten der Matrix die radiale und die letzten zwei Spalten die tangentielle Verzerrung repräsentieren.

¹Prosilica EC 1380

²Pentax B2514D(TH)

5.2 Berechnung des Bildwinkels

Um Verschiebungen im Bild in Relation mit Verschiebungen in der Welt setzen zu können müssen horizontaler und vertikaler Bildwinkel bekannt sein. In den meisten Lehrbüchern zur Fotografie werden zur Berechnung des horizontalen und vertikalen Bildwinkels einfache trigonometrische Zusammenhänge des Lochkammermodells verwendet. (siehe Abbildung 5.1 und 5.2).

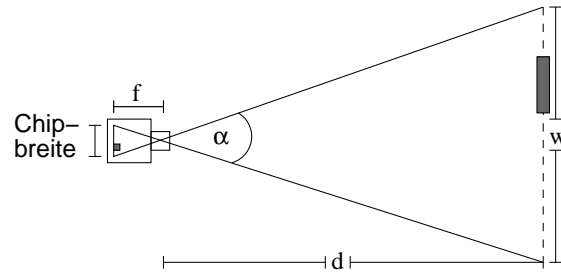


Abbildung 5.1: Bildentstehung im Lochkammermodell (Aufsicht)

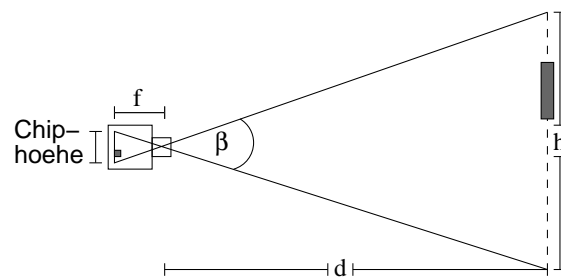


Abbildung 5.2: Bildentstehung im Lochkammermodell (Seitenansicht)

Entsprechend obigem Modell kann der Bildwinkel über die Brennweite f und die Chipgröße bestimmt werden:

$$\tan\left(\frac{1}{2}\alpha\right) = \frac{\text{Chipbreite}}{2 * f} = \frac{8.8\text{mm}}{2 * 25\text{mm}} \iff \alpha = 19,96^\circ \quad (5.1)$$

$$\tan\left(\frac{1}{2}\beta\right) = \frac{\text{Chiphöhe}}{2 * f} = \frac{6.6\text{mm}}{2 * 25\text{mm}} \iff \beta = 15,04^\circ \quad (5.2)$$

In diese Berechnung fließt die Fokusebene nicht ein, d.h. laut diesem Modell bleibt der Bildwinkel gleich, unabhängig davon ob auf Objekte fokussiert wird, die sich sehr nah an der Kamera befinden, oder ob der Fokus des Objektivs auf Unendlich gestellt wird. In der Realität lässt sich jedoch feststellen, dass der sichtbare Ausschnitt der Welt kleiner wird, je kürzer der Fokus wird. Verkürzt gesagt: Je Makro desto Tele. Somit erreicht die Berechnung des Bildwinkels über obige Formeln nicht die für unsere Anwendung nötige Genauigkeit.

In einem zweiten Schritt wurde versucht den Öffnungswinkel experimentell zu bestimmen. Hierzu muss für eine Entfernung d bekannt sein, wie groß (in Weltkoordinaten) die horizontale bzw vertikale Ausdehnung des von der Kamera aufgenommenen Bildes (w in 5.1 bzw h in 5.2) ist. Der Bildwinkel ergibt sich durch:

$$\tan\left(\frac{1}{2}\alpha\right) = \frac{w}{2d} \quad (5.3)$$

$$\tan\left(\frac{1}{2}\beta\right) = \frac{h}{2d} \quad (5.4)$$

Dieses Vorgehen führt aber nur bei großen Werten für d zu genauen Ergebnissen, da bei kleinen Entfernungen Messfehler das Ergebnis stark verfälschen. Eine Bestimmung von d in der nötigen Genauigkeit ist nicht möglich, da weder die optische Hauptebene des Objektivs noch w bzw. h genau genug bestimmt werden können. In Anhang A wird der Versuchsaufbau und ein Ergebnis der experimentellen Bestimmung des Bildwinkels beschrieben.

Zur korrekten Bestimmung des Bildwinkels muss auf ein wirklichkeitsgetreues Modell der Bildaufnahme zurückgegriffen werden. Ein solches ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

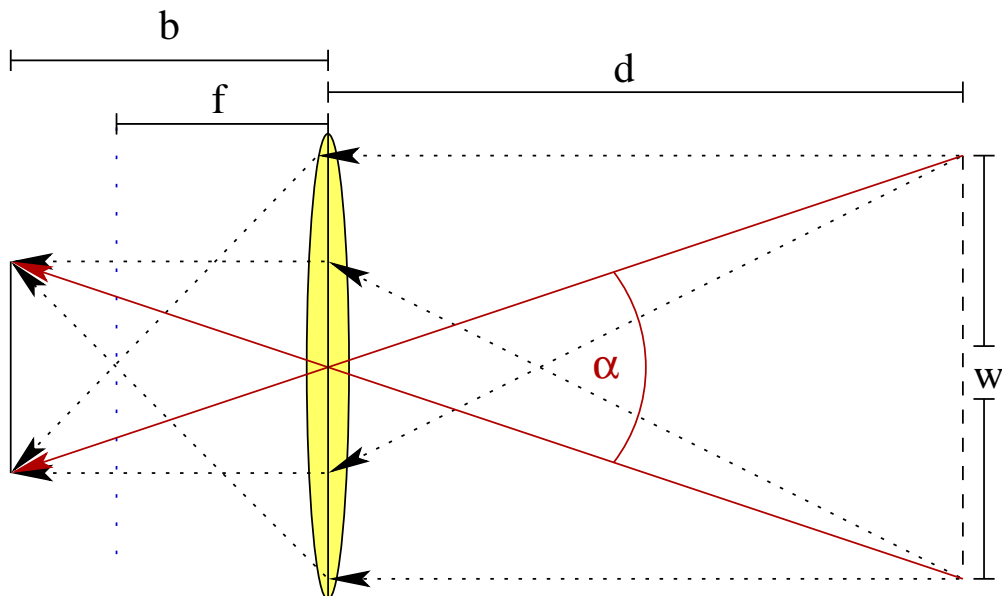


Abbildung 5.3: Bildentstehung im Thin-Lense-Modell (Aufsicht)

Die von dem aufgenommenen Objekt ausgesendeten Strahlen werden in der Linse gebrochen und auf den Bildaufnahme-Chip geleitet. Damit ein Punkt scharf erscheint müssen alle von ihm ausgehenden Lichtstrahlen auf die selbe Position im Chip gelenkt werden. Da das Linsensystem eines Festbrennweiten-Objektivs starr ist, wird zur Fokussierung naher Objekte das Objektiv vom Chip weg verschoben (b wird vergrößert), bei Fokussierung weit entfernter Objekte wird das Objektiv hin zum Chip verschoben (b wird verkleinert).

Auch in diesem Modell lässt sich der Bildwinkel einfach über den Tangens bestimmen. Es ergibt sich:

$$\tan\left(\frac{1}{2}\alpha\right) = \frac{\text{Chipbreite}}{2 * b} \quad (5.5)$$

$$\tan\left(\frac{1}{2}\beta\right) = \frac{\text{Chiphöhe}}{2 * b} \quad (5.6)$$

Wird im Objektiv der Fokus auf Unendlich eingestellt entspricht b genau der Brennweite f . In dem Fall entsprechen die im Lochkammermodell gewonnenen Zusammenhänge aus Formel 5.1 und 5.2 der Realität.

Die Entfernung zwischen Linsenebene und Chip b lässt sich mittels der Abbildungsgleichung (auch Linsengleichung) berechnen:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{b} \quad (5.7)$$

aufgelöst nach b ergibt sich:

$$b = \frac{f * d}{d - f} \quad (5.8)$$

Dies kann nun in Formel 5.5 und 5.6 eingesetzt werden:

$$\tan\left(\frac{1}{2}\alpha\right) = \frac{\text{Chipbreite}}{2 * \frac{f*d}{d-f}} \quad (5.9)$$

$$\tan\left(\frac{1}{2}\beta\right) = \frac{\text{Chiphöhe}}{2 * \frac{f*d}{d-f}} \quad (5.10)$$

Der Bildwinkel kann jetzt als Funktion mit Parameter d , also der Objektdistanz aufgefasst werden:

$$\alpha(d) = 2 * \arctan\left(\frac{\text{Chipbreite} * (d - f)}{2 * f * d}\right) \quad (5.11)$$

$$\beta(d) = 2 * \arctan\left(\frac{\text{Chiphöhe} * (d - f)}{2 * f * d}\right) \quad (5.12)$$

Für unsere Kamera ergibt sich:

$$\alpha(d) = 2 * \arctan\left(\frac{8.8 \text{ mm} * (d - 25 \text{ mm})}{50 \text{ mm} * d}\right) = 2 * \arctan\left(\frac{4.4}{25} - \frac{4.4 \text{ mm}}{d}\right) \quad (5.13)$$

$$\beta(d) = 2 * \arctan\left(\frac{6.6 \text{ mm} * (d - 25 \text{ mm})}{50 \text{ mm} * d}\right) = 2 * \arctan\left(\frac{3.3}{25} - \frac{3.3 \text{ mm}}{d}\right) \quad (5.14)$$

Abbildung 5.4 stellt den horizontalen Bildwinkel in Abhängigkeit von der Entfernung zum fokussierten Objekt dar, Abbildung 5.5 den vertikalen Bildwinkel.

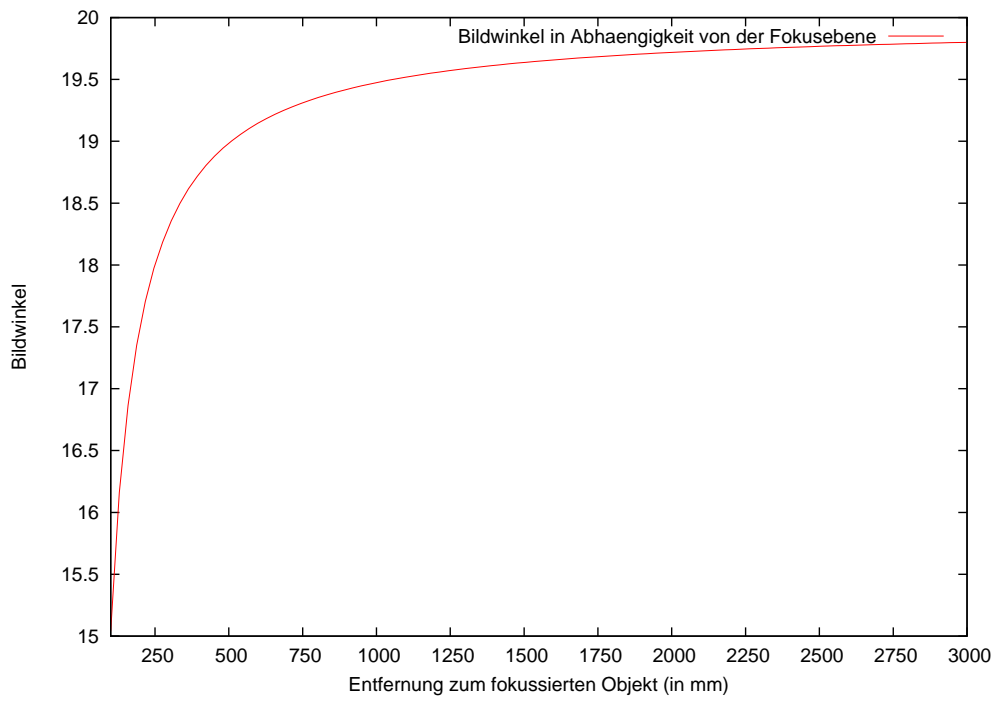


Abbildung 5.4: Horizontaler Blickwinkel $\alpha(d)$

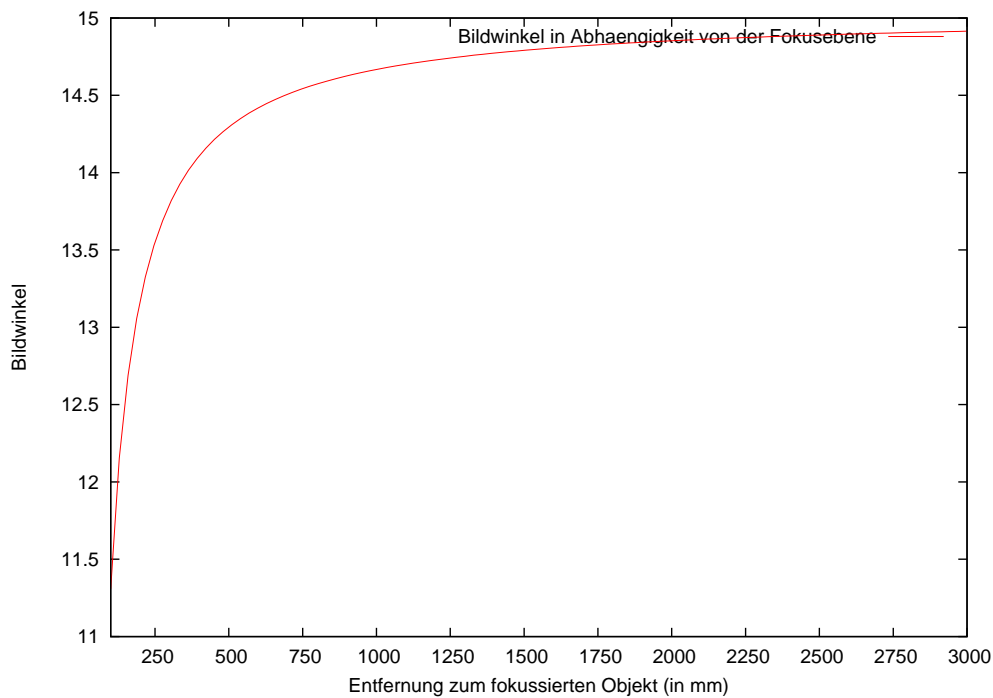


Abbildung 5.5: Vertikaler Blickwinkel $\beta(d)$

5.3 Horizontale Verschiebungen der Kamera

Die horizontale Ausdehnung w des von der Kamera aufgenommenen Bildes der Welt (siehe Abbildung 5.1) lässt sich in Abhängigkeit von der Entfernung d und dem horizontalen Bildwinkel $\alpha(d)$ wie folgt ausdrücken (einfache Umformung von Gleichung 5.3):

$$w = 2 * \tan\left(\frac{1}{2}\alpha(d)\right) * d = 2 * \left(\frac{4.4}{25} - \frac{4.4 \text{ mm}}{d}\right) * d = \frac{8.8 * d}{25} - 8.8 \text{ mm} \quad (5.15)$$

Das Verhältnis zwischen einer horizontalen Verschiebung in der Welt Δx_w und der horizontalen Ausdehnung des Bildausschnitts in der Welt w ist das selbe wie zwischen der Verschiebung im Bild Δx_b und der horizontalen Auflösung der Kamera (in unserem Fall 1360 Pixel).

$$\frac{\Delta x_b}{1360 \text{ Pixel}} = \frac{\Delta x_w}{w} \quad (5.16)$$

$$= \frac{\Delta x_w}{\frac{8.8*d}{25} - 8.8 \text{ mm}} \quad (5.17)$$

$$= \frac{25 * \Delta x_w}{8.8 * d - 220 \text{ mm}} \quad (5.18)$$

Die Verschiebung im Bild relativ zur Verschiebung in der Welt ergibt sich somit als

$$\Delta x_b = 1360 \text{ Pixel} * \frac{25 * \Delta x_w}{8.8 * d - 220 \text{ mm}} \quad (5.19)$$

$$= \frac{3863.63 \text{ Pixel} * \Delta x_w}{d - 25 \text{ mm}} \quad (5.20)$$

5.4 Vertikale Verschiebungen der Kamera

Die Berechnung von vertikalen Verschiebungen verläuft analog, es muss lediglich der vertikale Bildwinkel β und die vertikale Auflösung (in unserem Fall 1024 Pixel) verwendet werden.

Es ergibt sich die zu 5.20 äquivalente Formel:

$$\Delta y_b = 1024 \text{ Pixel} * \frac{25 * \Delta y_w}{6.6 * d - 165 \text{ mm}} \quad (5.21)$$

$$= \frac{3878.78 \text{ Pixel} * \Delta y_w}{d - 25 \text{ mm}} \quad (5.22)$$

Mittelt man 5.20 und 5.22 so erhält man:

$$\Delta B = \frac{3871.2 \text{ Pixel} * \Delta W}{d - 25 \text{ mm}} \quad (5.23)$$

5.5 Verschiebungen der Kamera in der Z-Achse

Bei einer Verschiebung der Kamera in der Z-Achse wird das Auge im Bild kleiner bzw größer. Hier können wieder die bekannten Zusammenhänge genutzt werden. Wird ein Kreis mit Radius r_w aufgenommen und auf einen Kreis mit dem Radius r_b abgebildet, so ergibt sich der Abstand zwischen aufgenommenem Objekt und Kamera d als:

$$d = \frac{3871,2 \text{ Pixel} * r_w}{r_b} + 25 \text{ mm} \quad (5.24)$$

Formel 5.24 entsteht aus Formel 5.23 durch Auflösen nach d , dabei wird die Verschiebung in der Welt ΔW durch den Radius der Iris in der Welt r_w und die Verschiebung im Bild ΔB durch den Radius der Iris im Bild r_b ersetzt.

Die Differenz zweier Abstände beschreibt dann die Verschiebung:

$$\Delta d = d_1 - d_2 \quad (5.25)$$

$$= \frac{3871,2 \text{ Pixel} * r_{w1}}{r_{b1}} + 25 \text{ mm} - \left(\frac{3871,2 \text{ Pixel} * r_{w2}}{r_{b2}} + 25 \text{ mm} \right) \quad (5.26)$$

$$= 3871,2 \text{ Pixel} * \left(\frac{r_{w1}}{r_{b1}} - \frac{r_{w2}}{r_{b2}} \right) \quad (5.27)$$

Da der Radius der Iris in der Welt als konstant betrachtet werden kann ergibt sich:

$$\Delta d = 3871,2 \text{ Pixel} * r_w * \left(\frac{1}{r_{b1}} - \frac{1}{r_{b2}} \right) \quad (5.28)$$

Die Iris eines Erwachsenen hat einen Radius von etwa 6 mm. Bei einem Abstand von 150 mm zur Kamera ergibt sich für ihren Radius im Bild 185.45 Pixel. Wird die Kamera um einen Zentimeter nach vorne verschoben ergibt sich 201.58 Pixel, das heißt selbst relativ große Verschiebungen in der Z-Achse haben nur relativ geringe Auswirkungen auf die Größe im Bild.

Erst wenn der Abstand zwischen Kamera und Auge verringert wird steigen die Auswirkungen von Verschiebungen in der Z-Achse. Bei einem Abstand der Kamera von 7 Zentimetern zum Auge ist der Radius des Auges 515.15 Pixel, eine Verschiebung um 5 Millimeter nach hinten führt zu einem Radius von 463.64 Pixel.

Abbildung 5.6 stellt die Größe der Iris im Bild in Abhängigkeit der Entfernung des Auges zur Kamera dar.

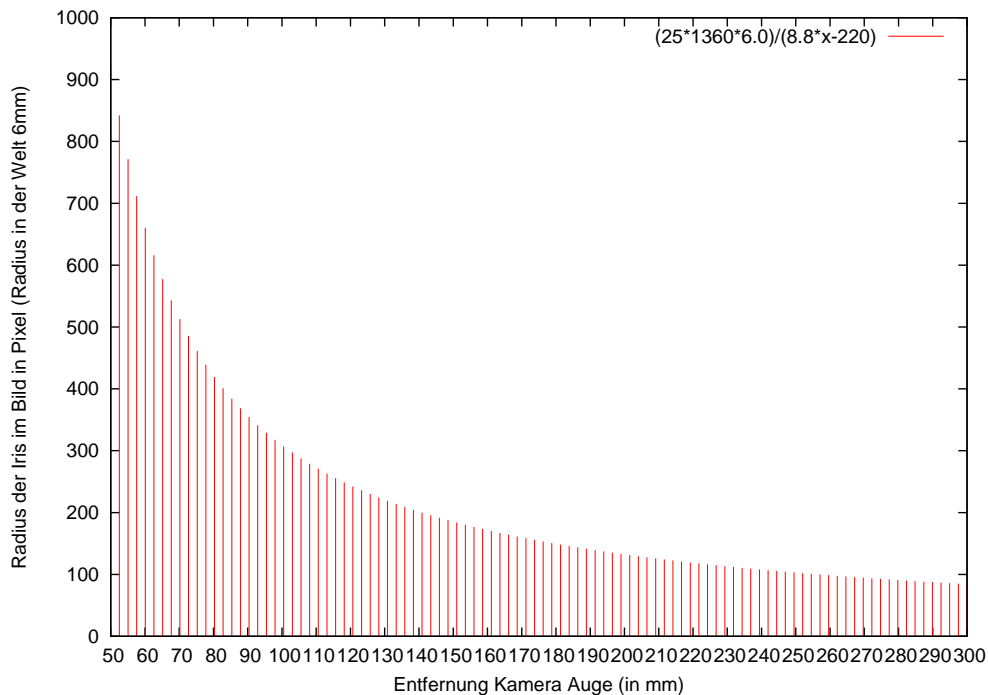


Abbildung 5.6: Groesse einer Iris mit Radius 6mm im Bild in Abhängigkeit von der Entfernung zur Kamera

Es lässt sich erkennen, dass nur dann, wenn der Abstand zwischen Kamera und Auge sehr klein ist, Verschiebungen um wenige Millimeter in der Z-Achse Auswirkungen in einer sicher detektierbaren Größenordnung haben. Bei einem Abstand zwischen Kamera und Auge von etwa 15-20 cm jedoch kann der während der Kalibrierung gemessene Abstand nur grob aktualisiert werden. Es gilt also, dass die Genauigkeit der Bestimmung von Verschiebungen in der Z-Achse (in mm) zwischen Auge und Kamera umgekehrt proportional zum Ausgangsabstand ist.

Dies ist jedoch nicht problematisch, da in dem Maße in dem es schwieriger wird Verschiebungen in der Z-Achse zu berechnen auch ihre Auswirkungen sinken. Generell gilt für unser System, dass ein Fehler in der Abstandsschätzung von x Prozent zu einem Fehler in der Berech-

nung von Verschiebungen in der X-/Y-Ebene von $2 \cdot x$ Prozent führt, d.h. nur der relative, nicht der absolute Fehler ist interessant.

Abbildung 5.7 verdeutlicht den Zusammenhang an einem Beispiel. Hierbei wurde ein Fehler der Abstandsberechnung von 10mm angenommen. Abhängig vom echten Abstand führt dies bei der Berechnung einer Verschiebung in der X-/Y-Ebene zu einem relativen Fehler der sich erst bei geringem absolutem Abstand gravierend bemerkbar macht.

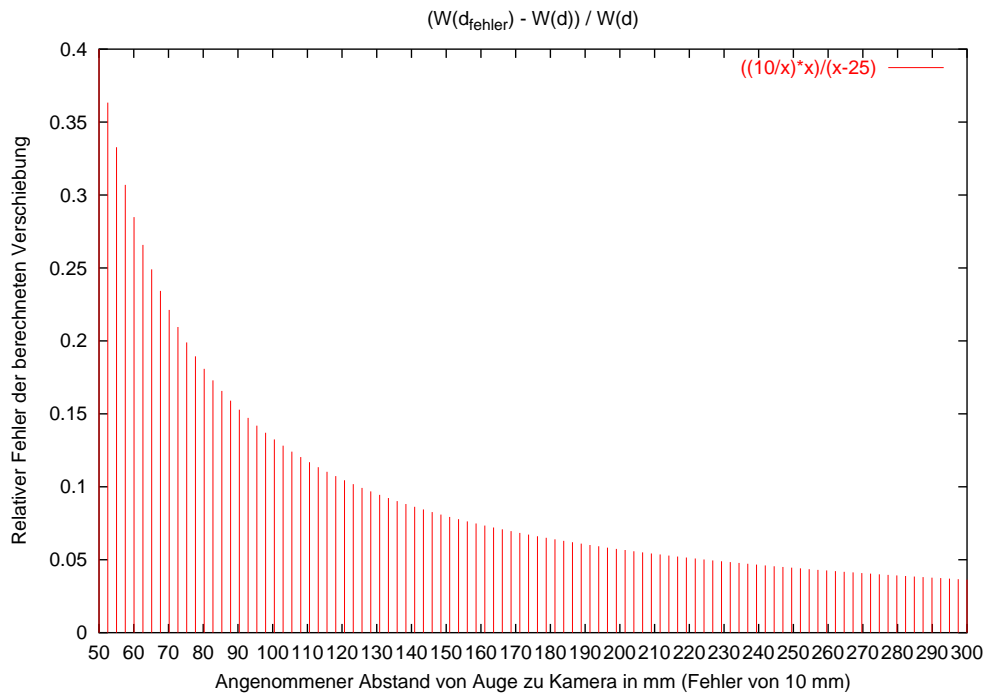


Abbildung 5.7: Beispiel zum Zusammenhang zwischen relativer Abweichung und relativem Fehler

5.6 Berücksichtigung von Augenbewegungen

Die bisher behandelten Verschiebungen gehen von einem starren Auge aus, der Anwender müsste also während der Messungen in die gleiche Richtung schauen. Für den vorgesehenem Anwendungsfall wäre es vorteilhaft, wenn Änderungen in der Blickrichtung des Benutzers in der automatischen Re-Kalibrierung toleriert würden.

Um die Augenbewegungen des Nutzers von einer Verschiebung der Kamera zu unterscheiden können die Purkinje Reflexe erster Ordnung verwendet werden. In unserem Versuchsaufbau werden hierzu Infrarotdioden verwendet.

Bei einer Rotation des Auges bewegen sich die Purkinje-Reflexe erster Ordnung im Bild etwa um die Hälfte langsamer als Iris und Pupille.

Dieser Zusammenhang lässt sich in Versuchen bestätigen. So wurde bei unbewegter Kamera und konstant gehaltenem Kopf die Blickrichtung um rund 28° in der Horizontalen verändert. Als Ergebnis wurde eine Verschiebung der Iris im Bild von 104.4 Pixel gemessen, die Verschiebung der Reflexe betrug lediglich 59.9 Pixel.

Es ist also möglich die Bewegungen des Auges als solche zu erkennen und damit von Bewegungen der Kamera zu unterscheiden.

5.7 Rotationen der Kamera

Rotationen über die X- und Y-Achse können nach Rücksprache mit der Computergraphik vernachlässigt werden, da sie nur geringe Auswirkungen auf die Einblendungen in der Datenbrille haben. Rotationen über die Z-Achse müssen jedoch detektiert werden, die Arbeiten hieran sind allerdings noch nicht abgeschlossen.

Um eine Rotation über die Z-Achse detektieren zu können, muss eine Gerade im Auge detektiert werden. Sind beide Augen im Videobild sichtbar oder existieren zwei Kameras, die jeweils ein Auge aufnehmen, kann diese Gerade trivial mit Hilfe der beiden schon lokalisierten Irismitelpunkte bestimmt werden.

Ist jedoch nur das Abbild eines Auges verfügbar, so existieren keine einfach lokalisierbaren anatomischen Strukturen, mit deren Hilfe eine stabile Gerade im Auge detektiert werden kann. In einem ersten Versuch wurde die Hauptachse der die Pupille approximierenden Ellipse zur Bestimmung der Rotation herangezogen, diese ist jedoch sehr ungenau, da die Pupille fast kreisförmig ist. Abbildung 5.8 zeigt den gemessenen Winkel zwischen der Hauptachse der die Pupille approximierenden Ellipse und der X-Achse im Bild über eine Bildserie, in der weder Kamera noch Auge bewegt wurden (die Werte wurden der Messreihe 3, Serie 1 entnommen, siehe Anhang C.4). Die gemessenen Werte streuen in einem Bereich von etwa $+2$ Grad bis etwa -40 Grad mit einer Varianz von etwa 65 Grad und sind auf Grund dieser Ungenauigkeit für unseren Einsatzzweck unbrauchbar.

Im Rahmen einer laufenden Studienarbeit wird ein anderer Ansatz untersucht, dabei werden die Augenwinkel (d.h. die Grenze zwischen Auge und Gesichtshaut) im Bild automatisch detektiert und die Gerade durch die beiden Augenwinkel zur Bestimmung der Rotation herangezogen. Diese Aufgabe ist jedoch nicht trivial, da die Augenwinkel nicht scharf abgegrenzt sind. Ansätze die in der Arbeit untersucht werden finden sich in [YDS01], [ZY02] und [VD03].

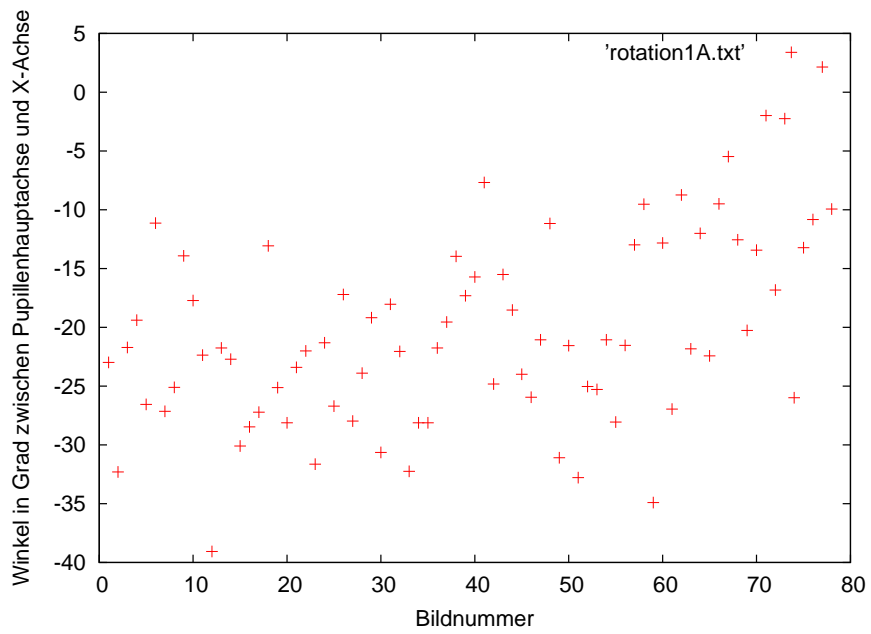


Abbildung 5.8: Messung des Winkels zwischen Pupillenhauptachse und X-Achse im Bild, Werte aus Messreihe 3, Serie 1, siehe Anhang C.4

6 Versuchsaufbau

6.1 Stativ

Die von uns konstruierte Kamerahalterung erlaubt es die Kamera beliebig im Raum zu verschieben. Verschiebungen in der X- und Z-Achse können über Gewindestäbe sehr genau eingestellt werden. Dabei entspricht eine Drehung der Kurbel einer Verschiebung von einem Millimeter. Zusätzlich sind noch Drehungen über die X- und Y-Achse möglich. Somit können fünf von sechs möglichen Freiheitsgraden verändert werden.

6.2 Auge

Für die Messungen wurde zunächst kein echtes Auge aufgenommen sondern ein Papierausdruck eines Photos eines Auges, da es nicht möglich ist ein echtes Auge perfekt ruhig zu halten. Aufnahmen mit echten Augen wurden jedoch nachfolgend ebenfalls durchgeführt um sicherzustellen, dass die Methode dort ebenfalls anwendbar ist.

6.3 Dioden

Zunächst wurden Lumineszenzdioden des Typs SFH 480-2/3 der Firma Osram verwendet, die Infrarotlicht im Wellenbereich von 880nm abstrahlen. Diese besitzen laut Datenblatt einen Durchlassspannung von 1,5V und werden bei einer Stromstärke von 100mA betrieben, wobei die Stromquelle eine Spannung von 3V liefert. Somit müssen bei einer einzelnen Diode 1,5V auf einen Vorwiderstand entfallen. Dieser hätte somit 15Ω . Dem Schian-Algorithmus entsprechend werden auf einer Platine drei dieser Dioden parallel geschaltet, so dass sich für den Gesamtwiderstand 5Ω ergeben.

In Versuchen zeigte sich jedoch, dass diese Dioden einen zu kleinen Abstrahlwinkel besitzen, so dass sie keine ausreichende Ausleuchtung des gesamten Auges und seiner Umgebung erzielen. Außerdem war bereits das Abbild der Reflexionen 1. Ordnung der Dioden auf dem Auge zu klein. Aus diesem Grund werden inzwischen sehr kleine SMD-Dioden vom Typ SFH 4258 eingesetzt, die sehr hell strahlen und dabei einen vergleichsweise hohen Abstrahlwinkel besitzen. Um die Infrarotbestrahlung des Auges zu verringern werden die Dioden nur während der Belichtungszeit der Kamera angeschaltet (Pulsbetrieb). Dazu werden die Dioden über USB mittels des Bausteins IO Warrior 40 und einem PNP-Transistor (Low Noise Transistor PNP Silicon BC559) angesteuert. (Siehe Schaltplan in Abbildung 6.1)

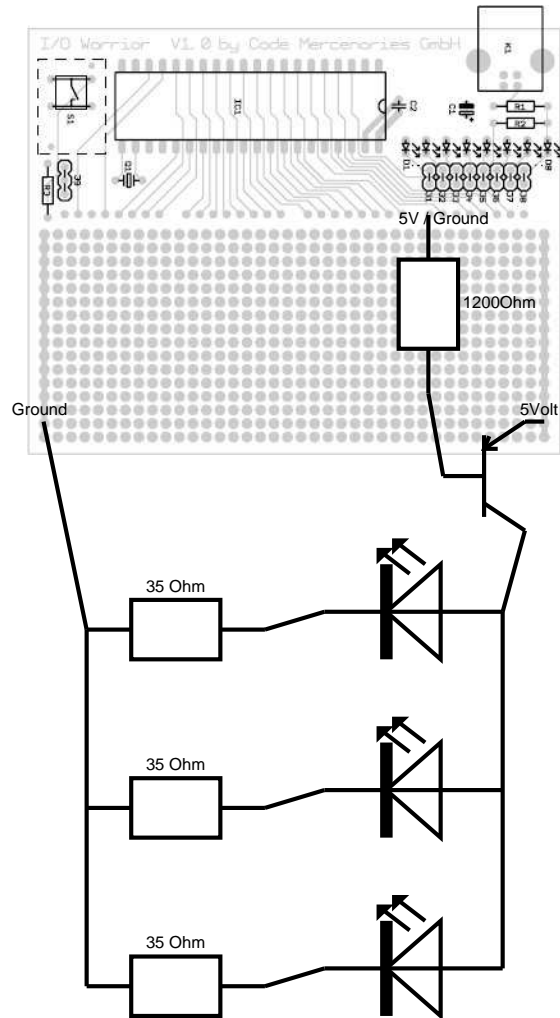


Abbildung 6.1: Schaltplan der Infrarotbeleuchtung

6.4 Maximale zulässige Bestrahlung

Die verwendeten Dioden strahlen Infrarotlicht einer Wellenlänge von 850nm aus. Diese Wellenlänge kann vom Menschen nicht wahrgenommen werden. Das heißt, dass die natürlichen Schutzmechanismen wie Adaption versagen. Daher ist es notwendig eine eventuelle Schädigung des Auges durch zu starke Bestrahlung bei unserem Versuchsaufbau auszuschließen.

Als Grundlage zur Bestimmung der Bestrahlungsgrenzen dient die BGV B2 Laserstrahlung ([bgv]). Für eine Wellenlänge von 850nm und einer Emissionsdauer zwischen $1,8 * 10^{-5}$ s und $1 * 10^3$ s ergibt sich bei direkter Einstrahlung des Lichts ins Auge die Maximale zulässige Bestrahlung (MZB) aus der Formel:

$$MZB(t) = 18 * 10^{0.3} * \frac{(t \frac{1}{s})^{0.75}}{t} * \frac{J}{m^2} \quad (6.1)$$

Damit ergibt sich für $t = 1 * 10^{-1}$ s, was der maximalen Belichtungszeit entspricht,

$$MZB(1 * 10^{-1} s) = 63,87 \frac{W}{m^2} \quad (6.2)$$

Nach den Angaben des Datenblattes haben die Dioden bei einem Betrieb mit 100mA eine maximale Strahlstärke vom $125 \frac{mw}{sr}$. Da bei unserem Aufbau von einem minimalem Abstand zwischen Auge und Dioden von 15cm ausgegangen werden kann erhält man also eine Bestrahlung von $5,5 \frac{W}{m^2}$. Berücksichtigt man, dass 3 Dioden verwendet werden erhält man $16,6 \frac{W}{m^2}$.

Grenzwertig wäre also eine direkte Dauerbestrahlung über eine Zeitdauer von 20s, die aufgrund des Pulsbetriebs in unserem Versuchsaufbau nie erreicht werden kann.

$$MZB(20s) = 16,98 \frac{W}{m^2} \quad (6.3)$$

7 Experimente

7.1 Programme und Versuchsablauf

In den folgenden Versuchen wurde das Plugin-Framework der Arbeitsgruppe Priese verwendet um die Bilder der Kamera zu grabben und die entwickelten Algorithmen auszuführen.

Die Bilder werden aus der Kamera ausgelesen und auf die Größe 768*512 Pixel beschnitten (nicht skaliert, darum muss weiterhin mit der Originalauflösung 1380*1024 gerechnet werden). Dann werden Iris, Pupille und Reflexe in den Bildern detektiert.

Per Tastendruck lässt sich eine Messreihe starten, in der die gefundenen Werte für den Mittelpunkt und den Radius der Iris, Pupille und den Purkinje Reflexen ersten und vierter Ordnung gemittelt werden. Der aktuelle Mittelwert sowie die aktuelle Varianz wird in einem Fenster ausgegeben. Zur visuellen Kontrolle des Eyetrackings wird zusätzlich das aktuelle Kamerabild ausgegeben, in ihm werden Iris und Pupille wie sie vom Programm detektiert wurden durch eine Umrandung dargestellt markiert. Nach einem zweiten Tastendruck wird eine zweite Messreihe gestartet, in der wiederum über einige Bilder die Positionen der Merkmale im Bild gemittelt werden. Anschließend wird aus den Veränderungen zwischen den beiden Messreihen die Verschiebung der Kamera relativ zum aufgenommenem Auge berechnet und ausgegeben.

Im Anhang, Abschnitt B finden sich typische Eingabebilder sowohl ohne Verarbeitung, als auch mit detektierter Iris und Pupille.

7.2 Verschiebung in der X-Achse

Im Abstand von 235 mm von der Kamera wurde ein Photo eines menschlichen Auges platziert. Dabei wurde der Abstand zwischen Vorderkante des Objektivgehäuse und dem Photo gemessen und 30 Millimeter addiert um die Mitte der Linse zu erreichen.

Eine Messreihe wurde gestartet und laufen gelassen, bis von dem Schian-Algorithmus in 47 Bildern die Iris detektiert wurde. Eine ausführliche Auflistung aller gemessenen Werte ist im Anhang C.2 aufgeführt. Die mittlere Position der Iris im Bild war (522.464,206.618). Die Varianz für die X- und Y-Koordinate im Bild war mit 0.162567 und 0.595048 gering, da kein echtes Auge, sondern ein Photo eines Auges aufgenommen wurde, das sich nicht bewegt. Das Programm bestimmte hieraus den Radius der Iris auf dem Photo mit 6.22105 mm.

Nun wurde die Kamera um 10 Millimeter in der X-Achse nach links verschoben. Es wurde wieder eine Messreihe mit 47 Bildern in denen die Iris detektiert wurde gestartet, in dieser Messreihe wurde als gemittelter Mittelpunkt (340.573,206.812) bestimmt. Dies entspricht einer Verschiebung in der X-Achse um -181.891 Pixeln. Ausgehend von dieser Information und dem initialen Abstand berechnete der Algorithmus mit Hilfe der aufgeführten Formeln eine Verschiebung in der Welt von -10.1333 mm.

Es wurde ebenfalls eine Messung mit einem echten Auge ausgeführt, hierbei war die Varianz innerhalb der Messreihen aufgrund der Bewegungen einer menschlichen Versuchsperson höher und es wurden etwas weniger genaue Ergebnisse erreicht.

Der Abstand zum Auge betrug 205 Millimeter, eine Messreihe über 78 Bilder ergab als mittlere Position des Irismittelpunkts (384.047,380.515) bei einer Varianz von 4.3805 und 1.43848 für die X- beziehungsweise Y-Koordinate. Eine ausführliche Auflistung aller gemessenen Werte ist im Anhang C.4 aufgeführt. Nach einer Verschiebung um 10 Millimeter nach rechts ergab sich als Mittelpunkt (182.492,379.182) bei einer Varianz von 8.1817 und 4.88524. Die Verschiebung in X-Richtung betrug also 201.555 Pixel womit eine Verschiebung von -9.49567 mm berechnet wurde.

7.3 Verschiebung in der Z-Achse

Im ersten Versuch hierzu wurde ein Photo eines menschlichen Auges in einem Abstand von 240 mm aufgenommen. Die Iris im Photo hatte einen Radius von etwa 6,25 mm. Aus der ersten Messung des Irisradius von 112.014 Pixel wurde vom Algorithmus auf einen Radius von 6.22105mm geschlossen. Eine ausführliche Auflistung aller gemessenen Werte ist im Anhang C.3 aufgeführt.

Dann wurde die Kamera um 10 mm nach rechts verschoben. Dies sollte eigentlich keinen Einfluss auf die Größe der Iris haben, durch Messungenauigkeiten ergab sich jedoch ein leicht anderer Radius im Bild von 112.058 Pixel.

Nun wurde die Kamera um 10 mm nach hinten verschoben. Als neuer Radius der Iris im Bild wurden 107.366 Pixel gemessen. Der daraus neu berechnete Abstand von 249.306 mm stimmt mit der realen Verschiebung von 10 mm relativ gut (Fehler etwa 7%) überein.

Im zweiten Versuch wurde eine Versuchsperson in einem Abstand von 225 mm zur Kamera aufgenommen. Der gemessene Radius der Iris im Bild betrug 117.451 Pixel. Daraus wurde ein realer Radius der Iris von 6.06792 mm berechnet. Eine ausführliche Auflistung aller gemessenen Werte ist im Anhang C.5 aufgeführt.

Nun wurde die Kamera um 10 mm nach hinten verschoben. Der neue Radius der Iris im Bild betrug 111.694 Pixel. Daraus wurde auf einen neuen Abstand von von 235.308 mm und somit eine Verschiebung von etwa 10,3 mm geschlossen.

Solch genaue Ergebnisse lassen sich jedoch nur bei geringem Abstand zwischen Auge und Kamera und sehr ruhiger Kopfposition des Probanden erreichen. Anderenfalls wird die Berechnung der Verschiebung in Richtung der Z-Achse besonders für kleine Differenzen im Vergleich zu Verschiebungen in X-Achse recht ungenau.

7.4 Kombinierte Verschiebungen

Neben den bisher beschriebenen Verschiebungen wurden weitere Experimente durchgeführt, in denen die Kamera sowohl entlang der X- als auch der Z-Achse verschoben wurde. Die Daten dieser Messreihen sind in Anhang C.6 und C.7 angegeben.

Literaturverzeichnis

- [bgv] *BGV B2 Laserstrahlung in der Fassung vom 1. Januar 1997, Anhang 2 Maximale zulässige Bestrahlung (MZB)*
- [Hec87] HECHT, Eugene: *Optik*. McGraw-Hill Book Company GmbH, Hamburg, 1987
- [SBPP98] SCHIAN, Rainer ; BARRY, Jean-Cyriaque ; PONGS, Uwe ; PRIESE, Lutz: Automatische Augenstellungsbestimmung in Infrarot-Videobild-Sequenzen. In: LEHMANN, Thomas M. (Hrsg.) ; METZLER, Volker (Hrsg.) ; SPITZER, Klaus (Hrsg.) ; TOLXDORFF, Thomas (Hrsg.): *Informatik aktuell*, Springer Verlag, 1998, S. 44–48
- [Sch99] SCHIAN, Rainer: *Automatische Bildauswertung zur dynamischen Schielwinkelmessung bei Kleinkindern und Säuglingen*, Universität Koblenz-Landau, Diss., 1999. – Fölbach Verlag, Koblenz, 161 Seiten
- [SP97] SCHIAN, Rainer ; PRIESE, Lutz: Automatische Lagebestimmung von Pupillen in der Medizinischen Datenverarbeitung. In: *Proceedings "Mustererkennung 1997"*, 19. DAGM Symposium, Braunschweig, 15.-17. September 1997, 568-577
- [VD03] VEZHNEVETS, V. ; DEGTIAREVA, A.: Robust and accurate eye contour extraction. In: *Proc. Graphicon*, 2003, S. 81–84
- [YDS01] YU, W. ; DANILIDIS, K. ; SOMMER, G.: Approximate orientation steerability based on angular Gaussians. In: *IEEE Transactions on Image Processing* 10 (2001), Nr. 2, S. 193–205
- [ZY02] ZHU, Jie ; YANG, Jie: Subpixel Eye Gaze Tracking. In: *FGR '02: Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2002. – ISBN 0–7695–1602–5, S. 131

A Experimentelle Bestimmung des Bildwinkels

Die in Abschnitt 5.2 berechneten Winkel wurden wie folgt experimentell überprüft:

Für die Bestimmung des horizontalen Bildwinkels wird die Kamera mit einem festen, bekannten Abstand (d) zu einer Wand positioniert. Wir haben einen großen Abstand von 3 Metern gewählt, damit sich Messfehler nicht zu stark auswirken. Dann wird ein Zollstock entlang der Wand gelegt und so ausgerichtet, dass sein Anfang am linken Rand des Kamerabildes liegt. Jetzt kann abgelesen werden, wie viel (in Millimetern) des Zollstocks im Kamerabild sichtbar ist. Diesen Wert bezeichnen wir als h .

Der horizontale Bildwinkel ergibt sich als $\alpha = 2 * \arctan(\frac{h}{2d})$. Für die Berechnung des vertikalen Bildwinkel wird die Kamera um 90° gedreht, die Berechnung erfolgt dann analog.

Es ergaben sich die Werte $\alpha = 20^\circ$ und $\beta = 15^\circ$, die die Berechnungen in Abschnitt 5.2 bestätigen.

B Beispiele analysierter Augenbilder

B.1 Künstliches Auge

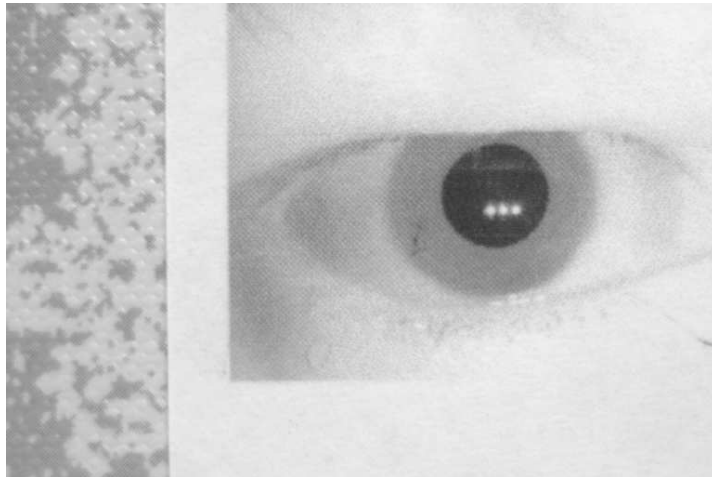


Abbildung B.1: Eingabebild

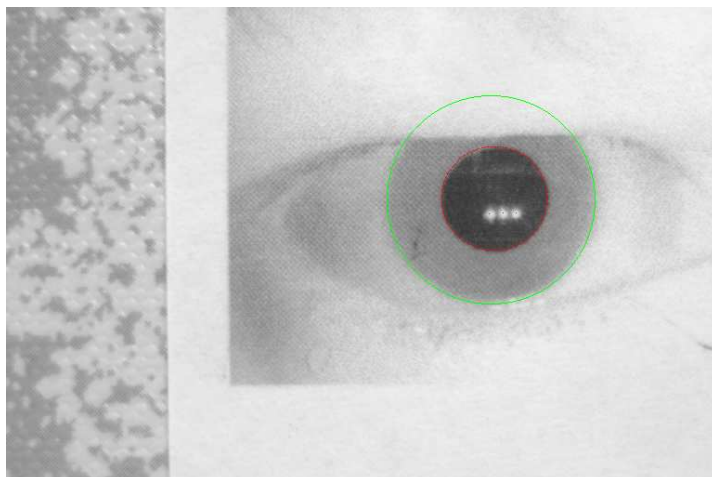


Abbildung B.2: Detektierte Iris und Pupille

B.2 Echtes Auge



Abbildung B.3: Eingabebild

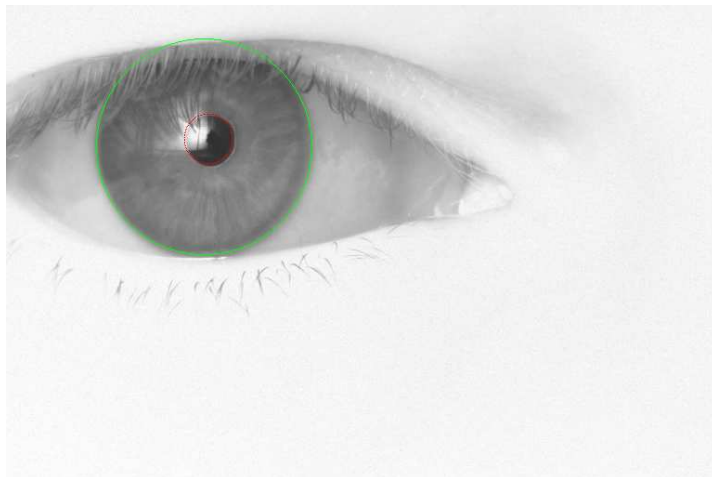


Abbildung B.4: Detektierte Iris und Pupille

C Tabellarische Auflistung der Werte zu den Versuchsreihen

C.1 Legende

Nachfolgend sind die Ergebnisse für sechs Messreihen aufgelistet. Jede Messreihe besteht aus mehreren (Messreihe 1 drei, ansonsten zwei) Bildserien. Eine Bildserie besteht aus zeitlich direkt aufeinander folgenden Einzelbildern, zwischen denen die Kamera- und Augenposition nicht verändert wurde. Für jedes Bild existiert eine Tabellenzeile, in der die laufende Nummer innerhalb der Serie, die X-Koordinate des Pupillenmittelpunkts im Bild, die Y-Koordinate des Pupillenmittelpunkts im Bild, der Winkel zwischen der Hauptachse der die Pupille approximierenden Ellipse und der X-Achse im Bild, die X-Koordinate des Irismittelpunkts im Bild, die Y-Koordinate des Irismittelpunkts im Bild und der Irisradius in Pixeln, wie sie von dem Eyetracking-Algorithmus detektiert wurden, aufgelistet ist. Am Ende jeder Tabelle findet sich eine Zeile, die den Mittelwert der Werte innerhalb der Serie enthält. Tabellenzeilen, die statt Werten nur „-“ enthalten bezeichnen Bilder, in denen das Auge nicht gefunden werden konnte.

C.2 Messreihe 1

Vor der Kamera wurde in einem Abstand von 240mm ein Ausdruck eines Auges aufgestellt.

Zwischen der Aufnahmeserie 1 und 2 wurde die Kamera, vom Benutzer aus betrachtet, um 10mm nach rechts verschoben.

Zwischen der Serie 2 und 3 wurde die Kamera dann um 10mm nach hinten verschoben.

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	526.66	206.21	36.39	524.61	207.47	111.22
2	526.72	206.59	25.79	522.08	206.50	112.16
3	526.66	206.21	36.39	522.43	206.64	111.84
4	526.66	206.08	44.27	522.63	207.12	111.93
5	526.73	206.08	34.34	522.08	207.44	111.96
6	526.74	206.14	40.66	522.36	206.67	111.82
7	526.81	206.29	35.98	522.50	206.56	111.77
8	526.74	206.14	40.66	522.36	206.91	111.90
9	526.74	206.14	40.66	522.72	207.39	112.12
10	526.73	206.35	33.13	522.08	206.74	112.15
11	526.74	206.14	40.66	522.24	206.11	112.11
12	526.81	206.29	35.98	522.38	206.32	111.79

13	526.63	206.40	28.83	522.17	207.35	112.18
14	526.13	206.70	0.00	522.81	207.86	112.10
15	526.66	206.14	31.58	522.93	207.41	112.01
16	526.61	206.34	31.39	522.20	206.78	111.75
17	526.80	206.23	31.69	522.38	206.79	111.99
18	526.57	206.37	31.84	522.39	206.38	111.88
19	526.75	206.35	34.12	523.15	205.21	112.17
20	526.74	206.14	40.66	522.28	206.56	111.89
21	526.81	206.29	35.98	522.67	206.87	111.91
22	526.62	206.50	25.74	522.81	207.39	112.03
23	526.66	206.21	36.39	521.90	206.17	112.23
24	526.69	206.42	27.16	522.49	206.31	111.79
25	526.66	206.21	36.39	522.53	203.50	113.48
26	526.69	206.19	37.92	522.59	204.11	113.32
27	526.72	206.22	39.55	522.19	206.23	112.26
28	526.69	206.24	48.73	522.52	207.67	112.11
29	526.72	206.59	25.79	522.35	206.43	111.82
30	526.63	206.81	24.37	522.44	206.36	111.84
31	526.66	206.21	36.39	522.28	206.56	111.89
32	526.69	206.42	27.16	522.51	206.84	111.96
33	526.69	206.42	27.16	522.76	207.32	111.90
34	526.74	206.14	40.66	522.33	206.44	111.74
35	526.69	206.36	24.80	522.42	207.01	111.84
36	526.81	206.29	35.98	522.21	206.58	112.15
37	526.74	206.14	40.66	522.08	206.50	112.16
38	526.74	206.14	40.66	522.61	206.83	111.88
39	526.81	206.29	35.98	522.40	206.76	111.87
40	526.66	206.08	44.27	522.08	206.50	112.16
41	526.66	206.21	36.39	522.61	206.93	111.78
42	526.74	206.14	40.66	522.45	207.09	112.11
43	526.81	206.29	35.98	522.32	206.88	111.94
44	526.71	206.26	35.67	522.37	206.41	111.91
45	526.73	206.35	33.13	522.24	206.11	112.11
46	526.51	206.45	30.22	522.38	206.40	111.72
∅	526.69	206.29	34.32	522.46	206.62	112.01

Tabelle C.1: Messung 1 Serie 1

Berechneter Radius der Iris (ausgehend von Abstand 240 mm): 6.22105 mm

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	344.21	206.06	37.55	340.26	207.75	112.03

2	344.23	206.01	30.33	340.74	204.71	111.26
3	344.40	206.25	20.26	340.03	205.43	111.76
4	344.17	205.57	47.47	340.67	207.35	112.05
5	344.32	205.62	41.80	340.74	205.76	111.72
6	344.13	206.08	36.49	341.19	207.53	112.04
7	344.32	205.62	41.80	340.88	206.56	112.05
8	343.81	206.65	25.02	340.57	203.73	111.43
9	343.94	205.98	33.65	340.37	203.44	111.33
10	344.28	205.44	56.76	340.31	205.56	112.34
11	344.29	205.53	50.55	340.63	211.49	113.01
12	344.13	205.87	47.08	340.15	211.92	112.82
13	344.19	205.83	44.28	340.90	205.43	111.46
14	344.36	205.54	54.52	340.81	206.73	111.58
15	343.90	206.22	29.51	340.41	204.74	111.24
16	344.24	205.23	60.49	340.73	206.62	112.02
17	344.14	206.15	35.44	340.40	210.46	113.61
18	344.18	205.52	46.02	341.41	205.32	111.62
19	344.25	205.52	49.61	341.22	203.15	112.03
20	343.83	206.49	22.35	339.62	210.71	113.81
21	344.05	206.24	29.35	341.06	204.06	112.22
22	344.35	205.59	49.72	339.95	211.65	113.09
23	344.22	205.54	46.75	340.61	205.46	111.63
24	344.19	206.08	34.47	339.84	209.98	113.74
25	343.85	205.16	58.47	340.88	203.16	111.37
26	344.19	206.02	38.80	340.35	205.41	111.85
27	344.06	206.16	33.35	340.31	209.37	112.81
28	343.92	206.50	26.13	340.70	210.99	113.08
29	344.03	205.46	45.93	340.19	204.63	111.81
30	344.25	205.52	49.61	340.88	205.48	111.31
31	344.22	205.54	46.75	340.90	206.63	111.77
32	344.18	205.52	46.02	340.63	205.71	111.52
33	344.11	206.03	33.66	340.73	204.87	111.25
34	343.92	206.50	26.13	339.80	204.11	111.35
35	344.14	205.99	39.99	340.20	212.30	112.78
36	344.11	206.00	33.33	341.17	207.34	112.19
37	344.38	205.87	38.76	340.87	205.49	111.61
38	344.29	205.39	60.72	341.08	205.74	111.45
39	344.25	206.19	30.96	340.57	204.64	111.11
40	344.09	206.22	36.98	340.71	205.41	111.13
41	344.18	205.52	46.02	340.65	206.63	111.64
42	344.12	206.14	34.60	340.27	207.56	112.39

43	344.22	206.00	33.39	340.39	208.94	112.58
44	344.36	205.65	45.58	340.21	211.71	113.21
45	344.44	206.14	29.55	340.76	204.74	113.20
46	344.22	205.54	46.75	340.49	206.52	111.68
47	344.14	205.59	44.33	340.71	207.25	111.76
∅	344.17	205.86	40.36	340.57	206.81	112.06

Tabelle C.2: Messung 1 Serie 2

Berechnete Verschiebung:

X-Achse: -10.1333 mm

Y-Achse: -0.0238761 mm

Z-Achse: -0.085 mm

d.h. die Verschiebung um 10 mm nach rechts wurde sehr genau detektiert.

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	351.08	207.75	44.73	346.39	207.61	107.59
2	350.97	207.69	41.13	347.11	211.92	108.97
3	351.01	207.76	42.59	346.48	209.51	107.63
4	351.09	206.98	45.00	347.48	207.24	107.45
5	351.16	207.17	33.79	346.65	208.14	107.27
6	351.16	207.71	39.10	346.96	208.72	107.09
7	350.96	207.40	55.19	346.44	206.48	107.26
8	351.16	207.99	34.63	346.29	208.67	107.72
9	351.08	208.24	25.12	347.90	207.85	107.88
10	351.14	207.81	44.95	346.39	207.57	107.57
11	351.24	206.95	42.21	347.11	206.19	107.56
12	351.16	207.17	33.79	346.44	208.09	107.50
13	350.97	207.69	41.13	346.82	205.56	107.24
14	351.32	206.67	49.79	347.18	207.42	107.37
15	351.06	207.65	39.77	346.44	208.05	107.50
16	351.10	207.44	60.72	348.99	205.93	108.05
17	351.08	208.24	25.12	346.83	207.50	107.41
18	351.18	207.77	40.15	346.90	208.61	107.15
19	351.14	207.71	38.77	346.52	208.22	107.06
20	350.99	208.03	38.00	347.39	207.24	106.52
21	350.94	207.18	0.00	346.76	206.45	106.21
22	351.00	207.89	43.46	346.65	208.84	107.46
23	351.21	208.29	25.14	346.78	207.24	107.58
24	351.02	207.83	49.47	346.90	208.61	107.15
25	350.95	207.97	36.95	346.19	209.33	108.01
26	350.78	207.62	45.42	346.47	207.52	107.30

27	351.09	207.93	29.76	347.26	209.27	107.35
28	351.10	207.72	40.87	347.12	209.46	107.00
29	351.04	207.69	43.12	347.08	208.82	107.53
30	350.93	207.70	46.34	347.29	206.15	106.69
31	351.20	207.78	40.42	346.72	208.90	107.21
32	350.95	207.83	46.83	346.82	206.38	107.21
33	351.04	208.18	24.88	347.51	209.46	107.62
34	351.09	207.98	27.37	346.88	208.33	106.73
35	351.13	207.98	30.46	346.54	208.53	107.57
36	351.12	207.93	34.03	346.65	208.76	107.46
37	351.21	208.29	25.14	346.83	206.58	106.95
38	351.16	207.71	39.10	346.83	208.23	106.98
39	351.08	208.24	25.12	348.06	209.85	108.58
40	350.89	208.45	22.50	347.12	208.20	107.24
41	351.16	207.71	39.10	346.63	208.08	107.49
42	350.93	207.70	46.34	346.73	205.81	107.12
43	351.20	207.78	40.42	346.76	208.40	107.14
44	350.72	208.08	28.06	347.36	207.41	107.06
45	351.16	207.99	34.63	346.54	208.53	107.57
46	350.89	208.45	22.50	347.22	207.67	106.93
47	351.08	207.99	32.74	346.24	209.38	107.26
∅	351.07	207.78	36.93	346.91	208.02	107.37

Tabelle C.3: Messung 1 Serie 3

Berechnete Verschiebung:

X-Achse: 0.399901mm

Y-Achse: 0.111491mm

Z-Achse: 9.391mm

d.h. die Verschiebung um 10 mm nach vorne wurde gut detektiert. Es wurde zusätzlich fälschlicherweise eine Verschiebung um etwa 0.4 mm nach rechts detektiert, dies lässt sich zum Teil durch die Konstruktion des Kamerastativs erklären, welches beim Verschieben nach vorne bzw. hinten zu leichtem Wackeln neigt.

C.3 Messreihe 2

Vor der Kamera wurde in einem Abstand von 240 mm ein Ausdruck eines Auges aufgestellt.

Zwischen der Aufnahmeserie 1 und 2 wurde die Kamera, vom Benutzer aus betrachtet, um 10 mm nach rechts und um 5 mm nach vorne verschoben.

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	531.97	205.91	38.84	529.06	212.16	112.60

2	531.97	205.91	38.84	529.28	205.86	111.32
3	531.97	205.91	38.84	530.27	206.61	110.59
4	532.07	206.25	37.76	528.39	206.80	111.66
5	531.96	206.05	39.29	528.10	205.68	111.24
6	532.35	205.72	56.05	528.65	206.89	111.05
7	532.27	205.70	61.82	529.31	207.17	110.75
8	532.21	206.01	43.04	528.36	206.88	111.77
9	532.22	205.97	48.21	528.97	207.16	110.95
10	532.17	206.21	40.29	528.61	207.98	111.41
11	532.13	206.57	23.31	528.00	207.37	111.40
12	532.08	206.37	25.05	528.03	207.18	111.46
13	532.33	205.54	65.12	529.45	206.98	110.89
14	532.22	205.97	48.21	528.84	207.48	111.25
15	532.20	206.42	34.63	528.57	207.95	111.36
16	532.22	205.97	48.21	528.51	206.95	111.07
17	532.04	206.49	27.89	528.31	206.63	111.85
18	532.04	206.49	27.89	528.40	206.73	111.66
19	531.97	205.91	38.84	529.39	207.94	111.31
20	532.27	205.70	61.82	529.33	206.38	110.61
21	532.33	205.91	41.60	529.16	206.87	110.48
22	532.20	206.42	34.63	527.82	207.71	111.54
23	531.97	205.91	38.84	529.50	205.38	110.83
24	532.20	206.42	34.63	528.40	206.73	111.66
25	532.22	205.97	48.21	529.12	206.30	110.53
26	532.31	206.47	28.98	528.64	206.65	111.30
27	531.99	206.57	32.64	529.29	204.45	111.52
28	532.20	206.42	34.63	528.03	206.83	111.30
∅	532.15	206.11	40.65	528.78	206.99	111.26

Tabelle C.4: Messung 2 Serie 1

Berechneter Radius der Iris (ausgehend von Abstand 240 mm): 6.17936 mm

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	349.32	203.89	23.51	345.76	204.64	113.97
2	349.39	203.97	28.32	346.15	204.65	113.31
3	349.52	203.82	15.80	345.85	203.61	113.55
4	349.58	203.83	21.97	345.85	203.53	113.55
5	349.55	203.89	16.05	345.80	203.65	113.59
6	349.46	203.92	16.70	345.61	204.27	113.85
7	349.41	203.97	31.26	346.08	204.26	113.30
8	349.23	203.96	24.37	345.87	203.43	113.63

9	349.39	204.04	24.28	343.81	204.84	112.26
10	349.42	203.89	28.15	346.12	203.75	113.84
11	349.33	204.04	23.64	345.28	203.01	113.79
12	349.24	204.12	24.34	345.28	204.84	113.80
13	349.61	203.95	20.57	345.55	202.77	113.87
14	349.16	204.03	25.46	345.30	206.54	113.98
15	349.08	204.05	23.92	344.94	205.91	113.57
16	349.61	203.95	20.57	345.90	203.51	113.60
17	349.32	204.11	25.45	344.86	204.41	113.48
18	349.45	204.07	21.31	344.50	205.78	113.14
19	349.33	204.04	23.64	345.16	205.97	113.65
20	349.76	203.77	22.25	345.88	203.41	113.53
21	349.00	204.06	25.19	345.35	208.61	113.55
22	349.81	203.84	19.93	345.51	204.39	113.75
23	349.31	203.99	22.08	345.90	203.47	113.60
24	349.79	203.92	23.68	345.84	203.96	113.63
25	349.64	203.88	17.79	345.78	203.70	113.60
26	349.55	204.22	27.48	344.99	203.08	114.27
27	349.72	203.58	35.47	345.93	203.26	113.58
28	349.32	203.94	26.17	346.00	203.95	113.57
∅	349.44	203.96	23.55	345.53	204.33	113.60

Tabelle C.5: Messung 2 Serie 2

Berechnete Verschiebung:

X-Achse: -9.93835 mm

Y-Achse: -0.117394 mm

Z-Achse: -4.424 mm

d.h. die Verschiebung um 10 mm nach rechts wurde sehr gut, die Verschiebung um 5 mm nach vorne gut detektiert. Dies zeigt, dass auch gleichzeitige Verschiebungen in mehreren Achsen stabil rückgerechnet werden können.

C.4 Messreihe 3

In einem Abstand von 205 mm blickte eine Versuchsperson in die Kamera.

Zwischen der Aufnahmeserie 1 und 2 wurde die Kamera, vom Benutzer aus betrachtet, um 10 mm nach rechts verschoben.

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	384.77	380.81	-22.98	380.28	381.37	124.83
2	383.90	380.02	-32.30	380.08	382.58	124.88
3	387.16	380.73	-21.71	383.09	382.26	125.21

4	386.27	381.44	-19.39	382.05	382.75	124.88
5	386.61	380.96	-26.55	382.26	382.15	125.00
6	384.21	381.22	-11.14	379.71	383.13	124.84
7	384.87	380.34	-27.15	380.84	381.69	124.81
8	385.51	381.02	-25.10	381.10	382.57	124.92
9	385.82	381.55	-13.91	381.28	382.49	124.84
10	385.70	381.34	-17.72	381.55	382.89	124.91
11	383.94	382.15	-22.36	379.57	383.20	124.83
12	385.63	380.09	-39.07	381.89	382.33	125.00
13	385.06	381.22	-21.75	381.02	382.95	124.70
14	386.59	380.99	-22.71	382.13	382.16	124.99
15	384.67	381.00	-30.10	380.45	381.75	125.01
16	385.26	380.21	-28.47	381.10	381.75	124.74
17	388.20	380.19	-27.22	384.16	381.20	124.63
18	388.78	379.77	-13.07	384.76	380.24	124.84
19	389.88	379.34	-25.13	385.49	380.83	124.68
20	387.67	379.52	-28.12	383.07	380.56	124.74
21	387.46	378.93	-23.40	383.20	380.01	124.77
22	388.90	378.86	-22.00	384.80	379.44	124.79
23	388.51	378.67	-31.64	384.75	379.50	124.74
24	389.24	378.78	-21.32	385.04	379.55	124.87
25	388.41	379.24	-26.71	384.27	380.48	124.65
26	389.05	379.01	-17.20	384.95	380.66	124.62
27	390.23	379.04	-27.98	385.94	379.89	124.77
28	389.72	378.88	-23.89	385.66	379.40	124.93
29	388.28	379.20	-19.18	384.32	380.51	125.06
30	387.86	379.58	-30.64	383.91	381.00	124.81
31	388.61	379.93	-18.04	384.60	380.86	124.88
32	389.52	379.75	-22.05	385.26	380.67	124.82
33	387.70	379.28	-32.25	383.79	380.63	124.69
34	386.67	379.52	-28.12	382.26	379.77	124.87
35	385.67	379.52	-28.12	381.42	380.33	124.90
36	386.96	379.79	-21.76	382.88	380.09	124.75
37	387.48	379.66	-19.54	383.68	379.90	124.87
38	385.83	378.88	-13.96	382.05	380.29	124.48
39	386.93	379.06	-17.31	383.22	379.44	124.37
40	385.47	379.28	-15.72	381.44	379.46	124.64
41	387.05	378.32	-7.68	383.45	378.75	124.61
42	389.48	378.73	-24.83	385.61	380.07	124.65
43	390.15	378.76	-15.51	385.99	380.05	124.47
44	390.96	378.03	-18.52	387.12	378.05	124.50

45	386.67	378.55	-23.99	382.84	378.87	124.69
46	387.00	378.71	-25.95	382.97	379.47	124.67
47	389.71	378.07	-21.06	385.83	379.21	124.38
48	390.20	377.96	-11.16	386.21	377.58	124.77
49	389.63	377.91	-31.09	385.69	378.26	124.92
50	391.34	378.14	-21.56	387.20	378.66	124.57
51	389.09	378.27	-32.78	385.21	379.68	124.69
52	388.79	378.32	-25.03	384.77	379.53	124.63
53	390.17	378.11	-25.28	386.06	379.40	124.76
54	389.71	378.07	-21.06	385.57	379.59	124.63
55	389.48	378.62	-28.05	385.40	379.84	124.86
56	386.87	379.42	-21.53	382.56	380.88	124.71
57	386.80	378.83	-12.99	382.75	380.31	124.68
58	387.83	378.93	-9.53	383.54	380.46	124.68
59	387.15	378.42	-34.91	383.24	381.16	124.36
60	389.76	378.96	-12.82	385.41	379.75	124.77
61	386.87	379.58	-26.96	382.45	381.00	124.90
62	388.09	379.07	-8.74	383.71	379.19	124.72
63	388.30	378.72	-21.83	384.63	380.52	124.76
64	387.75	379.75	-12.01	383.81	381.02	124.45
65	391.12	379.29	-22.42	386.79	381.27	124.76
66	390.40	379.63	-9.49	386.10	381.47	124.55
67	390.52	378.68	-5.48	386.39	380.09	124.75
68	392.93	379.01	-12.55	388.66	380.68	124.72
69	391.89	379.49	-20.27	387.31	380.28	124.81
70	392.59	379.30	-13.43	388.37	380.47	124.65
71	389.93	379.41	-1.99	385.68	380.30	124.65
72	390.24	379.13	-16.82	386.05	380.30	124.65
73	391.20	379.08	-2.25	386.82	380.04	124.75
74	390.22	379.01	-25.99	386.23	380.00	124.74
75	389.61	379.37	-13.23	385.63	380.22	124.70
76	389.41	379.05	-10.83	385.18	379.91	124.70
77	390.05	378.93	2.14	385.90	380.46	124.46
78	389.07	379.54	-9.94	385.20	380.69	124.38
∅	388.17	379.41	-20.44	384.05	380.52	124.74

Tabelle C.6: Messung 3 Serie 1

Berechneter Radius der Iris (ausgehend von Abstand 205 mm): 5.80001 mm

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	188.30	376.03	0.00	184.38	376.56	122.85

2	189.22	377.22	0.00	185.48	376.79	123.32
3	187.59	376.48	0.00	183.79	376.14	122.98
4	187.79	376.29	0.00	184.37	376.57	123.12
5	186.90	377.32	0.00	183.13	377.14	122.98
6	189.23	375.53	-32.71	185.53	375.23	123.63
7	188.96	376.47	-29.30	185.33	375.38	123.71
8	188.10	376.02	0.00	184.22	374.55	123.75
9	189.13	376.67	-7.85	185.24	373.23	124.18
10	190.67	377.19	0.00	186.69	377.10	123.48
11	190.77	376.79	0.00	187.19	377.02	123.09
12	190.06	375.18	0.00	186.72	373.76	124.09
13	189.40	376.62	0.00	185.88	376.92	123.16
14	189.27	377.23	0.00	185.10	378.10	122.70
15	190.70	375.80	0.00	187.20	377.31	123.19
16	189.82	377.27	0.00	185.69	378.81	122.65
17	189.02	376.07	0.00	185.31	377.17	122.89
18	192.55	377.39	0.00	188.28	378.11	123.01
19	185.28	377.31	0.00	181.85	379.83	122.88
20	187.67	377.85	-13.52	184.16	379.46	122.92
21	191.16	377.35	0.00	187.71	378.10	123.52
22	191.24	378.65	-29.45	187.54	379.94	123.05
23	191.19	378.16	-27.86	187.87	377.92	123.62
24	186.81	381.60	-18.45	183.21	382.29	123.27
25	188.41	382.64	-17.82	184.48	382.07	123.32
26	189.32	383.00	-27.31	185.14	383.88	123.69
27	187.30	383.12	-18.22	183.11	384.45	123.74
28	187.54	383.11	-23.28	182.96	384.62	123.42
29	185.19	383.20	-11.75	181.01	384.31	123.47
30	186.46	382.50	-31.37	182.44	383.07	123.51
31	187.84	381.87	-21.52	183.60	382.05	123.39
32	185.93	380.82	-35.09	181.99	380.88	123.67
33	187.81	380.88	-28.69	184.11	381.37	123.53
34	-	-	-	-	-	-
35	189.14	376.97	-18.91	185.40	376.37	123.29
36	189.24	378.79	-36.41	185.29	378.78	123.65
37	187.95	378.41	-28.01	184.32	378.86	123.60
38	188.90	378.57	-30.39	185.16	378.49	123.58
39	186.32	379.37	-37.04	182.34	379.22	123.47
40	186.28	379.30	-31.20	182.14	378.98	123.58
41	185.67	379.03	-19.50	181.85	379.21	123.49
42	185.73	378.56	-19.54	181.88	379.59	123.30

43	185.04	379.04	-29.26	181.12	378.30	123.64
44	184.27	379.05	-17.08	179.97	378.46	123.38
45	185.29	379.54	-23.90	181.12	378.77	123.41
46	185.64	379.58	-27.98	181.12	378.73	123.49
47	185.11	378.92	-33.25	180.57	379.97	123.14
48	182.97	379.13	-36.39	178.80	380.89	123.04
49	184.38	378.78	-29.22	180.20	379.63	123.30
50	183.87	379.03	-26.70	179.82	380.22	123.20
51	183.12	380.08	-30.09	178.91	379.64	123.31
52	183.92	379.60	-32.95	179.95	379.79	123.26
53	182.25	380.37	-30.77	178.14	380.33	123.27
54	183.10	379.28	-18.92	178.88	378.98	123.33
55	182.69	379.48	-24.16	178.91	380.21	123.11
56	182.18	379.18	-23.53	178.44	379.02	123.30
57	184.07	379.46	-31.93	180.29	380.42	123.14
58	181.58	380.45	-21.93	177.88	379.93	123.47
59	184.99	379.06	-30.09	181.36	379.97	123.09
60	185.79	379.27	-23.67	181.79	379.62	123.03
61	185.96	378.42	-21.26	182.15	379.32	122.94
62	180.56	378.03	-30.30	176.84	379.19	122.85
63	181.18	378.33	-32.49	177.71	379.76	122.85
64	183.81	378.56	-26.96	180.16	379.92	122.73
65	183.52	378.46	-28.82	179.73	379.87	122.87
66	184.53	378.56	-27.09	180.79	379.27	122.79
67	183.89	378.49	-26.36	180.06	379.88	122.82
68	182.41	378.42	-25.22	178.47	379.94	122.73
69	184.00	379.83	-33.05	179.89	379.72	123.09
70	184.15	379.44	-25.49	180.19	379.86	122.99
71	185.97	379.10	-32.97	181.61	379.32	122.90
72	183.94	379.55	-27.73	179.64	379.62	122.98
73	184.28	378.91	-22.71	180.23	379.97	122.95
74	184.77	379.92	-21.27	180.73	380.74	123.15
75	183.81	380.14	-28.44	179.88	380.57	122.94
∅	186.39	378.81	-20.23	182.49	379.18	123.25

Tabelle C.7: Messung 3 Serie 2

Berechnete Verschiebung:

X-Achse: -9.49567 mm

Y-Achse: -0.0281129 mm

Z-Achse: 2.18 mm

d.h. die Verschiebung um 10 mm nach rechts wurde gut erkannt. Das zeigt, dass der Algo-

rhythmus nicht nur funktioniert, wenn künstliche Augen aufgenommen werden, sondern auch mit menschlichen Augen. Die größere Ungenauigkeit im Vergleich zu den Messungen mit künstlichen Augen lässt sich dadurch erklären, dass es für einen Menschen schwierig ist, innerhalb der Aufnahmeserie nicht den Kopf zu bewegen. Zu beobachten ist allerdings ein Messfehler von etwa 2 mm in der Z-Achse. Auf Grund der im Haupttext (siehe Abschnitt 5.5) angesprochenen Problematik kommen solche Ausreißer bei der Messung von Verschiebungen in der Z-Achse systembedingt durchaus von Zeit zu Zeit vor. Die Ungenauigkeit der Messung lag bei den von uns durchgeführten Experimenten im schlimmsten Fall bei etwa 20%.

C.5 Messreihe 4

In einem Abstand von 225 mm blickte eine Versuchsperson in die Kamera.

Zwischen der Aufnahmeserie 1 und 2 wurde die Kamera, vom Benutzer aus betrachtet, um 10 mm nach hinten verschoben.

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	373.20	132.52	87.94	367.06	138.45	117.40
2	372.04	132.29	85.99	365.78	137.80	117.53
3	373.39	132.57	80.58	366.93	138.60	117.35
4	372.91	133.11	84.71	366.45	138.70	117.45
5	370.96	132.80	89.64	364.78	138.60	117.41
6	372.96	132.65	67.01	366.13	137.87	117.39
7	370.54	132.98	76.97	363.90	138.11	117.54
8	368.15	132.25	85.14	361.68	137.63	117.36
9	369.71	132.48	74.43	363.51	137.97	117.40
10	369.13	133.35	65.86	362.70	138.25	117.50
11	370.16	132.94	65.66	363.56	137.89	117.50
12	371.67	131.56	62.32	365.27	136.81	117.45
13	-	-	-	-	-	-
14	372.29	130.28	88.21	366.05	135.54	117.36
15	-	-	-	-	-	-
16	372.96	131.29	63.45	366.09	136.74	117.48
17	372.60	131.38	58.30	365.65	137.04	117.49
18	370.94	131.77	59.97	363.90	137.44	117.42
19	373.40	131.41	62.61	366.52	137.19	117.27
20	374.62	131.24	60.72	367.62	136.66	117.32
21	372.70	131.00	74.71	365.81	136.38	117.41
22	373.84	130.58	68.44	367.11	135.63	117.40
23	-	-	-	-	-	-
24	368.68	131.20	-76.12	362.66	137.10	117.17
25	370.91	131.45	-88.68	364.34	136.90	117.28
26	372.30	130.89	88.28	365.34	135.98	117.28
27	-	-	-	-	-	-

28	-	-	-	-	-	-
29	-	-	-	-	-	-
30	372.17	131.55	77.48	365.47	137.23	117.49
31	-	-	-	-	-	-
32	372.72	132.92	78.03	366.08	138.72	117.49
33	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-
35	375.58	132.79	67.15	367.87	137.66	117.69
36	-	-	-	-	-	-
37	374.75	133.55	60.42	367.49	138.21	117.83
38	373.99	133.76	62.72	366.43	139.11	117.72
39	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-
41	376.00	131.72	62.95	368.85	136.82	117.62
42	-	-	-	-	-	-
43	374.62	133.06	85.59	367.98	138.09	117.77
44	-	-	-	-	-	-
45	-	-	-	-	-	-
46	375.13	133.20	64.97	367.51	138.17	117.65
47	-	-	-	-	-	-
48	376.74	131.77	75.12	369.80	136.22	117.87
49	-	-	-	-	-	-
50	371.84	130.91	66.66	364.76	135.14	117.37
51	-	-	-	-	-	-
52	371.96	131.02	77.45	365.25	137.01	117.25
53	-	-	-	-	-	-
54	371.19	130.43	83.41	364.52	136.14	117.36
55	372.14	131.44	67.01	364.86	137.32	117.18
56	-	-	-	-	-	-
57	375.39	130.38	-89.04	368.84	136.13	117.40
58	-	-	-	-	-	-
59	375.55	131.02	68.49	368.41	136.44	117.47
60	-	-	-	-	-	-
61	375.74	130.59	74.51	368.56	136.24	117.40
62	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-
64	-	-	-	-	-	-
65	372.77	131.57	62.71	365.28	137.21	117.31
∅	372.71	131.89	60.79	365.92	137.28	117.45

Tabelle C.8: Messung 4 Serie 1

Berechneter Radius der Iris (ausgehend von Abstand 225 mm): 6.06792 mm

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	367.85	135.62	-85.61	362.07	141.39	111.56
2	366.99	135.64	-69.33	361.44	141.68	111.54
3	369.82	135.50	64.92	363.28	140.23	111.50
4	368.29	135.93	77.20	362.19	141.97	111.41
5	370.63	135.55	84.00	364.69	140.91	111.50
6	368.03	134.88	-76.62	362.34	141.56	111.38
7	370.92	135.60	66.01	364.36	140.32	111.61
8	370.56	135.24	-69.84	364.90	140.98	111.57
9	370.27	136.47	54.90	363.49	141.04	111.57
10	371.67	134.95	-88.28	365.45	141.22	111.62
11	370.25	135.47	-72.67	364.07	141.20	111.60
12	370.45	135.55	-78.69	364.06	141.11	111.70
13	370.93	134.96	-83.52	364.98	141.22	111.57
14	370.90	136.37	67.12	364.39	141.35	111.69
15	372.09	136.23	79.31	365.81	141.70	111.40
16	370.17	136.16	80.60	364.33	141.34	111.64
17	370.50	136.63	71.96	364.39	141.71	111.55
18	370.65	135.24	87.66	364.66	141.07	111.36
19	368.83	135.53	66.59	362.57	141.61	111.38
20	365.30	134.83	60.85	359.49	140.87	110.95
21	366.57	135.06	86.27	360.41	141.72	111.11
22	363.18	136.01	48.02	357.13	141.85	111.09
23	-	-	-	-	-	-
24	366.77	134.94	-31.08	361.53	141.14	111.44
25	368.16	135.22	-83.17	362.37	141.95	111.15
26	369.92	136.52	65.22	363.46	142.95	111.13
27	-	-	-	-	-	-
28	-	-	-	-	-	-
29	366.93	136.12	88.36	360.71	142.22	111.50
30	-	-	-	-	-	-
31	366.70	136.11	87.72	360.57	142.47	111.30
32	364.59	136.22	0.00	358.65	141.52	111.74
33	367.30	136.72	66.84	360.46	142.31	111.49
34	365.80	136.13	0.00	360.34	141.84	111.36
35	366.16	136.24	64.28	359.52	140.83	111.57
36	-	-	-	-	-	-
37	-	-	-	-	-	-
38	-	-	-	-	-	-
39	369.82	135.40	66.54	363.58	138.99	112.17
40	369.54	136.91	74.29	363.10	138.94	112.63

41	370.69	136.67	85.66	364.08	139.25	112.28
42	-	-	-	-	-	-
43	369.13	135.35	70.94	362.66	137.98	112.32
44	368.78	135.29	0.00	363.17	137.89	112.44
45	-	-	-	-	-	-
46	374.81	134.81	-88.35	368.89	137.24	112.55
47	378.80	134.53	80.29	372.33	139.65	111.64
48	375.94	135.50	78.88	369.21	138.93	112.05
49	373.66	135.99	77.78	367.15	138.42	112.19
50	375.63	135.95	0.00	369.82	137.57	112.53
51	385.02	135.09	0.00	379.20	138.21	112.29
52	380.75	135.73	60.06	374.21	138.24	112.41
53	375.13	135.98	73.96	368.63	139.07	112.08
∅	370.34	135.70	27.48	364.19	140.58	111.69

Tabelle C.9: Messung 4 Serie 2

Berechnete Verschiebung:

X-Achse: -0.128782 mm

Y-Achse: 0.206944 mm

Z-Achse: 10.308 mm

d.h. auch bei einer menschlichen Versuchsperson können Verschiebungen in der Z-Achse Achse gut detektiert werden.

C.6 Messreihe 5

In einem Abstand von 225 mm blickte eine Versuchsperson in die Kamera.

Zwischen der Aufnahmeserie 1 und 2 wurde die Kamera, vom Benutzer aus betrachtet, um 10 mm nach links und um 10 mm nach hinten verschoben.

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	219.57	147.11	73.17	212.33	153.39	116.62
2	219.47	147.94	66.58	212.49	154.02	116.46
3	222.28	146.34	-72.25	216.39	152.86	116.69
4	221.38	146.78	83.27	214.51	153.45	116.73
5	218.76	147.20	-87.25	212.34	153.38	116.82
6	221.58	147.88	73.86	214.15	153.87	116.88
7	221.29	147.22	73.53	214.50	153.25	116.84
8	221.66	147.63	71.00	214.05	153.25	116.88
9	222.95	146.31	79.63	216.08	152.36	116.98
10	222.25	146.30	77.65	215.69	152.70	116.96
11	221.16	146.33	86.10	214.75	152.62	116.92

12	222.05	146.53	88.89	215.63	152.55	117.02
13	220.66	145.22	0.00	215.25	151.73	116.55
14	215.99	146.78	0.00	210.42	152.80	116.38
15	218.64	148.17	67.16	210.91	154.94	116.42
16	219.29	147.97	68.83	211.65	153.60	116.67
17	215.24	147.04	-58.85	209.82	153.96	116.67
18	219.66	146.46	-69.22	213.96	152.86	116.72
19	224.05	145.86	0.00	217.42	152.28	116.53
20	-	-	-	-	-	-
21	220.17	147.45	76.18	213.49	153.84	116.76
22	226.84	146.75	73.51	218.82	152.77	117.00
23	223.22	147.31	-76.07	217.32	152.94	116.94
24	223.06	146.92	69.74	215.87	153.17	117.07
25	224.30	146.55	75.16	216.66	153.79	116.88
26	223.20	146.88	78.65	216.56	153.71	116.69
27	224.67	146.97	80.02	216.78	153.55	116.85
28	225.17	146.30	0.00	219.20	151.85	117.15
29	224.18	146.13	69.33	217.57	153.13	116.78
30	224.93	146.04	71.97	218.08	151.83	116.99
31	228.23	146.43	68.93	220.29	153.80	116.82
32	224.38	145.52	66.44	216.75	151.67	116.57
33	215.58	146.10	-50.72	210.34	153.02	116.57
34	215.86	145.89	-67.54	210.29	152.79	116.51
35	220.91	146.27	67.52	212.99	152.28	116.63
36	220.88	145.47	85.49	214.49	151.49	117.11
37	221.69	146.36	69.72	213.42	152.69	116.89
38	221.15	144.71	-86.76	215.01	150.90	116.75
39	220.40	145.66	-85.20	214.41	152.01	116.96
40	-	-	-	-	-	-
41	224.17	146.12	73.67	216.87	151.78	116.89
42	220.93	147.24	89.26	215.23	154.24	117.10
43	220.36	147.12	68.19	213.09	153.19	117.04
44	221.16	146.08	70.62	214.21	153.03	116.92
45	-	-	-	-	-	-
46	-	-	-	-	-	-
47	218.80	144.26	-77.51	213.18	152.66	116.57
48	219.53	145.99	71.21	212.57	152.22	116.78
49	218.47	145.49	79.57	211.93	152.51	116.64
50	222.23	145.30	73.04	214.51	151.25	116.92
51	219.96	145.75	73.93	212.83	151.50	116.92
52	219.15	145.78	80.98	212.43	151.69	116.94

53	218.27	145.16	0.00	213.12	151.66	116.76
54	219.96	145.75	73.93	212.75	150.78	116.95
55	222.60	145.59	73.23	215.29	151.77	117.04
56	-	-	-	-	-	-
∅	221.22	146.40	38.40	214.48	152.73	116.81

Tabelle C.10: Messung 5 Serie 1

Berechneter Radius der Iris (ausgehend von Abstand 225 mm): 6.03464 mm

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	418.37	156.65	69.81	412.22	162.88	112.36
2	417.51	157.20	50.16	411.26	163.47	112.43
3	413.31	157.64	71.96	407.09	164.33	112.39
4	412.33	156.28	-86.07	406.74	163.09	112.32
5	408.65	157.97	75.83	402.13	164.55	112.51
6	407.84	157.57	67.40	401.78	164.08	112.46
7	405.37	157.14	69.17	399.20	163.63	112.47
8	404.93	158.01	-81.63	399.26	164.48	112.39
9	409.32	156.69	73.43	402.55	163.11	112.41
10	407.74	156.43	82.82	401.82	163.35	112.39
11	405.19	157.79	65.86	399.20	164.88	112.34
12	408.17	157.46	63.39	401.14	163.43	112.40
13	411.26	155.73	-79.24	406.15	162.25	112.69
14	-	-	-	-	-	-
15	409.02	155.96	-88.92	403.07	162.62	112.20
16	407.95	155.21	0.00	402.55	162.05	112.26
17	409.36	156.15	67.89	401.96	162.06	112.15
18	409.72	155.35	70.82	403.19	162.08	112.29
19	409.35	155.66	75.88	403.37	161.83	112.31
20	410.57	155.65	67.54	403.58	161.32	112.28
21	-	-	-	-	-	-
22	414.11	155.10	71.54	407.65	161.69	112.28
23	414.21	155.04	72.93	407.51	160.98	112.17
24	413.59	155.15	70.28	406.87	161.63	112.16
25	412.98	154.49	0.00	407.79	160.33	112.35
26	416.05	154.20	69.62	409.40	160.18	112.00
27	415.96	153.75	0.00	410.37	159.28	112.37
28	414.94	154.00	0.00	409.37	160.08	112.07
29	416.68	154.21	64.10	410.04	160.04	112.20
30	416.70	155.01	67.59	409.45	160.15	112.10
31	416.64	155.16	70.60	409.76	161.13	112.38

32	419.03	155.66	63.73	411.99	161.26	112.28
33	418.27	155.65	75.14	411.86	161.20	112.38
34	418.01	155.70	74.85	411.50	161.40	112.43
35	417.99	156.07	69.67	411.40	161.86	112.41
36	415.18	153.30	-13.70	410.15	157.60	112.65
37	413.96	155.04	0.00	407.64	161.49	112.06
38	413.06	155.86	77.45	407.03	163.00	112.15
39	412.19	156.03	76.47	406.56	162.47	112.23
40	413.46	154.85	88.24	408.06	161.97	112.06
41	414.00	152.96	87.68	408.86	159.70	112.05
42	416.05	153.21	0.00	411.00	159.97	111.89
43	-	-	-	-	-	-
44	422.90	153.03	0.00	417.33	159.99	112.11
45	423.63	154.39	59.49	416.87	160.40	112.27
46	424.08	151.87	70.86	418.25	158.33	112.23
47	421.90	153.03	0.00	416.10	159.18	112.46
48	-	-	-	-	-	-
49	418.14	152.96	89.19	412.38	159.79	111.91
50	415.52	154.31	-62.48	410.23	161.14	112.01
51	415.27	154.26	-82.79	409.77	160.48	112.14
52	416.19	155.03	76.47	410.41	161.12	112.39
53	417.64	156.63	68.30	410.26	161.80	112.24
54	-	-	-	-	-	-
55	415.29	156.33	0.00	409.35	161.52	112.51
56	418.26	156.94	67.99	411.28	161.80	112.41
57	414.64	157.29	69.06	407.71	162.26	112.42
58	413.94	158.05	64.31	406.78	162.63	112.65
59	-	-	-	-	-	-
∅	414.08	155.49	40.43	407.91	161.65	112.29

Tabelle C.11: Messung 5 Serie 2

Berechnete Verschiebung:

X-Achse: 10.3645 mm

Y-Achse: 0.488607 mm

Z-Achse: 8.042 mm

d.h. die Verschiebung um 10 mm nach links konnte sehr genau detektiert werden, die Verschiebung um 10 mm nach hinten wurde grundsätzlich ebenfalls detektiert, jedoch mit einer Ungenauigkeit von 2 mm.

C.7 Messreihe 6

In einem Abstand von 240 mm blickte eine Versuchsperson in die Kamera.

Zwischen der Aufnahmeserie 1 und 2 wurde die Kamera, vom Benutzer aus betrachtet, um 10 mm nach links und um 10 mm nach hinten verschoben.

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	216.83	312.58	-1.36	214.00	314.22	100.09
2	216.10	312.53	-21.29	213.65	315.11	100.36
3	215.68	313.09	-18.63	213.07	314.70	99.90
4	215.64	312.70	-6.91	212.79	314.13	100.09
5	217.06	312.76	-13.22	214.03	314.01	100.18
6	217.21	312.45	-35.08	214.12	314.25	100.18
7	217.10	312.16	-21.33	214.07	314.17	100.04
8	216.49	311.84	-24.97	213.99	314.53	100.05
9	214.97	311.66	-1.77	212.26	313.89	100.01
10	215.63	311.46	-19.85	213.01	313.77	100.15
11	216.05	311.06	-14.91	213.42	311.48	100.42
12	208.85	310.60	-6.42	206.20	310.39	100.39
13	210.01	311.05	-10.94	207.22	311.69	100.06
14	213.58	310.97	-22.19	210.75	311.77	100.17
15	214.03	310.68	-23.45	211.31	312.76	100.31
16	217.52	310.45	-18.05	215.00	311.69	100.41
17	215.68	310.73	-32.90	213.29	311.09	100.29
18	218.26	310.50	-35.38	215.76	312.19	100.13
19	220.27	311.17	-18.68	217.52	310.99	100.23
20	219.24	310.64	-19.05	216.81	312.32	100.08
21	219.43	310.53	-21.60	216.51	311.98	99.99
22	219.61	310.23	-12.00	217.42	309.59	100.58
23	220.92	310.35	-10.06	218.57	311.04	100.47
24	221.52	310.31	-7.21	219.06	312.17	100.34
25	219.01	310.45	-20.78	216.09	312.71	100.30
26	219.49	310.70	-4.63	216.97	311.51	100.23
27	221.51	310.55	-6.38	218.82	311.13	100.11
28	-	-	-	-	-	-
29	219.60	309.88	-17.79	216.73	312.77	100.06
30	219.40	311.19	-19.53	216.27	312.52	100.22
31	219.23	312.00	-15.01	216.46	314.44	100.29
32	220.53	313.96	-13.30	217.58	316.15	100.20
33	220.80	314.56	-16.15	217.97	316.82	100.19
34	220.62	313.86	-33.05	218.29	315.93	100.24
35	220.11	313.67	-16.29	217.34	315.71	100.23
36	219.79	312.98	-11.77	216.76	315.59	100.39

37	221.50	312.62	-6.96	218.33	313.73	100.25
38	221.00	312.70	1.92	217.82	314.53	100.19
39	219.87	313.18	-31.70	217.33	314.16	100.33
40	219.44	313.25	14.62	216.48	315.36	100.17
41	218.17	313.11	12.31	215.15	316.01	100.25
42	218.39	312.73	-10.99	215.85	314.63	100.32
43	218.17	312.84	-11.74	215.85	315.33	100.28
44	219.72	312.46	-17.60	217.21	314.84	100.06
45	219.92	312.70	7.81	217.27	313.36	100.37
46	219.15	311.77	-7.75	216.59	314.08	100.20
47	220.96	311.75	-1.98	218.66	313.80	100.15
48	221.89	313.05	-21.93	219.42	314.68	99.97
49	223.65	312.07	-10.64	220.49	313.65	100.21
50	224.24	312.03	8.69	221.46	312.85	100.32
51	223.65	312.19	-2.09	220.22	313.40	100.36
52	223.20	312.53	-17.28	220.70	313.49	100.42
53	224.57	312.25	-18.72	221.53	314.09	100.24
54	223.06	312.46	-16.97	220.18	313.67	100.21
55	223.79	312.52	-16.76	221.31	314.24	100.10
56	222.04	312.61	-10.86	219.24	314.80	100.14
57	221.89	312.16	-28.46	219.35	313.86	100.14
58	222.50	312.88	-4.88	219.62	313.96	100.04
59	222.21	312.04	-27.37	219.81	313.78	100.05
60	223.03	312.38	-21.64	220.21	314.33	100.09
61	222.03	312.38	-21.64	219.17	314.24	100.23
62	221.73	312.06	-8.05	218.55	313.76	100.14
63	222.16	312.12	-17.56	219.53	314.35	100.14
64	222.01	312.04	-16.08	219.09	314.24	100.16
65	222.39	311.63	-8.54	219.96	313.69	100.08
66	222.69	312.23	-10.47	219.62	313.71	100.05
67	222.67	311.87	-11.52	219.75	312.47	100.38
68	223.62	312.32	-4.66	220.36	314.63	100.07
69	223.37	312.15	-13.25	220.07	313.69	100.11
70	222.40	311.45	-26.61	219.53	311.08	100.50
71	223.37	311.57	6.12	220.15	312.16	100.11
72	223.01	311.82	-16.66	219.89	312.67	100.10
73	224.32	311.63	-34.77	220.90	312.66	100.10
74	225.64	311.57	4.11	222.98	313.58	99.94
∅	219.93	311.97	-13.87	217.16	313.52	100.20

Tabelle C.12: Messung 6 Serie 1

Berechneter Radius der Iris (ausgehend von Abstand 240 mm): 5.56475 mm

Nr.	Pupille X	Pupille Y	Rotation	Iris X	Iris Y	Iris Radius
1	394.96	317.13	-21.43	392.12	318.21	96.19
2	395.20	317.04	-16.05	392.30	317.71	96.11
3	397.11	317.50	-6.46	393.87	318.38	96.19
4	397.08	317.60	-10.08	393.72	317.96	96.28
5	396.41	317.57	-8.55	393.30	318.29	96.23
6	396.64	317.70	-2.36	393.48	318.57	96.31
7	395.23	317.90	-16.77	392.01	317.97	96.27
8	395.18	317.82	-22.27	392.51	319.65	96.00
9	395.89	318.01	-11.68	393.13	319.34	96.05
10	395.70	318.03	-3.84	392.72	318.32	96.20
11	-	-	-	-	-	-
12	392.55	315.18	-18.25	389.99	316.59	96.06
13	393.50	316.53	-12.13	390.81	316.86	96.32
14	395.06	316.52	-17.01	392.37	317.07	96.23
15	394.57	316.54	-17.98	391.59	318.32	95.84
16	394.76	316.93	-12.13	391.95	318.40	95.99
17	394.34	316.96	4.28	391.05	317.29	96.20
18	394.73	317.32	-13.76	391.55	317.90	96.23
19	395.58	316.94	3.36	392.73	318.12	96.12
20	394.74	317.33	-12.61	391.88	318.33	95.90
21	395.73	317.32	-13.76	392.53	317.14	96.31
22	394.67	316.87	-18.14	391.39	317.38	96.23
23	395.49	317.07	-9.84	392.83	318.39	96.17
24	395.61	317.41	-5.28	392.51	318.83	96.28
25	394.71	317.39	-12.81	391.84	318.85	95.96
26	395.20	317.06	-8.28	391.96	318.09	96.23
27	394.31	317.23	-11.76	391.35	318.55	96.28
28	395.32	317.39	-1.64	392.31	318.11	96.35
29	395.48	317.21	-16.28	392.41	318.17	96.25
30	395.36	317.56	-5.14	392.28	319.25	96.08
31	395.97	317.51	-6.16	392.63	319.25	95.95
32	393.43	317.29	-8.43	390.43	319.36	96.13
33	393.78	317.17	-10.03	391.24	318.58	96.15
34	395.79	317.34	16.23	392.46	318.92	96.23
35	394.49	317.56	-1.19	391.62	318.32	96.21
36	395.60	317.79	3.63	392.29	318.35	96.15
37	394.58	317.76	-2.28	391.28	318.79	96.05
38	394.00	317.75	-3.22	391.07	319.07	96.08
39	395.26	317.79	-2.85	392.21	319.15	96.04
40	394.55	317.39	-6.64	391.39	318.85	96.13

41	395.02	317.54	-6.18	391.99	318.75	95.93
42	394.50	317.88	-4.86	391.23	319.15	96.06
43	393.60	317.32	-19.62	390.51	318.43	96.02
44	-	-	-	-	-	-
45	395.01	314.90	2.36	391.91	315.75	96.02
46	395.46	315.84	-10.94	391.95	316.71	96.11
47	395.29	316.19	7.45	391.84	316.06	96.39
48	394.63	316.22	-2.62	391.23	316.27	96.29
49	395.99	316.46	-5.75	392.61	316.09	96.35
50	396.36	316.39	-3.30	392.71	316.45	96.45
51	395.89	316.44	-9.26	392.25	317.47	96.19
52	396.36	316.71	0.65	393.11	316.56	96.31
53	395.13	316.69	-17.13	391.86	317.08	96.33
54	396.10	316.98	0.30	392.87	317.16	96.30
55	396.80	316.93	-5.81	393.55	317.02	96.31
56	396.57	317.05	-2.09	393.03	317.67	96.10
57	396.97	316.80	0.10	393.65	317.07	96.31
58	395.55	317.41	1.40	392.26	318.12	96.11
59	395.55	317.56	1.03	392.46	318.64	96.14
60	396.31	317.69	-13.50	393.46	318.62	96.23
61	395.70	317.61	-3.52	392.24	318.87	96.19
62	395.04	317.66	-19.33	392.26	318.57	96.21
∅	395.27	317.15	-7.50	392.17	318.02	96.17

Tabelle C.13: Messung 6 Serie 2

Berechnete Verschiebung:

X-Achse: 10.1455 mm

Y-Achse: 0.299748 mm

Z-Achse: 8.997 mm

d.h. die Verschiebung um 10 mm nach links konnte sehr genau detektiert werden, die Verschiebung um 10 mm nach hinten wurde ebenfalls detektiert, dabei war die Ungenauigkeit nur halb so groß wie in Messreihe 5.

Bisher erschienen

Arbeitsberichte aus dem Fachbereich Informatik

(<http://www.uni-koblenz.de/fb4/publikationen/arbeitsberichte>)

Lutz Priebe, Frank Schmitt, Paul Lemke: Automatische See-Through Kalibrierung, Arbeitsberichte aus dem Fachbereich Informatik, 07/2007

Rüdiger Grimm, Robert Krimmer, Nils Meißner, Kai Reinhard, Melanie Volkamer, Marcel Weinand, Jörg Helbach: Security Requirements for Non-political Internet Voting, Arbeitsberichte aus dem Fachbereich Informatik, 06/2007

Daniel Bildhauer, Volker Riediger, Hannes Schwarz, Sascha Strauß, „grUML – Eine UML-basierte Modellierungssprache für T-Graphen“, Arbeitsberichte aus dem Fachbereich Informatik, 05/2007

Richard Arndt, Steffen Staab, Raphaël Troncy, Lynda Hardman: Adding Formal Semantics to MPEG-7: Designing a Well Founded Multimedia Ontology for the Web, Arbeitsberichte aus dem Fachbereich Informatik, 4/2007

Simon Schenk, Steffen Staab: Networked RDF Graphs, Arbeitsberichte aus dem Fachbereich Informatik, 3/2007

Rüdiger Grimm, Helge Hundacker, Anastasia Meletiadou: Anwendungsbeispiele für Kryptographie, Arbeitsberichte aus dem Fachbereich Informatik, 2/2007

Anastasia Meletiadou, J. Felix Hampe: Begriffsbestimmung und erwartete Trends im IT-Risk-Management, Arbeitsberichte aus dem Fachbereich Informatik, 1/2007

„Gelbe Reihe“

(<http://www.uni-koblenz.de/fb4/publikationen/gelbereihe>)

Lutz Priebe: Some Examples of Semi-rational and Non-semi-rational DAG Languages. Extended Version, Fachberichte Informatik 3-2006

Kurt Lautenbach, Stephan Philippi, and Alexander Pinl: Bayesian Networks and Petri Nets, Fachberichte Informatik 2-2006

Rainer Gimnich and Andreas Winter: Workshop Software-Reengineering und Services, Fachberichte Informatik 1-2006

Kurt Lautenbach and Alexander Pinl: Probability Propagation in Petri Nets, Fachberichte Informatik 16-2005

Rainer Gimnich, Uwe Kaiser, and Andreas Winter: 2. Workshop "Reengineering Prozesse" – Software Migration, Fachberichte Informatik 15-2005

Jan Murray, Frieder Stolzenburg, and Toshiaki Arai: Hybrid State Machines with Timed Synchronization for Multi-Robot System Specification, Fachberichte Informatik 14-2005

Reinhold Letz: FTP 2005 – Fifth International Workshop on First-Order Theorem Proving, Fachberichte Informatik 13-2005

Bernhard Beckert: TABLEAUX 2005 – Position Papers and Tutorial Descriptions, Fachberichte Informatik 12-2005

Dietrich Paulus and Detlev Droege: Mixed-reality as a challenge to image understanding and artificial intelligence, Fachberichte Informatik 11-2005

Jürgen Sauer: 19. Workshop Planen, Scheduling und Konfigurieren / Entwerfen, Fachberichte Informatik 10-2005

Pascal Hitzler, Carsten Lutz, and Gerd Stumme: Foundational Aspects of Ontologies, Fachberichte Informatik 9-2005

Joachim Baumeister and Dietmar Seipel: Knowledge Engineering and Software Engineering, Fachberichte Informatik 8-2005

Benno Stein and Sven Meier zu Eißel: Proceedings of the Second International Workshop on Text-Based Information Retrieval, Fachberichte Informatik 7-2005

Andreas Winter and Jürgen Ebert: Metamodel-driven Service Interoperability, Fachberichte Informatik 6-2005

Joschka Boedecker, Norbert Michael Mayer, Masaki Ogino, Rodrigo da Silva Guerra, Masaaki Kikuchi, and Minoru Asada: Getting closer: How Simulation and Humanoid League can benefit from each other, Fachberichte Informatik 5-2005

Torsten Gipp and Jürgen Ebert: Web Engineering does profit from a Functional Approach, Fachberichte Informatik 4-2005

Oliver Obst, Anita Maas, and Joschka Boedecker: HTN Planning for Flexible Coordination Of Multiagent Team Behavior, Fachberichte Informatik 3-2005

Andreas von Hessling, Thomas Kleemann, and Alex Sinner: Semantic User Profiles and their Applications in a Mobile Environment, Fachberichte Informatik 2-2005

Heni Ben Amor and Achim Rettinger: Intelligent Exploration for Genetic Algorithms – Using Self-Organizing Maps in Evolutionary Computation, Fachberichte Informatik 1-2005