

# Auswahlverfahren für HRTFs zur 3D Sound Synthese

Thomas Grasser, Martin  
Rothbacher, Klaus Diepold





Technical Report

# Auswahlverfahren für HRTFs zur 3D Sound Synthese

Thomas Grasser, Martin Rothbucher, Klaus Diepold

14. April 2014



Lehrstuhl für Datenverarbeitung  
Technische Universität München



Eingereicht am 14. April 2014  
von Thomas Grasser, Martin Rothbucher, Klaus Diepold

Betreut von Prof. Dr.-Ing. K. Diepold

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Technische Universität München

Dieses Werk ist unter einem Creative Commons Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Deutschland Lizenzvertrag lizenziert. Um die Lizenz anzusehen, gehen Sie bitte zu <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/> oder schicken Sie einen Brief an Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California 94105, USA.

# Kurzfassung

Um einem Monosoundsignal künstlich eine Richtung aufzuprägen verwendet man Head-Related-Transfer-Functions (HRTFs). Da diese für jeden Menschen unterschiedlich sind, müsste man diese messen. Eine andere Möglichkeit wäre, dass man HRTFs aus einer Datenbank verwendet. Um die am besten geeigneten HRTFs aus einer Datenbank auszuwählen, gibt es verschiedene Ansätze. In dieser Arbeit wird die Auswahl durch einen „Listening-Test“ behandelt. Es werden zwei verschiedene Verfahren miteinander verglichen und im Anschluss daran getestet, ob mit den Verfahren eine Verbesserung gegenüber den KEMAR-Kunstkopf HRTFs erzielt werden kann.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1. Motivation für diese Arbeit . . . . .	7
1.2. Ziele der Arbeit . . . . .	7
1.2.1. Theoretisches Ziel . . . . .	7
1.2.2. Praktisches Ziel . . . . .	7
<b>2. HRTF - eine allgemeine Beschreibung</b>	<b>9</b>
2.1. Räumliches Hören . . . . .	9
2.2. Head-Related-Transfer-Function (HRTF) . . . . .	10
<b>3. HRTF Individualisierung</b>	<b>11</b>
3.1. Verwendung der KEMAR-Kunstkopf-HRTF . . . . .	11
3.2. Messen der eigenen HRTF . . . . .	12
3.3. Auswahl der HRTF aus einer Datenbank . . . . .	12
3.3.1. Anthropometrische Daten . . . . .	12
3.3.2. Regressionsberechnungen . . . . .	12
3.3.3. Hörversuche . . . . .	13
<b>4. Implementierung der Hörversuche</b>	<b>15</b>
4.1. Auswahl der HRTF Datenbank . . . . .	15
4.2. DOMISO-Methode . . . . .	17
4.2.1. Allgemeine Beschreibung des Quellcodes . . . . .	17
4.2.2. Besonderheiten bei der Implementierung . . . . .	19
4.3. Seeber-Fastl-Methode . . . . .	20
4.3.1. Allgemeine Beschreibung des Quellcodes . . . . .	20
4.4. Test der Verfahren . . . . .	22
<b>5. Versuche</b>	<b>25</b>
5.1. Durchführung . . . . .	25
5.2. Ergebnisse . . . . .	28
<b>6. Ausblick</b>	<b>31</b>
6.1. Verbesserungen bei der Individualisierung . . . . .	31
6.2. Gemessene HRTFs an der TU München . . . . .	32
<b>A. Anhang</b>	<b>35</b>

*Inhaltsverzeichnis*

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>50</b>
<b>Bibliography</b>	<b>52</b>

# 1. Einleitung

## 1.1. Motivation für diese Arbeit

Die Forschung zum 3D Audiosound schreitet immer weiter voran. Inzwischen gibt es schon viele Ideen zur Anwendung im Alltag, sie gehen von 3DTV [14] über Navigation für Blinde [10] bis zur Anwendung in Telekonferenzsystemen [11]. Wie bei vielen technischen Produkten ahmt der Mensch Dinge nach, die in der Natur problemlos funktionieren. Wenn mehrere Menschen gleichzeitig in einem Raum sprechen, dann ist der Mensch in der Lage einen Sprecher zu extrahieren, da das menschliche Gehör verschiedene Richtungen wahrnehmen kann. Diesen Effekt könnte man beispielsweise bei einer Telefonkonferenz mit mehr als zwei Teilnehmern ausnutzen. Wenn mehrere Teilnehmer gleichzeitig sprechen, dann ist es sehr schwierig sich in einem Mono-Signal auf einen Sprecher zu konzentrieren. Im Gegensatz dazu kann man bei einer künstlichen räumlichen Verteilung der Sprecher mithilfe von HRTFs eine Differenzierung durchführen. Damit dies problemlos funktioniert, bräuchte man von jedem Anwender die persönlichen HRTFs, was in der Praxis schwer durchführbar ist. Um die HRTFs für jeden einzelnen Nutzer zu bestimmen, müsste jeder von ihnen seine eigenen HRTFs durch Messungen in einem Labor bestimmen lassen [4]. Das ist nicht nur sehr aufwendig, sondern ist auch mit sehr kostspieligem Equipment verbunden. Aus diesem Grund wäre es von großem Vorteil, wenn man die HRTFs nicht für jeden Menschen individuell bestimmen müsste, sondern aus einer Datenbank die HRTFs auswählen könnte, die am besten passen und mit denen trotzdem eine annehmbare Qualität erreicht werden kann.

## 1.2. Ziele der Arbeit

### 1.2.1. Theoretisches Ziel

Das theoretische Ziel dieser Arbeit ist herauszufinden, ob man durch eine Individualisierung der HRTFs anhand von „Listening-Tests“ bessere Ergebnisse in der Richtungs-wahrnehmung erzielen kann, als mit den Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research (KEMAR)-HRTFs.

### 1.2.2. Praktisches Ziel

Im praktischen Teil dieser Arbeit soll ein Matlabprogramm entstehen, mit dem man aus einer Datenbank mit HRTFs durch Hörtests das am besten passende auswählt.



## 2. HRTF - eine allgemeine Beschreibung

HRTF bedeutet auf Deutsch Außenohrübertragungsfunktion. Übertragungsfunktionen beschreiben ein Ausgangssignal in Abhängigkeit vom Eingangssignal im Frequenzbereich. Die entsprechende Funktion im Zeitbereich wird Head-Related-Impulse-Response (HRIR) genannt. Für was wir diese sogenannten Außenohrübertragungsfunktionen benötigen, wird in diesem Kapitel genauer erläutert.

### 2.1. Räumliches Hören

Menschen mit einem funktionierenden Gehör sind in der Lage Schallquellen zu orten. Wenn sich die Schallquelle nicht in der Vertikalebene zwischen den zwei Ohren befindet, dann entsteht ein Laufzeitunterschied (Interaural Time Difference (ITD)) zwischen den Schallwellen zum einen und denen zum anderen Ohr. Diese Phasendifferenz kann aber nur bis zu einer Frequenz von ca. 1,5kHz ausgewertet werden [5], da die Phaseninformation sonst mehrdeutig wird. Wie man in diesen zwei Gleichung

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{343 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1500 \text{Hz}} = 22,9 \text{cm} \quad (2.1)$$

und

$$\frac{\lambda}{2} = 11,4 \text{cm} \quad (2.2)$$

( $\lambda$  entspricht der Wellenlänge,  $c$  der Schallgeschwindigkeit in Luft und  $f$  der Frequenz) sehen kann ist die halbe Wellenlänge bei einer Frequenz von 1,5kHz 11,4cm, was in der Regel kleiner ist als die Kopfbreite.

Bei größeren Frequenzen wird die Wellenlänge zu kurz, so dass der Phasenversatz schon größer als eine halbe Wellenlänge ist.

Desweiteren entsteht ein Pegelunterschied (Interaural Intensity Difference (IID)) an den Ohren durch Dämpfungen an der Luft und am Kopf, aus dem auch bei Frequenzen über 1,5kHz Richtungsinformationen gewonnen werden können. Für Schallquellen in der Vertikalebene, in der beide Ohren sind, sind der ITD und der IID Wert beide gleich null [5]. Trotzdem können wir Schalle bei verschiedenen Elevationswinkeln lokalisieren. Aus diesem Grund muss es für unser Gehör noch eine zusätzliche Möglichkeit geben, die Schallquellen zu orten. An dieser Stelle kommen die HRTFs ins Spiel, die im nächsten Abschnitt genauer erläutert werden. Zur Richtungswahrnehmung tragen aber nicht nur die Ohren, sondern auch die Augen bei. Schalle von Quellen, die wir nicht mit den Augen sehen können, werden von unserem Gehirn als nicht aus dem Blickfeld kommend bewertet.

## 2. HRTF - eine allgemeine Beschreibung

### 2.2. HRTF

Die Schallwellen werden auf dem Weg von der Schallquelle bis zum Eintreffen auf dem Trommelfell verändert. Je nachdem aus welcher Richtung die Schallwellen kommen, werden sie vom Kopf, den Schultern und den Ohren für die jeweilige Richtung typisch verändert. Das menschliche Gehirn kann diesen Veränderungen eine Richtung zuordnen. Da die HRTFs die Übertragungsfunktionen von der Schallquelle bis zu den Ohren sind, enthalten sie nicht nur die Veränderungen der Schalle, sondern auch die ITD und die IID. Diese Eigenschaften des Gehörs möchte man nutzen, um dem Gehirn künstlich eine bestimmte Quellposition vorzuspielen. Dazu braucht man die Übertragungsfunktionen von der Schallquelle zum Trommelfell für alle möglichen Richtungen. Da man diese nicht direkt messen kann, muss man die Übertragungsfunktionen rechnerisch aus einem bekanntem Soundsignal und aus den mit einem Mikrophon im Gehörgang aufgenommenen Schallwellen rechnerisch bestimmen.



**Abbildung 2.1.:** Aufnahme der Schallwellen im Ohr mit einem Mikrophon

### 3. HRTF Individualisierung

Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie man zu HRTFs kommt. Die naheliegendste ist das Messen der eigenen HRTF. Es gibt aber auch HRTFs von einem Kunstkopf, die man verwenden könnte. Die letzte Möglichkeit ist die Auswahl der am besten zu einem passenden HRTFs aus einer Datenbank von gemessenen HRTFs. Bei der Auswahl sind wiederum zwei Möglichkeiten denkbar. Entweder man sucht nach HRTFs von Personen mit ähnlichen physischen Abmessungen oder man wählt die HRTFs anhand von einem „Listening-Test“ aus.

#### 3.1. Verwendung der KEMAR-Kunstkopf-HRTF

Der KEMAR-Kunstkopf ist eine Nachbildung des menschliche Kopfes zur binauralen Tonaufnahme von der Firma G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, Dänemark. Die Maße des Kunstkopfes mit Oberkörper entsprechen laut Herstellerangaben dem weltweiten Durchschnitt [2].



**Abbildung 3.1.:** Der KEMAR-Kunstkopf von der Firma G.R.A.S. Sound & Vibration A/S, Dänemark [2]

Die Messungen der HRTF mit dem KEMAR sind leichter durchzuführen als bei einem Menschen. Der Kunstkopf hat mehrere Vorteile bei den Messungen:

### 3. HRTF Individualisierung

- Der KEMAR bewegt sich nicht.
- Der KEMAR braucht keine Halterung für den Kopf, damit er sich nicht bewegt und die wieder Reflexionen erzeugt.
- Der KEMAR verursacht selber keine Schalle.

Wobei das Verwenden der KEMAR-Kunstkopf HRTFs noch nichts mit einer Individualisierung zu tun hat. Es ist die einfachste Form überhaupt, HRTFs zu erzeugen.

### 3.2. Messen der eigenen HRTF

Durch das Messen der eigenen HRTF müsste man eigentlich die besten Ergebnisse erzielen können, da alle physischen Parameter genau passen. Aber das Messen der HRTF ist nicht nur sehr zeitaufwändig und anstrengend, sondern es gibt noch andere Schwierigkeiten. Körpereigene Laute wie Räuspern, Schlucken und Atmung können die Messungen beeinflussen. Außerdem darf man den Kopf nicht bewegen, sonst verfälscht man die Richtungen. Abhilfen mit einem Tracking-System für die genaue Kopfposition sind sehr komplex. Um Echos in den HRTFs zu vermeiden braucht man zusätzlich einen reflexionsarmen Raum, der nur wenigen Forschern zur Verfügung steht.

### 3.3. Auswahl der HRTF aus einer Datenbank

Im Internet sind mehrere Datenbanken mit gemessenen HRTFs verfügbar, aus denen man ein möglichst gut passendes auswählen kann. In den veröffentlichten wissenschaftlichen Arbeiten wird hauptsächlich auf die physischen Maße von den Ohren und des Kopfes eingegangen. Anhand von diesen Werten werden dann nach einem bestimmten Algorithmus passende HRTF aus einer Datenbank ausgewählt. Aber es gibt auch zwei Paper, die die Auswahl mit „Listening-Tests“ behandeln [9] und [13].

#### 3.3.1. Anthropometrische Daten

Man kann ein Foto vom Ohr mit der Webcam aufnehmen und daraus die Maße des Kopfes und der Ohren gewinnen. Anschließend kann man alle Werte mit denen aus der Datenbank vergleichen und die HRTF mit den geringsten Abweichungen auswählen [16].

#### 3.3.2. Regressionsberechnungen

Regressionsberechnung bedeutet im allgemeinen, dass man versucht einen Zusammenhang zwischen zwei Datenreihen (x-Werte und y-Werte) zu finden. Im Fall der HRTF-Individualisierung versteht man darunter, dass man die HRTFs aus den anthropometrischen Daten eines Menschen berechnet. Das funktioniert aber nur, wenn man zuvor ei-

ne Berechnungsvorschrift aus gemessenen HRTFs und den zugehörigen anthropometrischen Daten gefunden hat. Zu diesem Thema gibt es auch mehrere Arbeiten [7], [12] und [8].

#### 3.3.3. Hörversuche

Der Hauptteil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Personalisierung von HRTFs mit „Listening-Tests“. Dazu gibt es eine Veröffentlichung von Bernhard U. Seeber und Hugo Fastl mit dem Titel „Subjective selection of non-individual head-related transfer functions“ [13] und eine weitere von Yukio Iwaya mit dem Titel „Individualization of head-related transfer functions with tournament-style listening test: Listening with other’s ears“ [9]. Bevor im nächsten Kapitel die Algorithmen zur Individualisierung, die im Rahmen dieser Arbeit implementiert wurden, erklärt werden, wird in den nächsten beiden Unterpunkten auf den Inhalt der beiden Paper eingegangen.

#### Domiso

Die erste hier behandelte Methode zur HRTF-Individualisierung anhand von „Listening-Tests“ stammt aus dem Jahr 2006 von Yukio Iwaya [9]. Im Gegensatz zur Seeber-Methode bestimmt man hier nicht selbst, welche HRTFs man hören möchte, sondern man bekommt immer zwei Testsounds hintereinander vorgespielt. Danach muss man sich entscheiden, welcher der beiden Sounds die Richtungen besser wiedergibt. Auf die Reihenfolge und welche HRTFs man zu hören bekommt, hat die Testperson keinen Einfluss. Für die Ermittlung der Paarungen wird ein „Swiss-Style-Tournament-Verfahren“ verwendet. Als Testsound wurde bei dieser Methode Rosa Rauschen mit der Dauer 1s, 16 bit Auflösung und einer Abtastrate von 48kHz verwendet. Der Testsound bewegt sich in 30°-Schritten von vorne beginnend einmal linksherum um den Kopf auf der horizontalen Ebene der Ohren.

Erklärung Swiss-Style-Tournament [3]:

Das Schweizer-System wurde am 15. Juni 1895 zum ersten Mal bei einem Schachturnier in Zürich eingesetzt und als Erfinder gilt Julius Müller. Durch diese Turnierform wird vermieden, dass jeder gegen jeden antreten muss, was eine große Zeitersparnis mit sich bringt. Für die erste Runde wird die Position der Teilnehmer entweder ausgelost oder bestimmt. Es kämpft immer der Erstplatzierte gegen den Zweiten, der Dritte gegen den Vierten und so weiter. Jedoch gibt es jede Paarung nur einmal. Deshalb muss ab der zweiten Runde sichergestellt werden, dass immer der Führende unter den verbleibenden Spielern gegen den bestplatzierten Teilnehmer, gegen den er noch nicht gespielt hat, antritt. Um einen klaren Sieger und Verlierer zu ermitteln, wird der aufgerundete Logarithmus zur Basis zwei von der Anzahl der Teilnehmer in Runden benötigt. Bei 12 Teilnehmern braucht man demzufolge

### 3. HRTF Individualisierung

$$\log_2 12 = 3,58, \quad (3.1)$$

also vier Runden.

#### **Seeber-Fastl-Methode**

In diesem Abschnitt wird das von Bernhard U. Seeber und Hugo Fastl 2003 veröffentlichte Auswahlverfahren zur HRTF-Individualisierung vorgestellt [13]. Als Testsound werden 5 Pulse weißes Rauschen (20Hz bis 20kHz) mit einer Dauer von 30ms, auf die jeweils eine 70ms Pause folgt, verwendet. Der Hörer bekommt 5 Winkel (-40°, -20°, 0°, 20°, 40°) in der horizontalen Ebene der Ohren vorgespielt, wobei sich der 0° Winkel direkt vor dem Kopf befindet. Außerdem werden bei diesem Verfahren die HRTFs aus dem AUDIS-Katalog verwendet, die im Internet leider nicht verfügbar sind. Da dieser Katalog die HRTF in der horizontalen Ebene in 15° Schritten enthält, musste für die verwendeten Winkel eine Interpolation gemacht werden, auf die aber in diesem Paper nicht näher eingegangen wurde. Bei dieser Methode wird in einem Zweischrittverfahren ein HRTF aus 12 ausgewählt, das von der Testpersonen am besten mit einer Ziffer von 0-9 bewertet wurde. Im ersten Schritt werden 5 HRTFs aus den 12 ausgewählt, die nach Meinung der Testperson die beste räumliche Übereinstimmung haben. Im zweiten Schritt wird dann letztlich eine HRTF aus den verbleibenden 5 nach folgenden Kriterien bestimmt:

- Die wahrgenommene Soundrichtung ist zwischen -40° und +40°, aber nicht weiter auf der Seite.
- Der Sound bewegt sich horizontal in räumlich gleich großen Schritten.
- Der Elevations-Winkel ist bei allen 5 Winkeln gleich groß.
- Der Sound wird in der „Vor-dem-Kopf“-Ebene mit einem konstanten Abstand und vorzugsweise weit weg wahrgenommen.

Bei diesem Verfahren kann man sich die Testsounds anhören, indem man die entsprechende Zahl auf der Tastatur eingibt. Dies ermöglicht, dass man sich ähnlich klingende HRTFs zum Vergleich direkt hintereinander anhören kann und das auch mehrmals. Desweiteren können so HRTFs, die überhaupt nicht passen, nach dem ersten Hören nicht mehr berücksichtigt werden. Jeder Testsound wird nach dem Hören mit einer Ziffer von 0-9 bewertet.

## 4. Implementierung der Hörversuche

Für die drei Programme zur HRTF-Individualisierung und zur Ergebnisbewertung wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Graphical User Interface (GUI) mit Matlab implementiert, damit die Anwendungen auch für mit Matlab ungeübte Testpersonen geeignet sind.

### 4.1. Auswahl der HRTF Datenbank

Im Internet sind mehrere HRTF Datenbanken (IRCAM [15], CIPIC [4], MIT [6], ARI [1]) vorhanden, aus denen eine für diese Arbeit benötigt wird. Da die Datenbanken große Unterschiede aufweisen werden sie zuerst miteinander verglichen (Siehe Tabelle 4.1), bevor eine ausgewählt wird. Die Wahl fiel auf die CIPIC-Datenbank, zum einen weil sie in vielen anderen Arbeiten auch verwendet wurde, zum anderen weil sie KEMAR-HRTFs enthält.

Damit die Tests nicht zu lange dauern und auch vom Schwierigkeitsgrad her durchführbar bleiben, wird in dieser Arbeit die Anzahl der HRTFs auf 12 beschränkt, wie in dem Paper von Bernhard U. Seeber [13]. Die verwendete CIPIC-Datenbank enthält 45 gemessene HRTFs, wobei es für 8 keine anthropometrischen Daten gibt. Die verbleibenden 37 HRTFs werden nach der Kopfbreite sortiert und dann werden manuell 3 HRTFs, die sich erst in der dritten Nachkommastelle von ihrem Nachbarn unterscheiden, aussortiert. Aus den restlichen 34 HRTF wird jedes dritte HRTF ausgewählt, so dass 12 übrig bleiben. Das bedeutet, dass die 12 verbleibenden HRTFs möglichst verschiedene Kopfbreiten aufweisen.

#### 4. Implementierung der Hörversuche

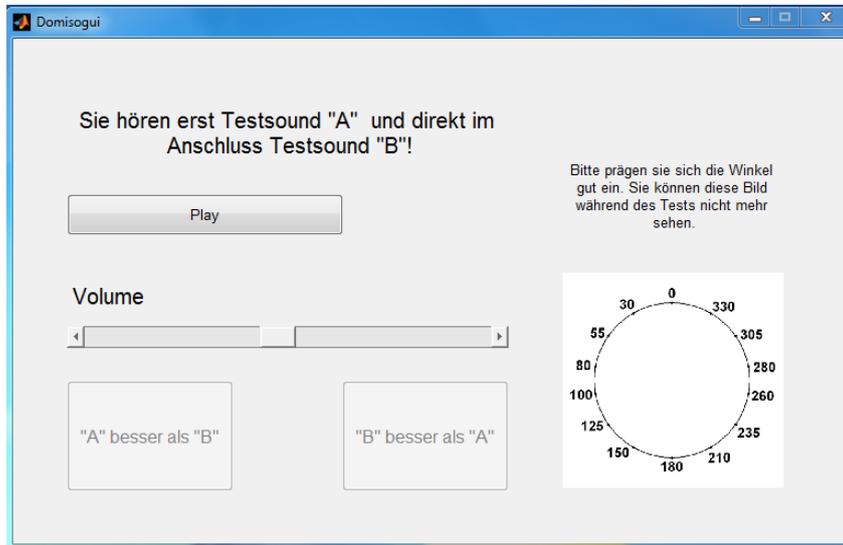
	<b>CIPIC</b>	<b>IRCAM</b>	<b>ARI</b>	<b>MIT</b>
<b>Personen Insgesamt</b>	45	51	68 im Ohr gemessen (9 hinter dem Ohr gemessen)	1
<b>Männer</b>	26	34	Angaben nur für 15 Personen	—
<b>Frauen</b>	17	17		—
<b>Richtungen Insgesamt</b>	1250	187	1550	710
<b>Azimuth</b>	25 (-80° bis +80°)	(0° bis +360°)	144 (0° bis +360°)	72 (0° bis +360°)
<b>Elevation</b>	50 (-45° bis +230,625°)	(-45° bis +90°)	(-30° bis +80°)	(-40° bis +90°)
<b>Kemar</b>	2 (große und kleine Ohren)	nicht vorhanden	nicht vorhanden	1
<b>Testsounds Sampelfrequenz</b>	44,1kHz, 16bit	44,1kHz	48kHz	44,1kHz
<b>Sampellänge HRTFs</b>	200	512 (compensated), 8192 (raw)	256	512
<b>Anthro- pometrische Daten</b>	17 Werte Kopf, 10 Werte Ohrmuschel	Unterscheidung männlich/weib- lich, Frisur	bei 15 Personen (12 männlich, 3 weiblich)	Herstellerangaben [2]
<b>Mikrophon</b>	Etymotic Research ER-7c probe microphone	Knowless FG 3329	Sennheiser Ke-4-211-2	Etymotic ER-11
<b>Mat-Dateien verfügbar</b>	ja	ja	ja	ja

**Tabelle 4.1.:** Vergleich der HRTF Datenbanken

## 4.2. DOMISO-Methode

Die im Rahmen dieser Arbeit entstandene Implementierung wird hier vorgestellt.

### 4.2.1. Allgemeine Beschreibung des Quellcodes



**Abbildung 4.1.:** Screenshot des GUI zur Individualisierung mit der Domiso-Methode

In diesem Programm gibt es zum Paper [9] eine kleine Änderung. Anstatt einem Rundlauf mit konstanten  $30^\circ$ -Abständen, bekommt die Testperson die Winkel  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $125^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $210^\circ$ ,  $235^\circ$ ,  $260^\circ$ ,  $280^\circ$ ,  $305^\circ$  und  $330^\circ$  zu hören, da die CIPIC-Datenbank die Daten für einen konstanten  $30^\circ$ -Abstand nicht enthält. Im Quellcode gibt es zwei wichtige Matrizen (RANK, CHART) mit deren Hilfe die Duelle im Swiss-Style-Tournament Verfahren gefunden werden. Die Matrix „RANK“ besteht aus 12 Zeilen, eine für jedes HRTF, und aus vier Spalten. In der vierten Spalte ist die Nummerierung der HRTFs von 1 bis 12, damit nach Vertauschung der Reihenfolge immer noch klar ist, um welches HRTF es sich handelt. Bei einem Duell bekommt der Sieger in die erste Spalte eine „1“, in die zweite eine „0“ addiert und in die dritte eine „1“ eingetragen. Beim Verlierer-HRTF werden die ersten beiden Spalten genau umgedreht eingetragen. So kann man in jeder Zeile sehen, wie oft ein HRTF schon gewonnen oder verloren hat. Die „1“ in der dritten Spalte kennzeichnet, dass das HRTF in dieser Runde schon ein Duell hatte. Wenn in der 3. Spalte in jeder Zeile eine „1“ steht, dann beginnt wieder eine neue Runde und die komplette Spalte wird wieder auf „0“ gesetzt. Die Matrix „CHART“ enthält 12 Zeilen und 12 Spalten. In ihr werden die Duelle mit ihren Siegern gespeichert. Das Sieger-HRTF bekommt eine „1“ in seine Spalte in die Zeile des Verlierer-HRTF. Am Ende werden bei-

#### 4. Implementierung der Hörversuche

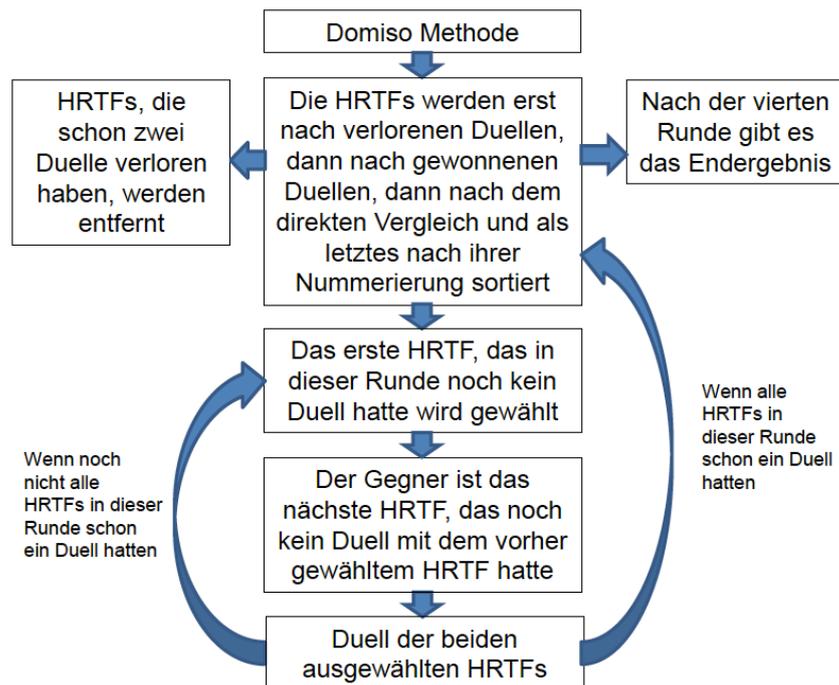


Abbildung 4.2.: Flussdiagramm der Domiso-Methode

de Matrizen in der globalen Variablen „X“ gespeichert. In der ersten Runde duellieren sich immer zwei benachbarte Zeilen. Wenn alle HRTFs an einem Duell teilgenommen haben, wird die „RANK“-Matrix erst aufsteigend nach der zweiten Spalte sortiert und bei Übereinstimmung absteigend nach der ersten Spalte. Das bedeutet, dass im zweiten Durchlauf jeweils unter den Siegern und unter den Verlierern die Duelle stattfinden. Daraus resultieren dann zwangsläufig drei HRTFs, die zwei Duelle verloren haben. In der Beschreibung von DOMISO steht, dass HRTFs, die schon zweimal ein Duell verloren haben, aus dem Tournament-Verfahren ausscheiden. Da dies bei 12 teilnehmenden HRTFs aber im zweiten Schritt eine ungerade Anzahl, nämlich drei, gibt, werden nur zwei in diesem Schritt herausgestrichen. Das dritt letzte HRTF wird noch für ein weiteres Duell verwendet. Daraus folgt, dass es in der dritten Runde noch 5 Paarungen gibt. Die Paarungen in der dritten Runde werden dann ein wenig komplexer, da erstmals HRTFs nebeneinander stehen können, die sich vorher schon in einem Duell gegenüber standen. Deshalb wird zu Beginn der dritten Runde das HRTF ausgewählt, das an der ersten Stelle steht. Der Gegner ist das nächstplatzierte HRTF, das noch nicht gegen das erste im Duell stand. Für das zweite Duell wird das erste HRTF gewählt, das in der dritten Runde noch nicht an einem Duell teilgenommen hat. Die vierte und letzte Runde funktioniert wie die dritte.

### 4.2.2. Besonderheiten bei der Implementierung

Wenn ab der dritten Runde mehrere HRTFs die gleiche Anzahl an verlorenen und gewonnenen Duellen haben, dann entscheidet der direkte Vergleich. Die folgenden Codezeilen tauschen die Position benachbarter HRTFs in der Matrix „RANK“, wenn sie die gleiche Anzahl an gewonnenen und verlorenen Duellen haben und das schlechter platzierte HRTF den direkten Vergleich gewonnen hat.

```

for l=1:12
  for k=1:10
    if RANK(k,1)==RANK(k+1,1) && RANK(k,2)==RANK(k+1,2)

      if CHART(RANK(k,4),RANK(k+1,4))==1
        temp=RANK(k,:);
        RANK(k,:)=RANK(k+1,:);
        RANK(k+1,:)=temp;
      end

      elseif RANK(k,1)==RANK(k+2,1) && RANK(k,2)==RANK(k+2,2)

        if CHART(RANK(k,4),RANK(k+1,4))==1
          temp=RANK(k,:);
          RANK(k,:)=RANK(k+1,:);
          RANK(k+1,:)=temp;
        end

      end
    end

    if RANK(11,1)==RANK(12,1) && RANK(11,2)==RANK(12,2)

      if CHART(RANK(11,4),RANK(12,4))==1
        temp=RANK(11,:);
        RANK(11,:)=RANK(12,:);
        RANK(12,:)=temp;
      end
    end

  end
end
end

```

#### 4. Implementierung der Hörversuche

Das folgende Codestück beschäftigt sich mit dem Problem, wenn die letzten beiden verbleibenden HRTFs schon gegeneinander angetreten sind. Man kann das Duell ja dann nicht einfach weglassen, weil sonst die Punkteanzahl mit den übrigen HRTFs nicht mehr vergleichbar ist. In vielen Testrunden ist dieses Problem nur bei einer ungeraden Anzahl an HRTFs, die schon zweimal ein Duell verloren haben aufgetreten. Der Code tauscht dann das HRTF, das schon ausgeschieden ist, mit einem anderen HRTF, das auch schon ausgeschieden ist und bei dem noch kein direkter Vergleich mit dem anderen übrigen HRTF existiert.

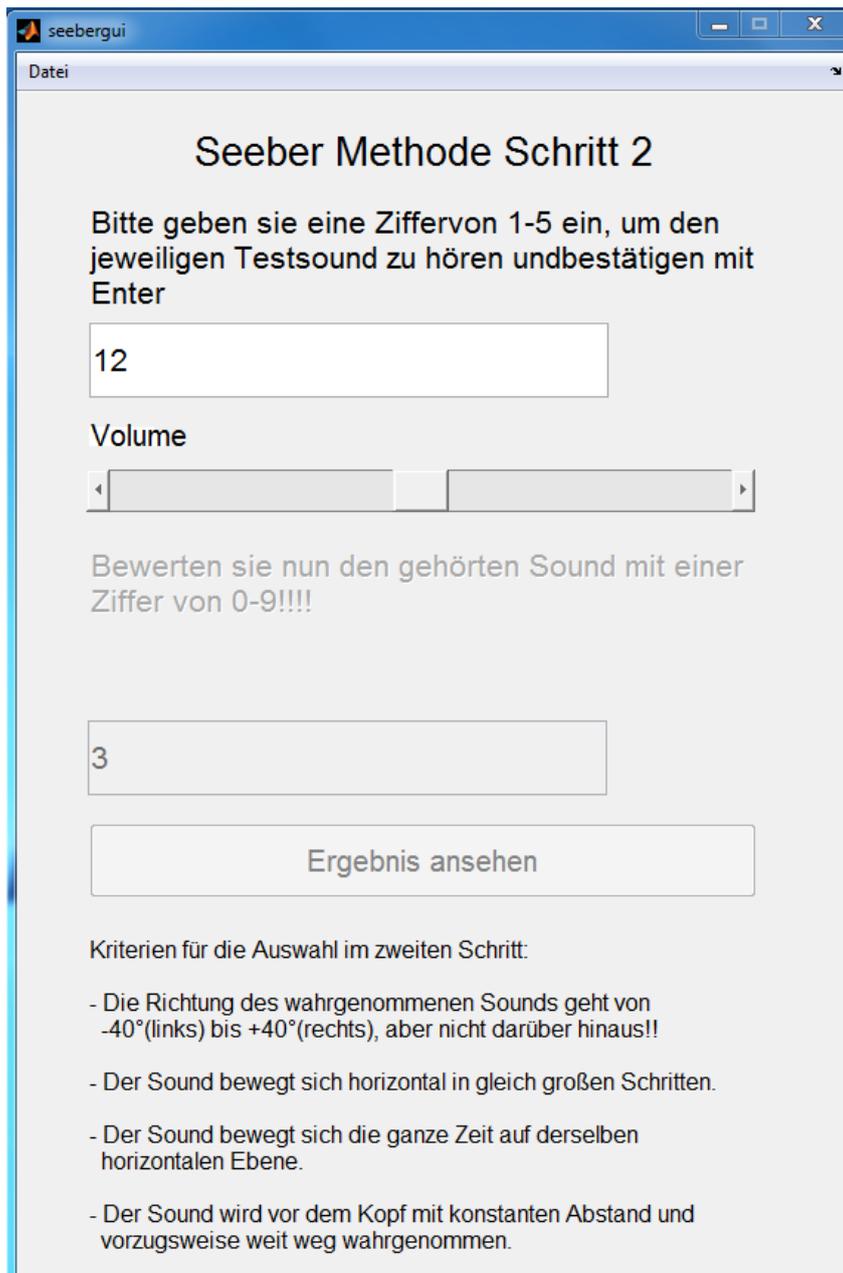
```
if val_2==13
    val_2=row_0(2);
    if RANK(val_2,2)>=2
        RANK(val_2,3)=1;
        while CHART(RANK(val_1,4),RANK(val_2,4))~=0 || ...
            CHART(RANK(val_2,4),RANK(val_1,4))~=0
            val_2=val_2+1;
        end
        RANK(val_2,3)=0;
    end
end
```

### 4.3. Seeber-Fastl-Methode

Die im Rahmen dieser Arbeit entstandene Implementierung wird hier vorgestellt.

#### 4.3.1. Allgemeine Beschreibung des Quellcodes

Die zentrale Variable in diesem Programm ist die Matrix „RANK“. Diese Matrix hat 12 Zeilen und vier Spalten. Je eine Zeile enthält die Werte für ein bestimmtes HRTF. Die vierte Spalte wird von 1-12 durchnummeriert, damit, wenn die HRTFs nach ihrer Bewertung sortiert werden, man noch weiß, um welches HRTF es sich in der jeweiligen Zeile handelt. Zum Wert in der ersten Spalte werden immer, wenn das jeweilige HRTF bewertet wird, die Bewertungspunkte hinzuaddiert. In der zweiten Spalte wird mitgezählt, wie oft das jeweilige HRTF schon bewertet wurde. So kann für die dritte Spalte ein Durchschnittswert errechnet werden, nach dem dann die Matrix sortiert werden kann. Deshalb können alle HRTFs beliebig oft bewertet werden. In dem oberen Eingabefeld gibt man diejenige Zahl von dem HRTF ein, das man anhören und bewerten möchte. Im ersten Schritt ist das eine



**Abbildung 4.3.:** Screenshot des GUI zur Individualisierung mit der Seeber-Methode

Zahl zwischen 1 und 12, im zweiten Schritt ein Zahl zwischen 1 und 5. Das Programm spielt dann den Sound aus der Zeile mit der eingegebenen Zahl ab, nicht das HRTF mit der korrespondierenden Zahl in der vierten Spalte. Wenn im ersten Schritt jeder Testsound

#### 4. Implementierung der Hörversuche

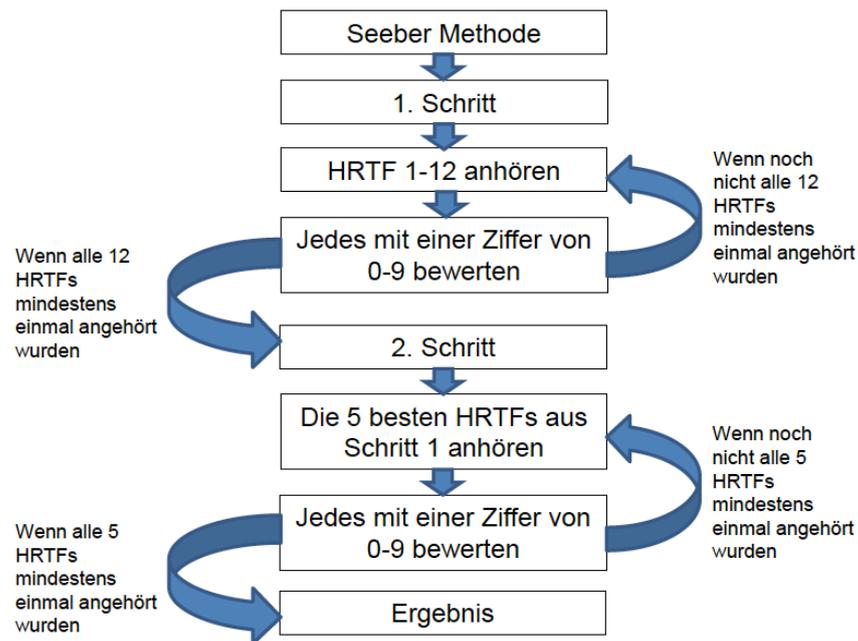


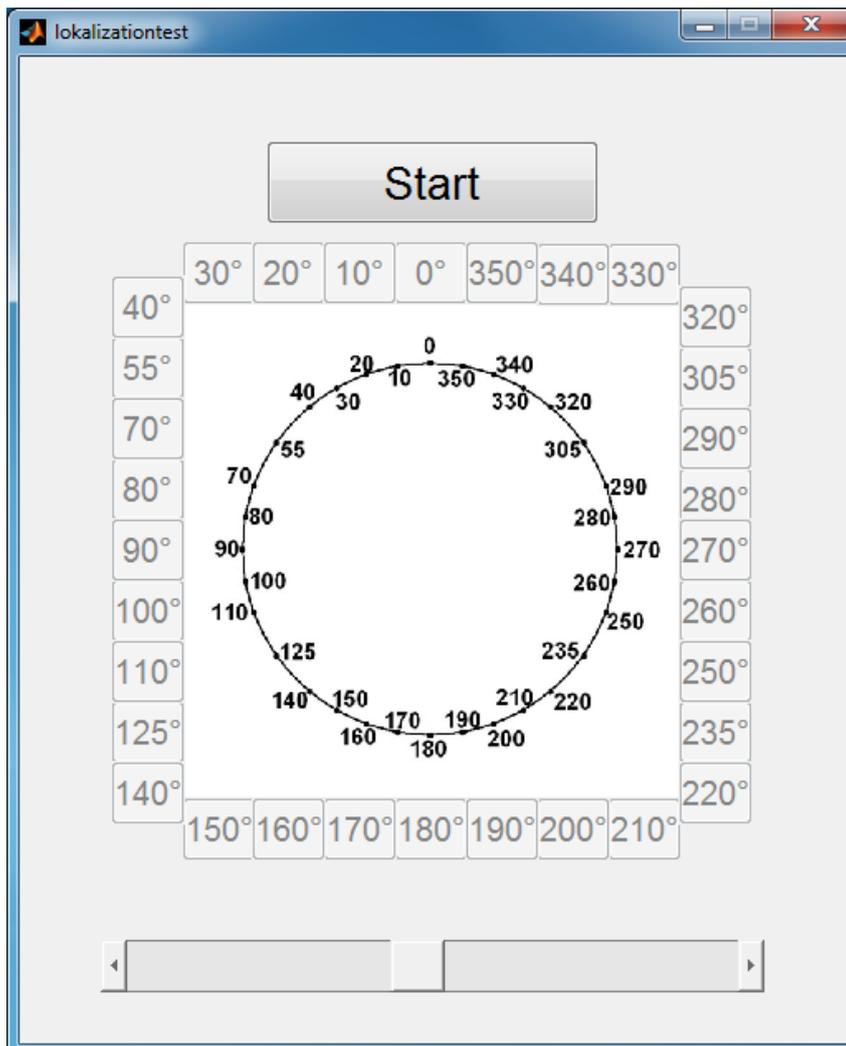
Abbildung 4.4.: Flussdiagramm der Seeber-Methode

mindestens einmal angehört wurde, kann man auf den Button „Weiter zu Schritt 2“ klicken. Dadurch wird dann die Matrix absteigend nach der dritten Spalte sortiert. Das bedeutet, dass in den ersten fünf Zeilen dann die im ersten Schritt am besten bewerteten HRTFs stehen. Für den zweiten Schritt wird dann mit einer if-Schleife sichergestellt, dass nur noch HRTFs aus den ersten fünf Zeilen gewählt werden können. Um die Auswahl abzuschließen, muss auch im zweiten Schritt jeder Sound mindestens einmal angehört werden, bevor man auf den Button „Ergebnis ansehen“ klicken kann. Die „RANK“-Matrix wird mit der aus dem DOMISO-Programm übergebenen Matrix „X“ zusammengefügt und in der Variablen „Y“ gespeichert. Das bedeutet, dass die Zahl von dem am besten bewerteten HRTF in der Seeber-Methode in der Spalte 22 in Zeile 1 steht. Außerdem wird die Dauer der Seeber-Methode gemessen und in die Matrix „Y“ in Spalte 13 in Zeile 2 geschrieben. Das Testprogramm ruft dann die globale Matrix „Y“ auf und sucht sich die Sieger aus den beiden Individualisierungsdurchläufen heraus.

#### 4.4. Test der Verfahren

Zum Test der beiden Auswahlverfahren wird das Bewertungsverfahren, wie es die Autoren der DOMISO-Methode verwenden, in einer leicht abgeänderten Form angewendet. Der Zuhörer bekommt die gleichen 14 Richtungen wie bei der Domiso Methode in einer zufälligen Reihenfolge vorgespielt, jede Richtung je 5 Mal mit den HRTFs aus der

Seeber-Methode, der Domiso-Methode und mit den KEMAR-HRTFs mit den kleinen Ohren. Die 3 verschiedenen HRTFs mit den 14 Richtungen und jede Richtung 5 Mal ergeben zusammen 210 Testsounds, bei denen der Versuchsteilnehmer die gehörten Richtungen angeben muss. Die Bewertung funktioniert mit einem GUI (Siehe Abbildung 4.5), das 32 diskrete Winkel enthält. Diese intuitive Bedienmöglichkeit bringt eine Verschlechterung der Auflösung mit sich, aber durch das einfache Klicken auf den gehörten Winkel werden auch die Fehler, die bei einer manuellen Eingabe entstehen würden, minimiert.



**Abbildung 4.5.:** Screenshot des GUI zur Überprüfung der Ergebnisse



## 5. Versuche

In diesem Abschnitt wird kurz die Versuchsumgebung gezeigt und die Ergebnisse werden diskutiert.

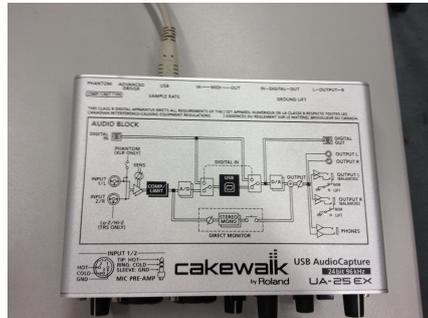
### 5.1. Durchführung

Um zu verhindern, dass Hintergrundgeräusche die Hörversuche beeinträchtigen, fanden sie im Audiolabor am LDV der TU München statt. Die Hardware zum Versuch (Siehe Abbildung 5.1) bestand aus einem Lenovo-Laptop, einer Roland Soundkarte (Cakewalk UA 25 EX) und einem Beyerdynamic Kopfhörer (DT 990 Pro, 250 Ohm). Insgesamt beteiligten sich 12 Personen. Sie waren alle männliche und zwischen 20 und 31 Jahre alt. 7 davon waren Studenten oder wissenschaftliche Mitarbeiter am LDV, 2 an anderen Lehrstühlen der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik und die übrigen 3 waren Studenten an anderen Fakultäten bzw. an anderen Hochschulen.

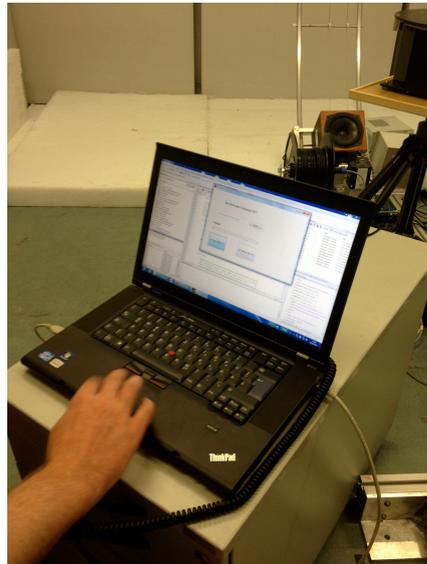
5. Versuche



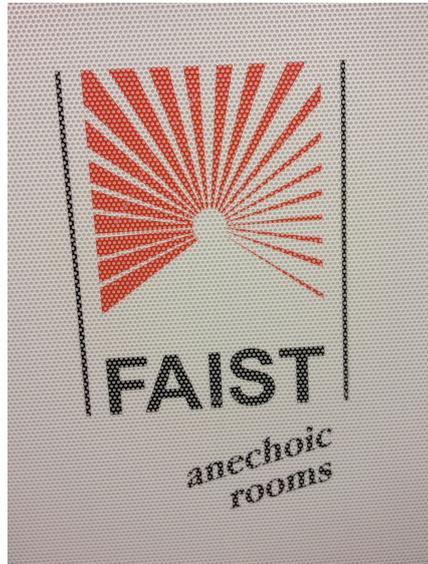
(a) Kopfhörer



(b) Soundkarte



(c) Lenovo-Laptop



(d) Audiolab

Abbildung 5.1.: Verwendete Hardware

## 5.1. Durchführung



**Abbildung 5.2.:** Martin Burgmair bei der Teilnahme an dem „Listening-Test“

## 5.2. Ergebnisse

Wenn man die Tabelle 5.1 betrachtet, dann könnte man meinen, dass durch die Individualisierung mit den „Listening-Tests“ nur eine minimale Verbesserung zu den KEMAR-HRTFs möglich ist. Ganz so einfach kann man das aber nicht sagen. Die Tabelle 5.1 enthält ja nur die durchschnittliche Abweichung der angeklickten Winkel, gemittelt über alle 12 Personen, jedoch im Schnitt hat die Determination method of Optimum Impulse-response by Sound Orientation (DOMISO)-Methode am besten abgeschnitten.

<b>Domsio</b>	33,4821 °
<b>Seeber</b>	35,5059 °
<b>Kemar</b>	37,4256 °

**Tabelle 5.1.:** Die durchschnittlichen Fehler über alle 12 Testpersonen

Für genauere Aussagen muss man sich die einzelnen Ergebnisse ansehen, die sich aus Platzgründen im Anhang A.1 bis A.12 befinden. Bei 6 Testpersonen (A.1, A.7, A.8, A.10, A.11, A.12) ist durch beide Individualisierungen eine Verbesserung gegenüber den KEMAR-HRTFs erzielt worden, bei 5 (A.2, A.4, A.5, A.6, A.9) nur durch eine der zwei Methoden und bei einer Testperson (A.3) schnitten die KEMAR-HRTFs am besten ab. Beim direkten Vergleich gibt es ein unentschieden. Bei 6 Testpersonen (A.1, A.2, A.4, A.5, A.6, A.8, ) schneidet das DOMISO-Verfahren besser ab und bei den anderen 6 (A.3, A.7, A.9, A.10, A.11, A.12) das Seeber-Verfahren. Die DOMISO-Methode lieferte bei 10 der 12 Testpersonen eine Verbesserung gegenüber den KEMAR-HRTFs, die Seeber-Methode hingegen nur bei 8. Aus diesem Grund und der durchschnittlichen kleineren Abweichung (siehe Tabelle 5.1) kann man die Individualisierung nach DOMISO als Sieger im Rahmen der Versuche in Zusammenhang mit dieser Arbeit bezeichnen. Wenn man die Abbildung 5.3 betrachtet, stellt man fest, dass die HRTFs mit den Nummern 2, 3 und 12 niehlmas und Nummer 6 (A.1),7 (A.10) und 8 (A.5) einmal zum Sieger gewählt wurden. Außerdem erzielten diese 3 HRTFs nie den geringsten Abweichungswinkel bei einer Testperson. Wenn man die Abbildung 5.4 genauer betrachtet, dann sieht man, dass die HRTFs mit den Nummern 2, 3, 7 und 12 am seltenstens unter den besten 5 waren. Aus diesem Grund könnte man diese vier für weitere Versuche problemlos durch andere ersetzen.

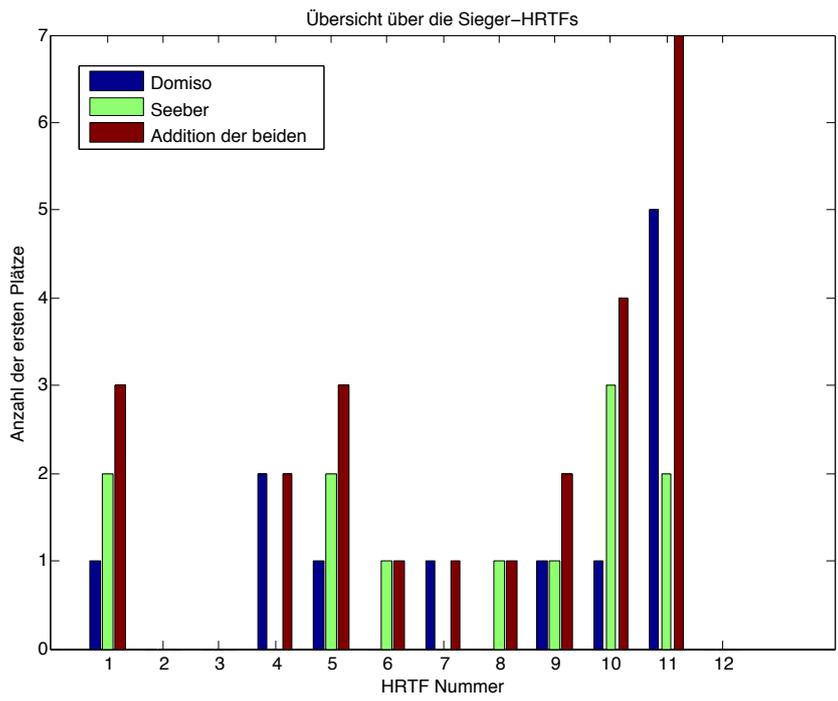
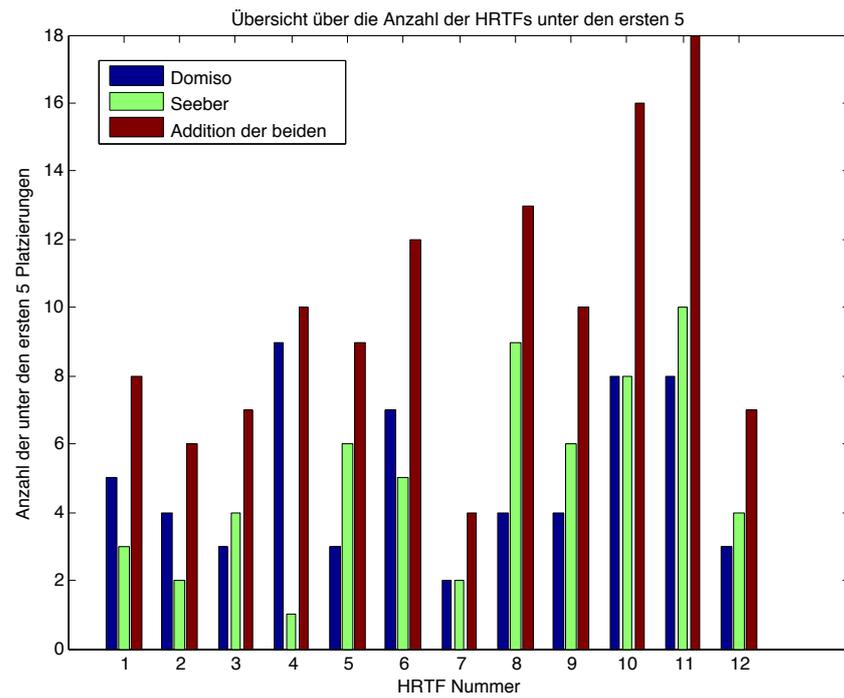


Abbildung 5.3.: Anzahl der Siege von jedem verwendeten HRTF

## 5. Versuche



**Abbildung 5.4.:** Anzahl der Platzierungen unter den ersten fünf von jedem verwendeten HRTF

## 6. Ausblick

### 6.1. Verbesserungen bei der Individualisierung

Für die HRTF-Individualisierung anhand von „Listening-Test“ gibt es für zukünftige Arbeiten mehrere Verbesserungsansätze. Eines der großen Probleme ist, dass bei beiden „Listening-Tests“ alle zur Auswahl stehenden HRTFs angehört und bewertet werden müssen. Aus diesem Grund kann nur eine sehr kleine Anzahl an HRTFs verwendet werden. Um HRTFs aus einer größeren Datenbank auswählen zu können, so dass nicht mehr jedes einzelne angehört werden muss, bräuhete man eine Einteilung in Gruppen mit ähnlich klingenden HRTFs.

Es wäre auch eine Kombination aus „Listening-Test“ und Messung anthropometrischer Daten bzw. Regressionsberechnungen möglich. Die physischen Maßen könnten eine Gruppe auswählen beispielsweise und die tatsächlich verwendeten HRTFs werden dann mit dem Hörtest bestimmt.

Wie man auf Abbildung 5.3 sehen kann wurden die HRTFs 2,3 und 12 gar nicht zum Sieger gewählt. Da die CIPIC Datenbank mehr als 12 Datensätze enthält, kann man diese durch andere ersetzen. So könnten auch für diejenigen Testpersonen, die die Sounds nur auf dem hinteren Halbkreis hörten, passende HRTFs zur Auswahl hinzukommen.

Ein weiterer Punkt ist die Berücksichtigung von anderen Ebenen. In den beiden „Listening-Tests“ wird nur die horizontale Ebene berücksichtigt. Für eine genauere Evaluierung müssten man aber auch andere Punkte auf der Kugeloberfläche berücksichtigen.

Die HRTF Messung berücksichtigt keine Hörschäden oder zumindest Unterschiede zwischen dem linken und dem rechten Ohr, weil die Mikrophone in beiden Ohren genau gleich funktionieren. Außerdem sind Hörschäden frequenzabhängig, was eine einfache Pegelkompensation unmöglich macht. Aus diesen Gründen wird es in naher Zukunft keine Massenanwendungen mit individualisierten HRTFs geben, aber es sind spezifische Anwendungen für einzelne kleine Gruppen denkbar, bei denen man die HRTFs vermisst und zusätzlich eine Gehöranpassung macht. Für kleine Anwendergruppen ist es auch viel einfacher einen größeren Aufwand zur Individualisierung zu betreiben oder die eigenen HRTFs zu messen. Für einfache Anwendungen reichen die KEMAR-HRTFs vollkommen aus, weil mit ihnen schon eine Richtungswahrnehmung einigermaßen gut möglich ist.

Die beiden implementierten Individualisierungsalgorithmen sind relativ schwierig bei der Durchführung für die teilnehmenden Personen. Bei dem Swiss-Style-Tournament Verfahren werden die HRTFs nach jeder Runde nach den Punkten und dem direkten Vergleich sortiert und danach treten die Tabellennachbarn gegeneinander an. Dadurch werden die Duelle von Runde zu Runde schwieriger zu bewerten, weil die gut und die

## 6. Ausblick

schlecht empfundenen HRTFs untereinander die Duelle austragen müssen. Bei dem Seebervverfahren müssen die HRTFs mit Ziffern von 0 bis 9 bewertet werden, was mit Sicherheit noch komplizierter ist als zwei HRTFs miteinander zu vergleichen, wie bei der DOMISO-Methode.

Da die beiden Individualisierungs-Algorithmen auf einer rein subjektiven Bewertung der Testperson basieren, könnte man auch das objektive Bewertungsverfahren aus der DOMISO-Methode zur Individualisierung verwenden. Hierbei muss, wie oben schon erläutert, nur immer der gehörte Winkel angeklickt werden, was für die Testperson auch viel einfacher ist, als die subjektive Bewertung. Als Ergebnis erhält man dann gleich für jedes HRTF die abweichenden Winkel und sieht wie gut die Lokalisierung mit dem jeweiligen HRTF funktioniert. Wenn man also die drei gar nicht gewählten HRTFs weglässt und die Individualisierung mit dem Test-Algorithmus durchführt, dauert das ganze ungefähr genauso lange, ca. 20 Minuten, wie die Individualisierung mit einer der beiden subjektiven Methoden und man erhält ein aufschlussreicheres Ergebnis.

### 6.2. Gemessene HRTFs an der TU München

In Zusammenarbeit mit anderen Studenten am LDV wurden auch bei 7 meiner Testpersonen die eigenen HRTFs für die horizontale Ohrenebene mit einer Auflösung von  $5^\circ$  gemessen. Das Programm, das die individualisierten HRTFs mit denen vom KEMAR vergleicht, wurde so erweitert, dass die 3 oben genannten HRTFs und die eigenen HRTFs miteinander verglichen werden. Bei den Tests ohne die eigenen HRTFs wurden alle 14 Richtungen 5 Mal mit jedem der drei HRTF abgespielt, was insgesamt 210 Richtungen ergibt, die bewertet wurden. Bei den Tests mit den eigenen HRTFs wurde jede Richtung nur 4 Mal abgespielt, was insgesamt 224 zu bewertende Richtungen gibt, damit der Test nicht zu lange dauert. Die durchschnittlichen Fehler von den 7 Personen, die den Test mit den eigenen HRTFs gemacht haben sind in Tabelle 6.1 zu sehen.

<b>Domsio</b>	30,2551°
<b>Seeber</b>	36,1734°
<b>Kemar</b>	34,6684°
<b>Eigene HRTF</b>	40,2551°

**Tabelle 6.1.:** Die durchschnittlichen Fehler über die 7 Testpersonen mit den eigenen HRTFs.

Man sieht, dass das Ergebnis nicht den Erwartungen entspricht. Man würde erwarten, dass die gemessenen, angepassten HRTFs mit Abstand am besten abschneiden würden. Da dies die ersten HRTFs waren, die am LDV an Menschen gemessen wurden, kann das Ergebnis aber durchaus positiv bewertet werden. Auch bei den gemessenen HRTFs funktioniert die Richtungswahrnehmung im Halbkreis hinter dem Kopf ganz gut. Aber bei allen 7 Testpersonen traten große front-back-errors für den vorderen Halbkreis auf, siehe

Anhang A.1 bis A.7. Da es bei der HRTF-Messung viele verschiedene Ansätze zur Messung und Berechnung gibt, muss am LDV erst noch herausgefunden werden, mit welchen Parametern die besten Ergebnisse erzielt werden können.



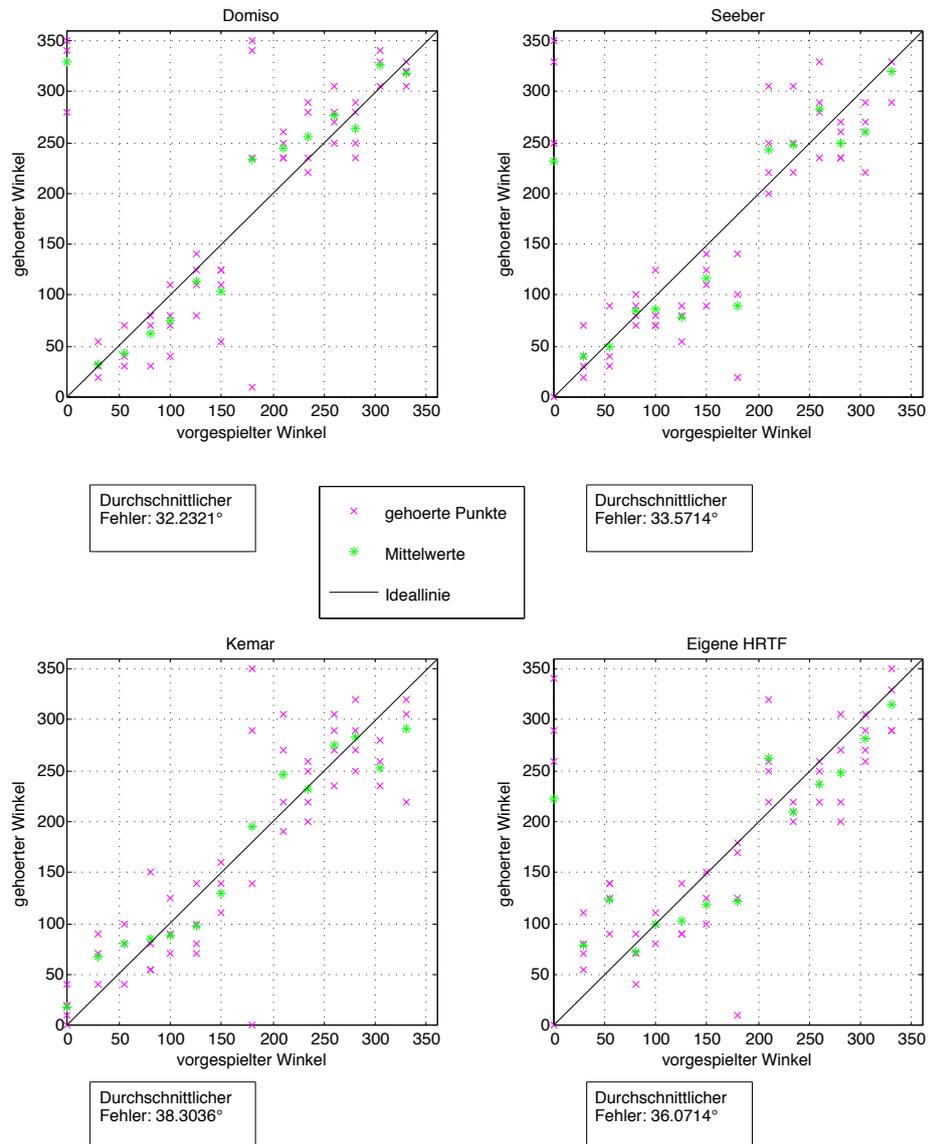
**Abbildung 6.1.:** Messen der HRTFs im Audiolab der TU-München

Die verwendeten HRTFs wurden aus den diskret gemessenen Winkeln mit der Kreuzkorrelationsmethode berechnet. Als Testsound wurde eine Maximum-Length-Signal (MLS) verwendet. Die zu vermessende Person musste sich auf einen Drehteller setzen, der sich dann computergesteuert drehte. Kopfbewegungen wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Außerdem sind bei den gemessenen HRTFs noch Echos zu hören. Das liegt zum einen am Raum, da bei den Messungen der Boden nicht komplett mit Schall absorbierendem Material bedeckt war. Zum anderen war der Raum auch nicht komplett leer geräumt. Es befand sich noch das sogenannte „Stargate“ im Audiolab, das natürlich auch Reflexionen erzeugt, aber zu groß ist, um es einfach schnell hinauszuräumen. Die genannten Probleme werden auch auf der Abbildung 6.1 deutlich.



## **A. Anhang**

**Heimo Gursch**



**Abbildung A.1.:** Heimo Gursch

	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5	Dauer
<b>Domiso</b>	11	4	10	5	6	14min 57s
<b>Seeber</b>	6	5	1	12	11	19min 18s

**Tabelle A.1.:** Platzierungen Heimo Gursch

## Martin Rothbucher

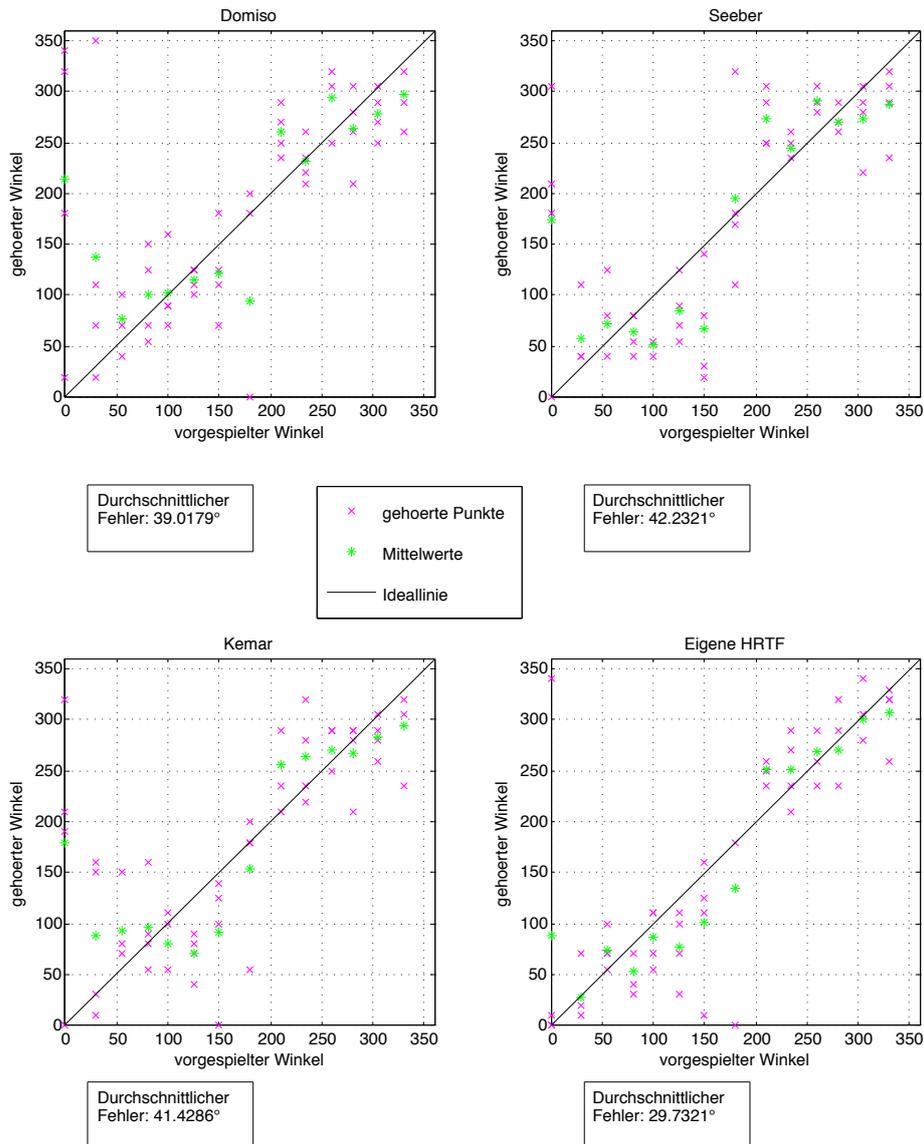
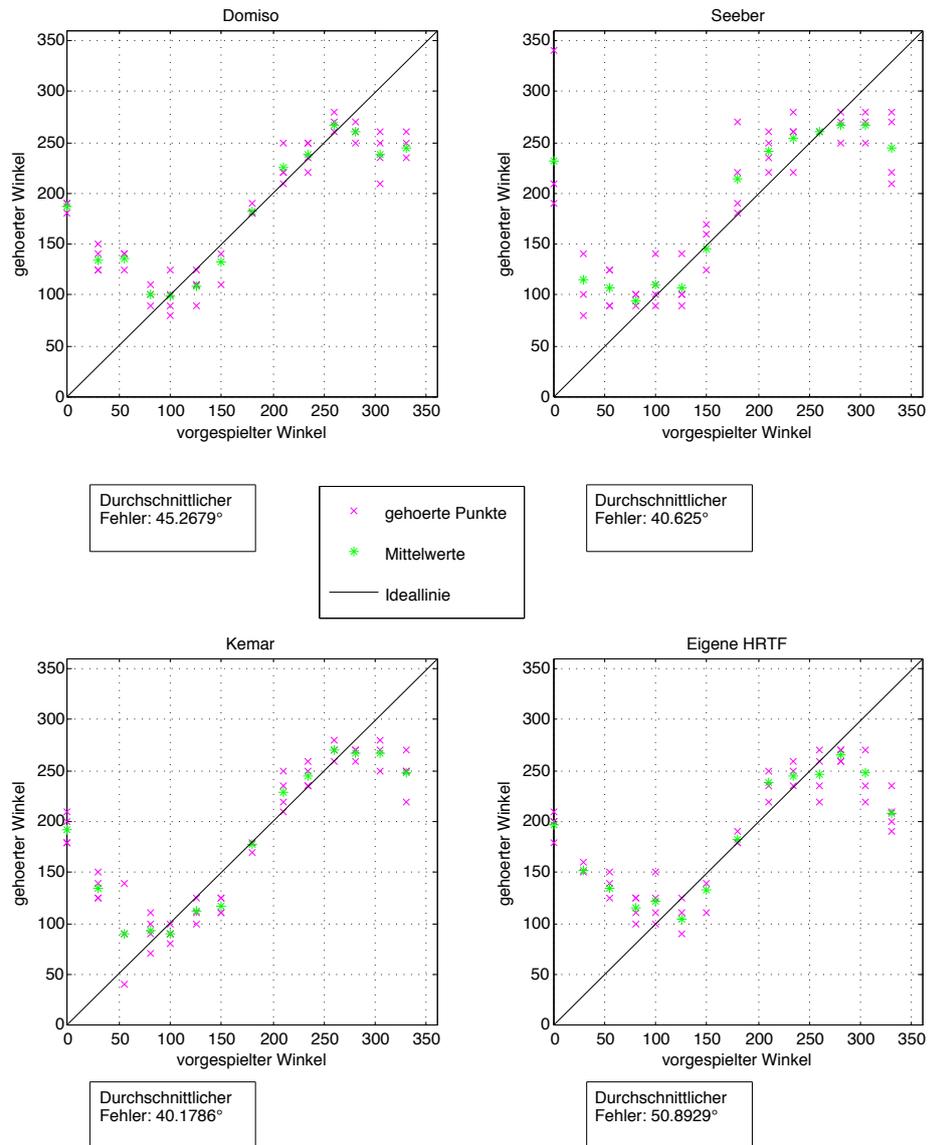


Abbildung A.2.: Martin Rothbucher

	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5	Dauer
<b>Domiso</b>	9	3	8	12	6	11min 59s
<b>Seeber</b>	10	11	9	5	8	3min 24s

Tabelle A.2.: Platzierungen Martin Rothbucher

**Martin Stimpfl**



**Abbildung A.3.: Martin Stimpfl**

	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5	Dauer
<b>Domiso</b>	4	11	10	9	6	16min 51s
<b>Seeber</b>	11	10	9	6	8	17min 3s

**Tabelle A.3.: Platzierungen Martin Stimpfl**

# Matthias Kaufmann

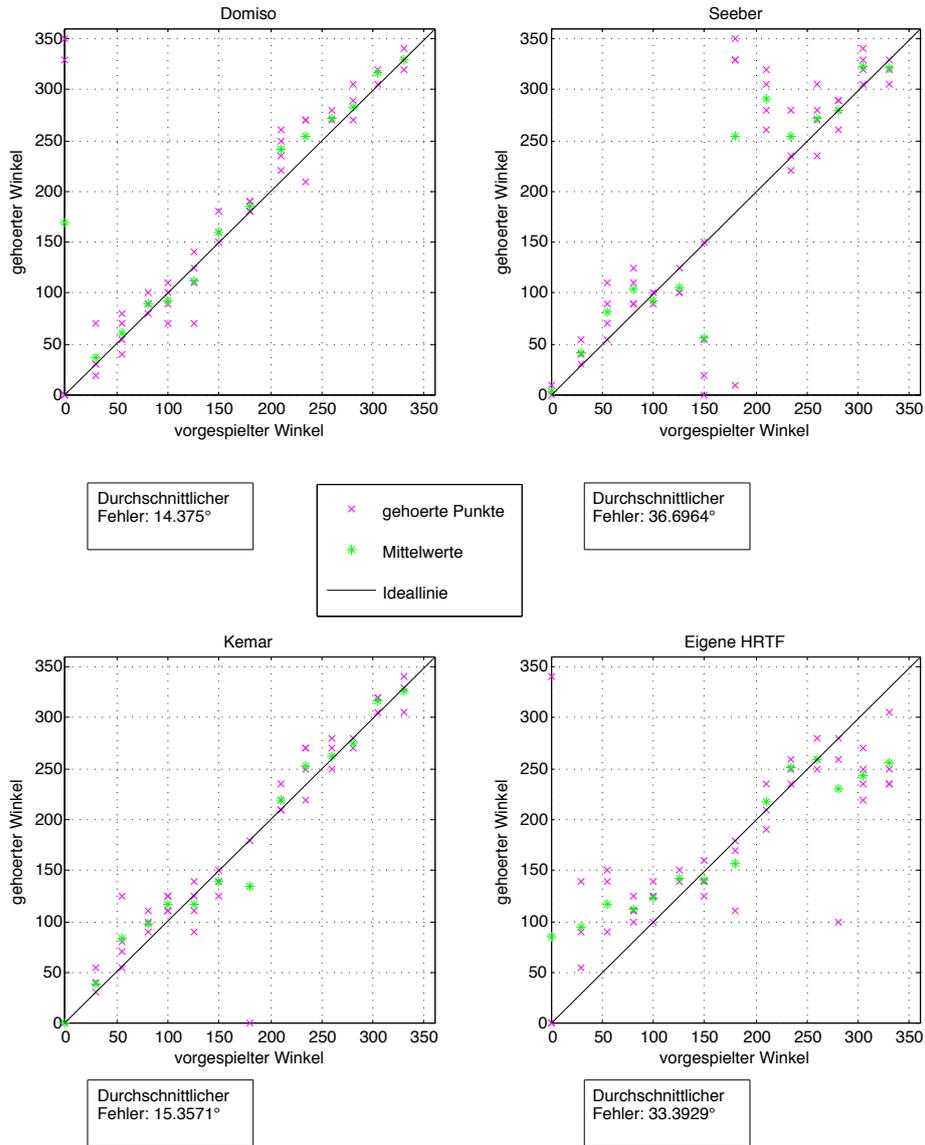
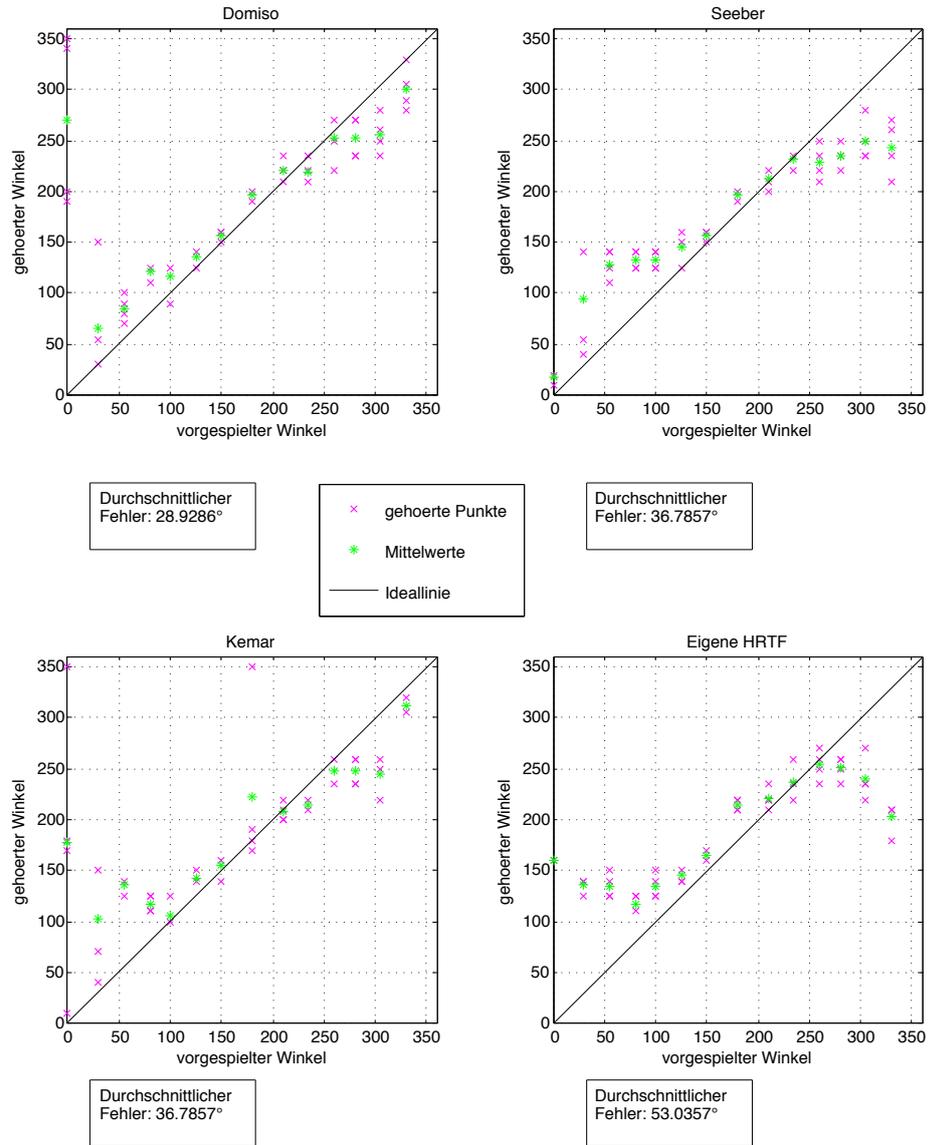


Abbildung A.4.: Matthias Kaufmann

	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5	Dauer
<b>Domiso</b>	11	4	10	8	2	20min 2s
<b>Seeber</b>	1	10	11	3	8	12min 16s

Tabelle A.4.: Platzierungen Matthias Kaufmann

**Michael Unverdorben**



**Abbildung A.5.:** Michael Unverdorben

	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5	Dauer
<b>Domiso</b>	10	2	11	1	8	19min 9s
<b>Seeber</b>	8	2	3	6	7	22min 27s

**Tabelle A.5.:** Platzierungen Michael Unverdorben

## Moritz Hobe

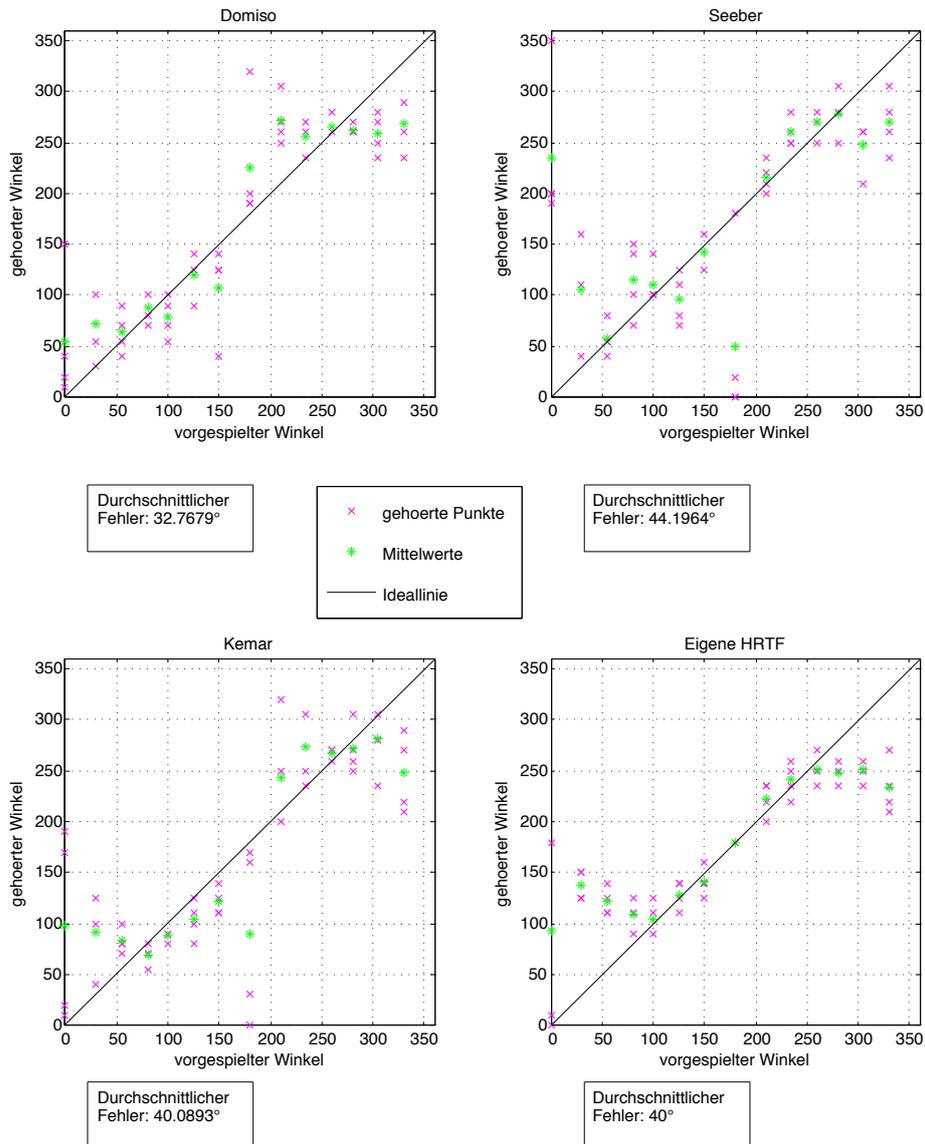
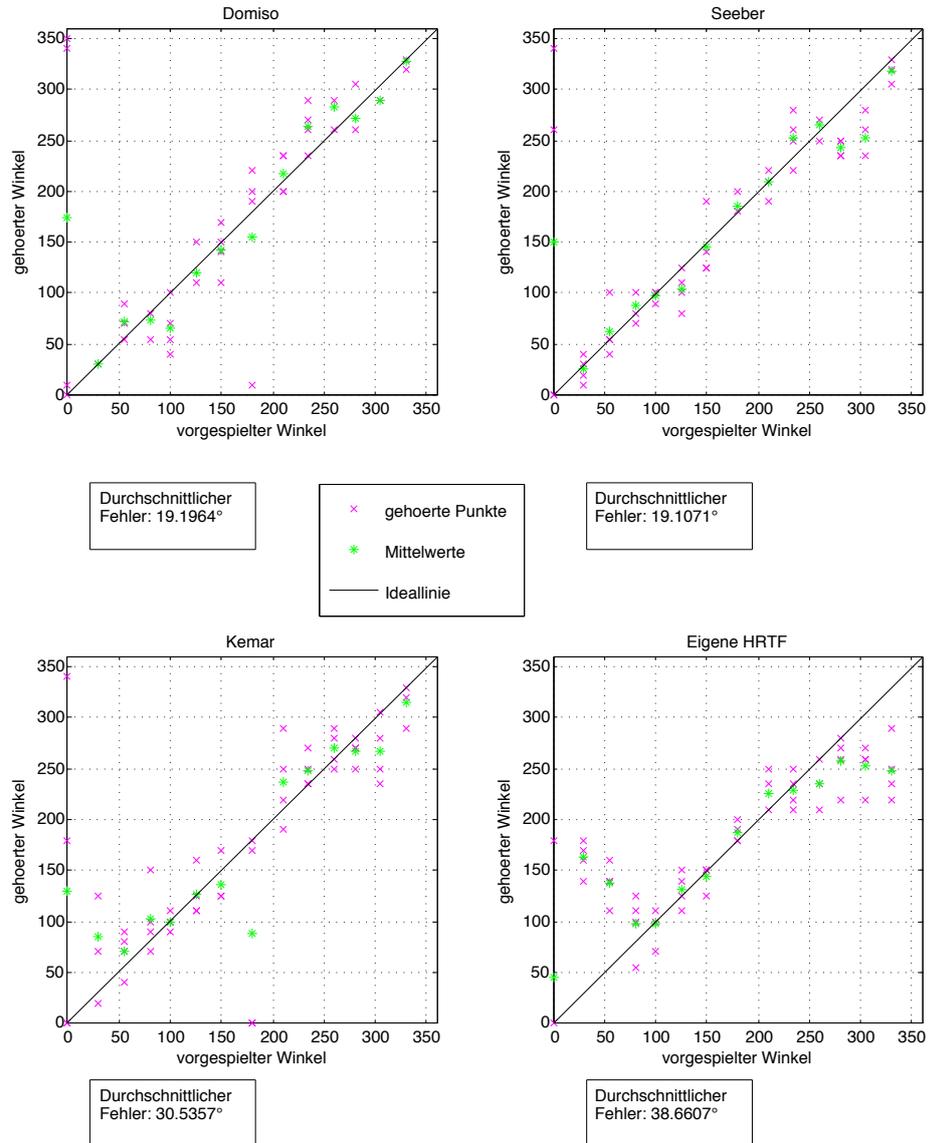


Abbildung A.6.: Moritz Hobe

	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5	Dauer
<b>Domiso</b>	1	11	6	9	10	17min 47s
<b>Seeber</b>	9	12	11	3	8	14min 15s

Tabelle A.6.: Platzierungen Moritz Hobe

**Philipp Paukner**

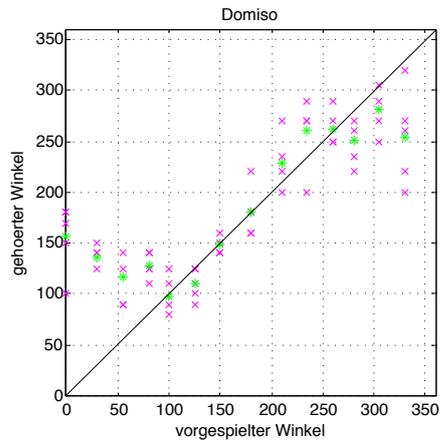


**Abbildung A.7.:** Philipp Paukner

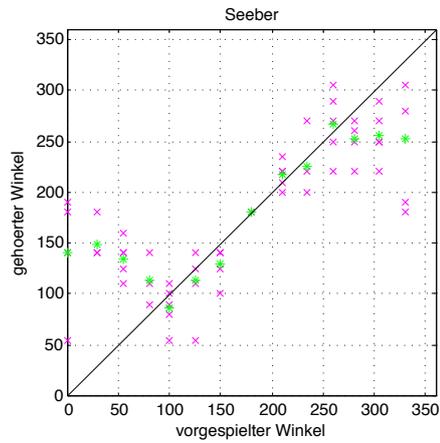
	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5	Dauer
<b>Domiso</b>	11	6	10	3	4	16min 1s
<b>Seeber</b>	10	9	11	6	8	15min 28s

**Tabelle A.7.:** Platzierungen Philipp Paukner

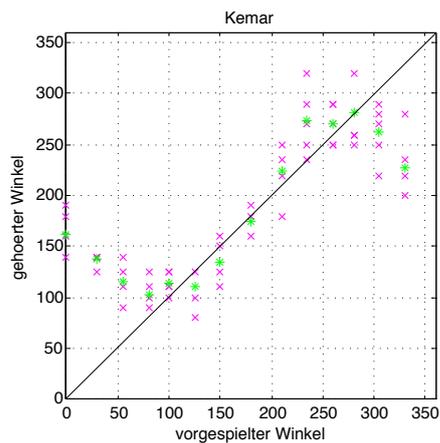
## Daniel Schuster



Durchschnittlicher Fehler: 45.0714°



Durchschnittlicher Fehler: 46.1429°



Durchschnittlicher Fehler: 47.4286°

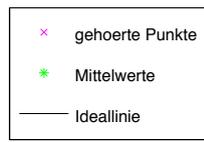


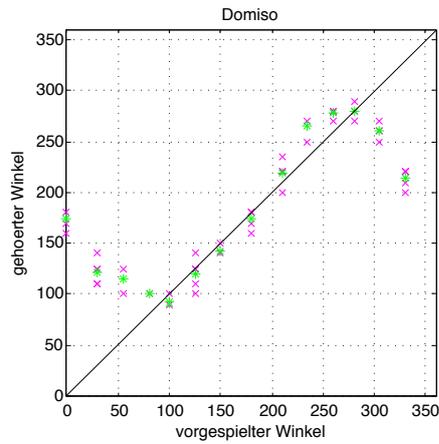
Abbildung A.8.: Daniel Schuster

	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5	Dauer
<b>Domiso</b>	4	1	5	6	12	15min 22s
<b>Seeber</b>	5	11	2	8	7	11min 35s

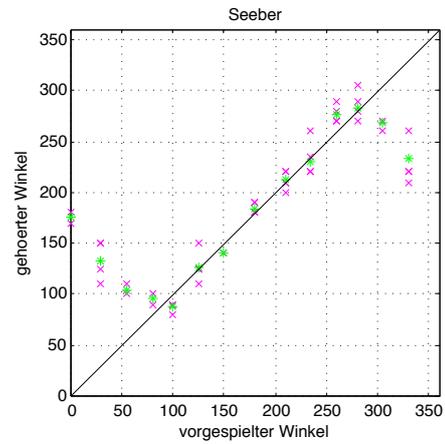
Tabelle A.8.: Platzierungen Daniel Schuster

A. Anhang

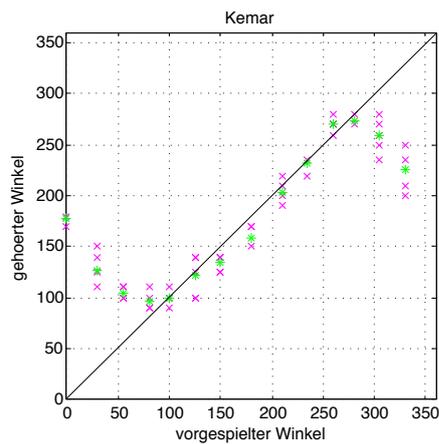
Georg Kast



Durchschnittlicher Fehler: 43.2857°



Durchschnittlicher Fehler: 39.7857°



Durchschnittlicher Fehler: 41.2143°

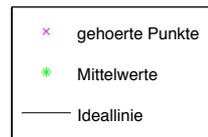
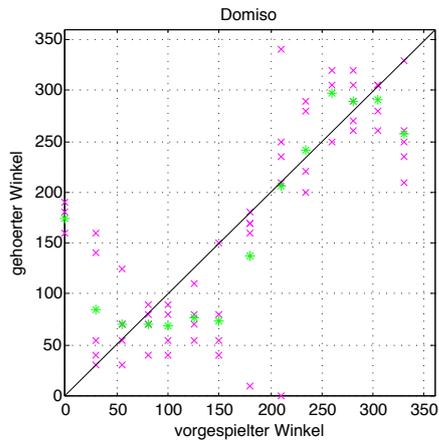


Abbildung A.9.: Georg Kast

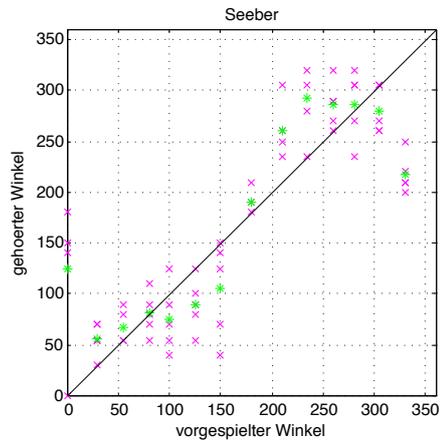
	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5	Dauer
<b>Domiso</b>	5	12	10	4	1	14min 40s
<b>Seeber</b>	10	12	11	6	8	15min 30s

Tabelle A.9.: Platzierungen Georg Kast

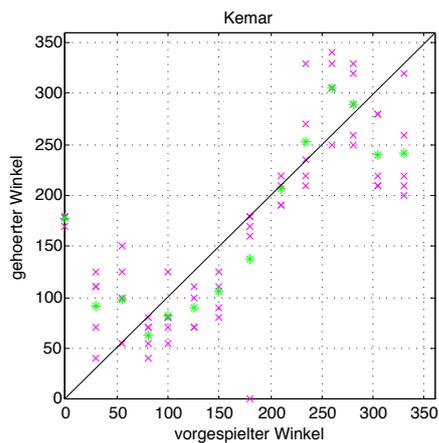
# Johannes Keilhacker



Durchschnittlicher Fehler: 50.9286°



Durchschnittlicher Fehler: 42.8571°



Durchschnittlicher Fehler: 51.8571°

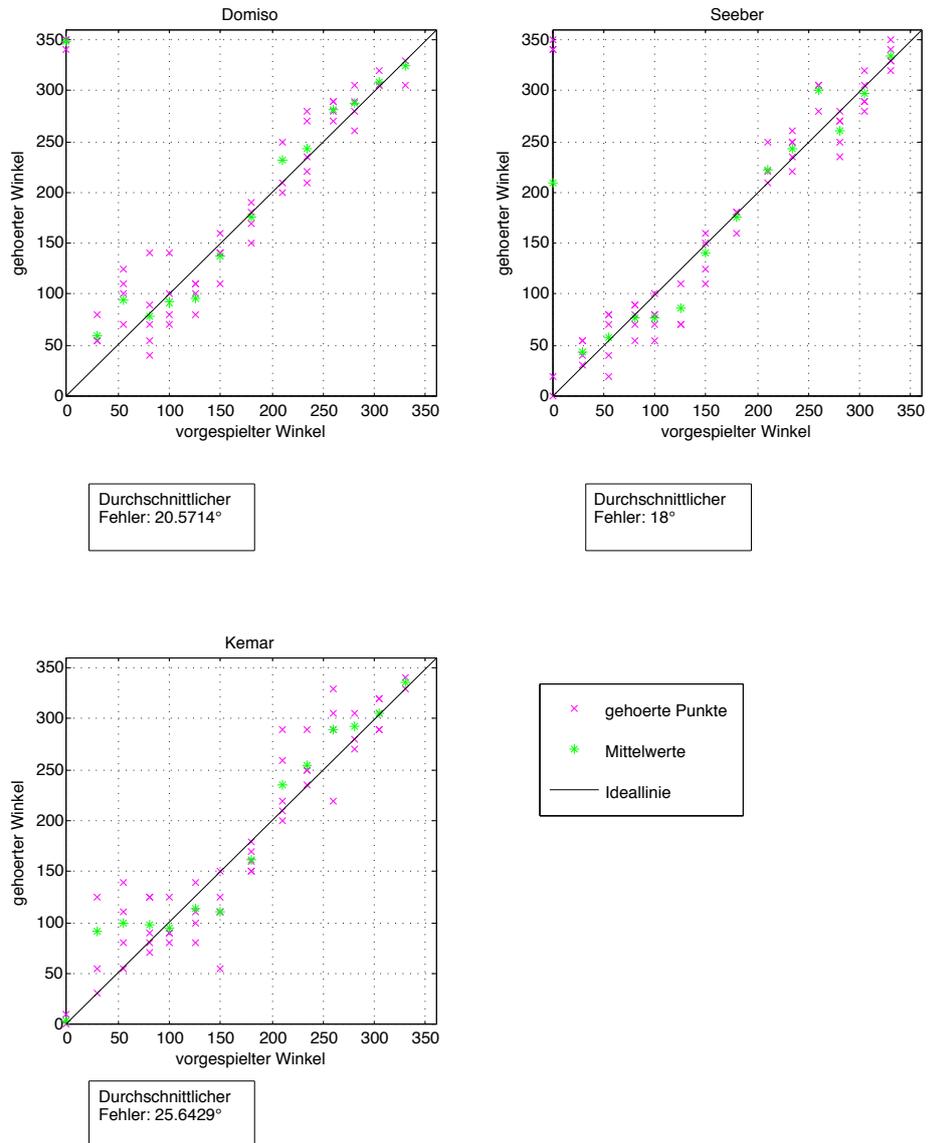


Abbildung A.10.: Johannes Keilhacker

	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5	Dauer
<b>Domiso</b>	7	2	3	4	9	14min 46s
<b>Seeber</b>	1	3	9	10	5	19min 50s

Tabelle A.10.: Platzierungen Johannes Keilhacker

**Luitpold Kinninger**

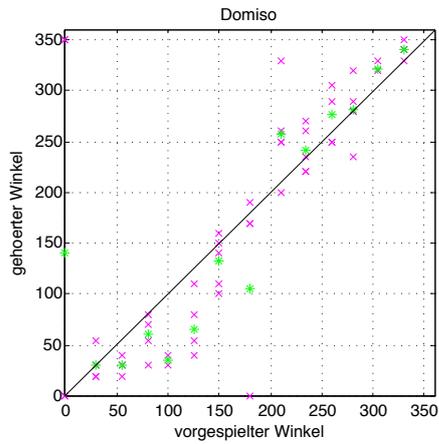


**Abbildung A.11.:** Luitpold Kinninger

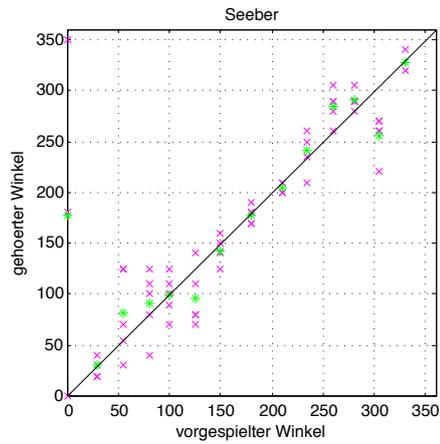
	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5	Dauer
<b>Domiso</b>	11	6	4	1	8	17min 57s
<b>Seeber</b>	11	8	12	10	5	14min 59s

**Tabelle A.11.:** Platzierungen Luitpold Kinninger

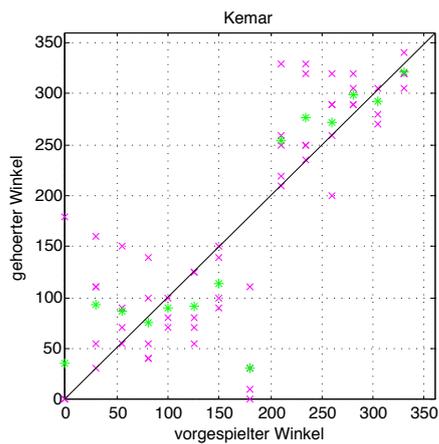
# Martin Burgmair



Durchschnittlicher Fehler: 30.1429°



Durchschnittlicher Fehler: 26.0714°



Durchschnittlicher Fehler: 40.2857°

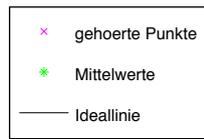


Abbildung A.12.: Martin Burgmair

	Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 4	Platz 5	Dauer
<b>Domiso</b>	11	2	10	7	4	14min 5s
<b>Seeber</b>	5	11	10	4	9	15min 14s

Tabelle A.12.: Platzierungen Martin Burgmair



# Abkürzungsverzeichnis

<b>HRTF</b> Head-Related-Transfer-Function.....	5
<b>HRIR</b> Head-Related-Impulse-Response.....	9
<b>DOMISO</b> Determination method of Optimum Impulse-response by Sound Orientation .	28
<b>KEMAR</b> Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research .....	7
<b>CIPIC</b> Center for Image Processing and Integrated Computing	
<b>MIT</b> Massachusetts Institute of Technology	
<b>IRCAM</b> Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique	
<b>ARI</b> Acoustics Research Institute	
<b>GUI</b> Graphical User Interface .....	15
<b>LDV</b> Lehrstuhl für Datenverarbeitung	
<b>TU</b> Technische Universität	
<b>ITD</b> Interaural Time Difference .....	9
<b>IID</b> Interaural Intensity Difference .....	9
<b>MLS</b> Maximum-Length-Signal .....	33



# Literaturverzeichnis

- [1] Acoustic Research Institute. URL <http://www.kfs.oeaw.ac.at/content/view/608/606/lang,8859-2/>. Aufgerufen am 24. Juli 2012.
- [2] G.R.A.S. Sound & Vibration. URL <http://www.gras.dk/00012/00330/>. Aufgerufen am 24. Juli 2012.
- [3] World Chess Federation. URL <http://www.fide.com/component/handbook/?id=18&view=category>. Aufgerufen am 24. Juli 2012.
- [4] V. Algazi, R. Duda, D. Thompson und C. Avendano. The CIPIC HRTF Database. In *IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, S. 99 – 102. 2001.
- [5] C. Cheng und G. Wakefield. Introduction to Head-Related Transfer Functions (HRTFs): Representations of HRTFs in Time, Frequency and Space. In *J. Audio Eng. Soc.*, S. 231 – 249, April 2001.
- [6] B. Gardner und K. Martin. HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone. URL <http://sound.media.mit.edu/resources/KEMAR.html>. Aufgerufen am 24. Juli 2012.
- [7] G. Grindlay und M. Vasilescu. A multilinear (tensor) framework for hrtf analysis and synthesis. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Band 1, S. 161 – 164. 2007.
- [8] H. Hu, L. Zhou, J. Zhang, H. Ma und Z. Wu. Head Related Transfer Function Personalization Based on Multiple Regression Analysis. In *International Conference on Computational Intelligence and Security*, Band 2, S. 1829 – 1832. 2006.
- [9] Y. Iwaya. Individualization of head-related transfer functions with tournament-style listening test: Listening with other's ears. In *Acoust. Sci. Technol.*, 27, S. 340 – 343, Juni 2006.
- [10] J. Loomis, R. Golledge und R. Klatzky. Navigation system for the blind: Auditory display modes and guidance. In *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, 7(2), S. 193 – 203, April 1998.

## Literaturverzeichnis

- [11] M. Rothbucher, T. Habigt, J. Feldmaier und K. Diepold. Integrating a HRTF-based sound synthesis system into Mumble. In *IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing*, S. 24 – 28. 2010.
- [12] M. Rothbucher, M. Durkovic, H. Shen und K. Diepold. HRTF customization using multiway array analysis. In *18th European Signal Processing Conference*, S. 229 – 233. 2010.
- [13] B. Seeber und H. Fastl. Subjective selection of non-individual head-related transfer functions. In *International Conference on Auditory Display*, S. 259 – 262. 2003.
- [14] Y. Tang, Y. Fang und Q. Huang. Audio personalization using head related transfer function in 3dtv. In *3DTV Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video*, S. 1 – 4. 2011.
- [15] O. Warusfel. Listen HRTF Database. URL <http://recherche.ircam.fr/equipes/salles/listen/index.html>. Aufgerufen am 24. Juli 2012.
- [16] D. Zotkin, J. Hwang, R. Duraiswaini und L. Davis. HRTF personalization using anthropometric measurements. In *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, S. 157 – 160. 2003.