

# Der Teufel im Detail

## Tritonus-Paradox aufgrund von individueller Hörschwelle?

Christoph Reuter<sup>1</sup>, Dijana Popović<sup>1</sup>, Esther Rois-Merz<sup>2</sup>, Fatima Gerendas Obiols<sup>1,2</sup>, Michael Oehler<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Musikwissenschaftliches Institut der Universität Wien, <sup>2</sup> Audienz, Musikalische Hörberatung, Wien

<sup>3</sup> Musikwissenschaftliches Institut der Universität Osnabrück

### Hintergrund

Werden sukzessive Tritonus-Intervalle aus Shepard-Tönen gebildet, so kann man das Intervall nicht mehr eindeutig als auf- oder abwärtssteigend wahrnehmen (Shepard 1964, S. 2350). Wenn man die Richtung von zufällig gespielten (Shepard)-Tritonus-Intervallen einschätzen soll und die Ergebnisse nach Tonklassen ordnet, dann lässt sich jedoch in den meisten Fällen eine eindeutige Tonklassen-Grenze finden (meist beim Tritonus C-Fis bzw. in dessen Nähe), ab der Versuchspersonen ein (Shepard)-Tritonus-Intervall als auf- bzw. absteigend erkennen (Deutsch, ab 1986).

Als Ursache wurde zum einen die obere Tönhöhengrenze der individuellen Sprechstimme postuliert und zum anderen die Herkunft des/r SprecherIn (Deutsch 1991). Dies konnte von Bruno Repp (1994) in einer Replikation der Versuche Deutschs nicht bestätigt werden, zumal die obere Grenzfrequenz einer Stimme je nach emotionalem Zustand des/der SprecherIn stark schwanken kann (ganz abgesehen davon, dass Deutsch bei ihrer Erklärung einfach Tonklassen mit Frequenzen gleichsetzt). Ernst Terhardt und Andreas Grubert konnten zwar 1988 mit Hilfe ihres Berechnungsverfahrens für virtuelle Tonhöhen zeigen, dass Frequenzen in einem Bereich zwischen 300 und 500 Hz zumindest rechnerisch eine bevorzugte Rolle bei der Einschätzung der Tritonus-Intervalle zu spielen scheinen, jedoch konnte auch hiermit das Tritonus-Paradox nicht erklärt werden.

### Fragestellung/Ziel

Geht man von der Tatsache aus, dass die Hörschwelle von Person zu Person und von Ohr zu Ohr unterschiedlich verläuft und durch Umwelteinflüsse und Alter individuell geprägt wird, dann liegt die Vermutung nahe, dass anstelle von Herkunft, Sprache und Residualtonberechnungsverfahren eher die individuelle Hörschwelle der Versuchsperson im Verhältnis zum Verlauf der Shepard-Filterkurve dafür ausschlaggebend sein müsste, ab welcher Grenze ein (Shepard)-Tritonus-Intervall als aufsteigend bzw. abfallend wahrgenommen wird. Aus diesem Grund wird in dieser Studie folgender Forschungsfrage nachgegangen:

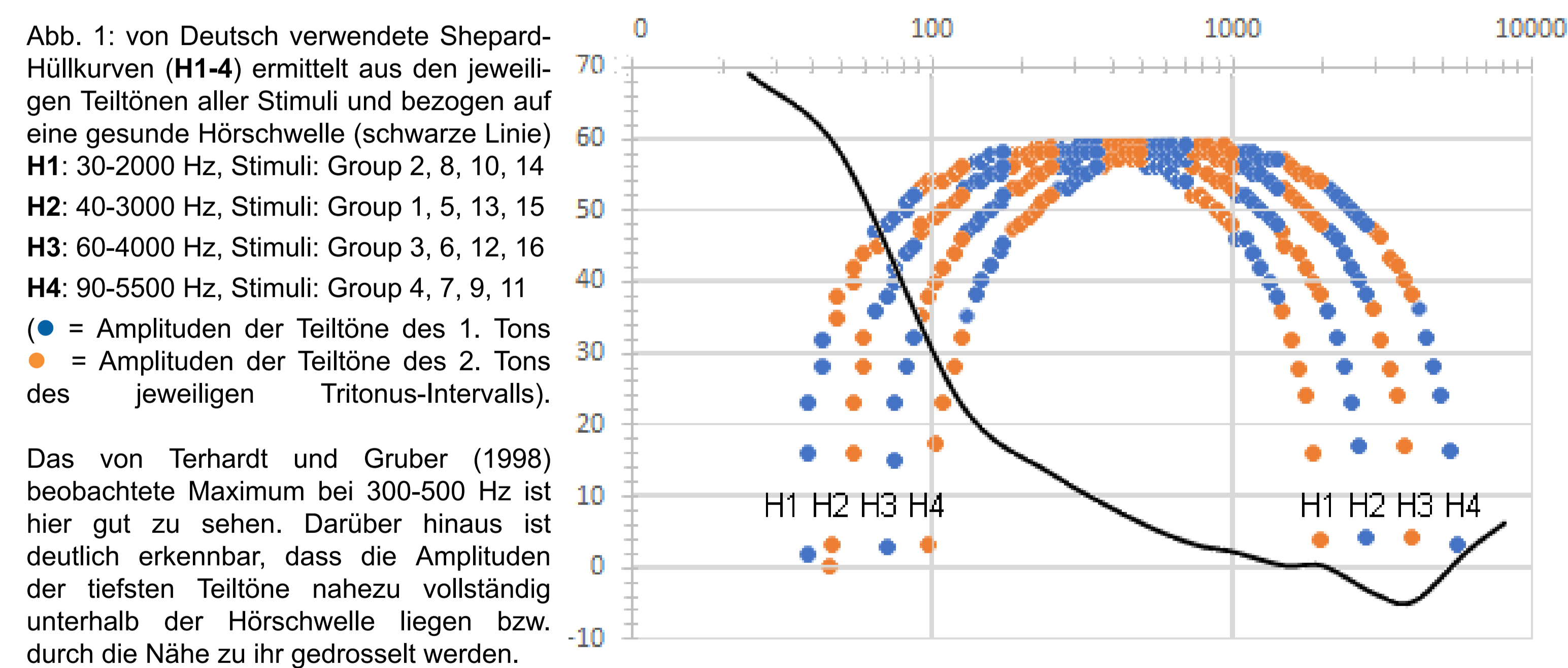
**Wie stark ist das Tritonus-Paradox vom Verlauf der individuellen Hörschwelle und vom Verlauf der Shepard-Filterkurve abhängig?**

### Methoden

Von 23 Versuchspersonen wurden die Hörschwellen beider Ohren zwischen 125 und 8000 Hz gemessen, so dass nach der Messung 45 individuelle Hörschwellen vorlagen (eine Versuchsperson konnte nur einohrig gemessen werden). Im Anschluss daran führten die Versuchspersonen via Kopfhörer bei einheitlichem Pegel (65 dB<sub>SPL</sub>) den von Deutsch veröffentlichten Hörversuch zum Tritonus-Paradox auf jedem Ohr einzeln durch (Deutsch 1995, Track 15-18). Aufgrund der einheitlichen Pegelstellung konnten die Klänge danach für alle Versuchspersonen gleichermaßen mit der jeweiligen gemessenen individuellen Hörschwelle in Beziehung gesetzt werden. Darüber hinaus wurden die Shepard-Filterkurven sowie das Verhalten der Teiltöne darunter von allen Klangbeispielen analysiert.

### Ergebnisse

Die Auswertung der Stimuli zeigt, dass Deutsch in den 16 Stimuli-Gruppen ihres Tests vier verschiedene Shepard-Filterkurven verwendet, die in ihrem Verlauf die Amplitudenverhältnisse der darunterliegenden Teiltöne entsprechend unterschiedlich beeinflussen:



Betrachtet man die Amplitudenverhältnisse der Teiltöne unter den vier verschiedenen Shepard-Hüllkurven, so wird deutlich, dass die Wahl der Kurven zu einem **Artefakt** führt, welches als Grund für den vielfach in der Literatur beobachteten Sprung bei der Wahrnehmung der Bewegungsrichtung beim Tritonus **C-Fis** (bzw. in dessen Nähe) angenommen werden kann:

Shepard-Töne unter den Hüllkurven **H1** und **H3** können aufgrund der Kurvenform beim **C** nur **5** anstelle von **6** Teiltönen ausbilden. Das führt dazu, dass bei Klängen dieser Kategorie der Tritonus von **C** nach **Fis** **nach oben** zu steigen scheint und der von **Fis** nach **C** **nach unten** (ähnlich beim Tritonus **Cis-G** und **D-Gis**, wo die tiefsten Teiltöne beim **Cis** und **D** ebenfalls nur schwach ausgeprägt sind, s. Abb. 2). Mit anderen Worten: Es scheint derjenige Ton im Tritonusintervall als der **tiefere** empfunden zu werden, dessen Teiltonamplituden zu den **tiefen Frequenzen hin stärker** abfallen.

### Ergebnisse

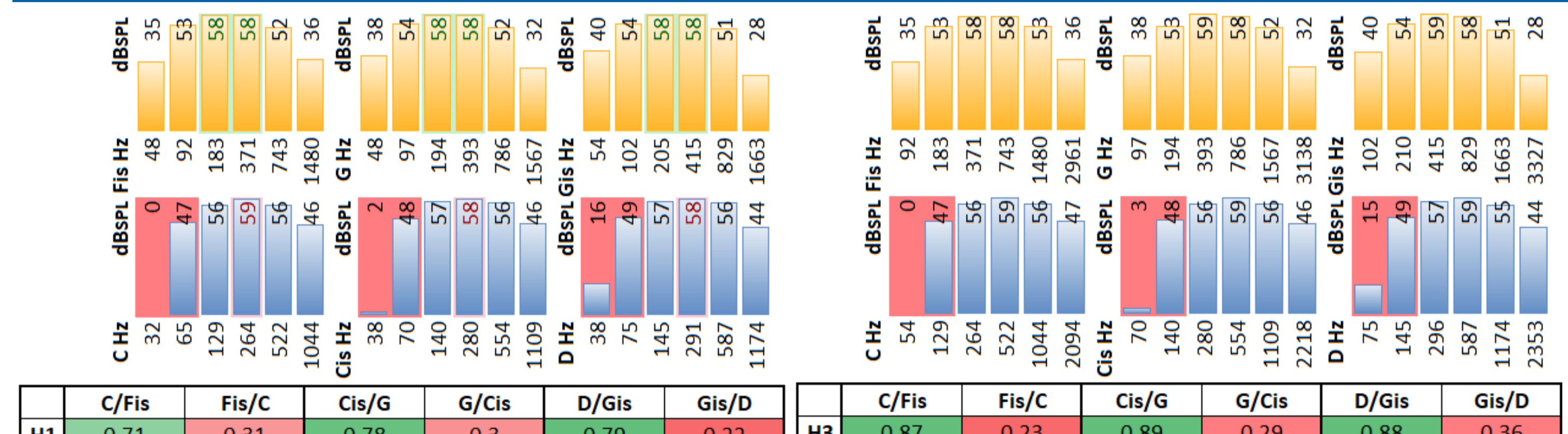


Abb. 2: Amplituden und Frequenzen der Shepard-Tritoni **C-Fis**, **Cis-G** und **D-Gis** unter den Shepard-Hüllkurven **H1** und **H3**. Darunter die Mittelwerte der Versuchspersonen-Urteile (1 = das Intervall geht aufwärts, 0 = das Intervall geht abwärts). Es wird deutlich: der Ton mit der stärksten Steigung zwischen dem 1. und 2. Teilton (rot markiert) wird im Intervall mit großer Übereinstimmung als der tiefere empfunden.

Ähnliches gilt für die Hüllkurven **H2** und **H4**: Hier ist es so, dass die Shepard-Töne aufgrund der Filterkurven beim **Fis** nur **5** anstelle von **6** Teiltönen ausbilden (und ähnlich schwach ausgeprägt sind der tiefste Teilton bei **G** und **Gis**). Die oben gefundene Regel lässt sich jedoch nur bei der Hüllkurve **H2** wiederfinden, bei der höchsten Hüllkurve (**H4**) jedoch nicht; hier verhält sich die Richtungsempfindung eher zufällig:

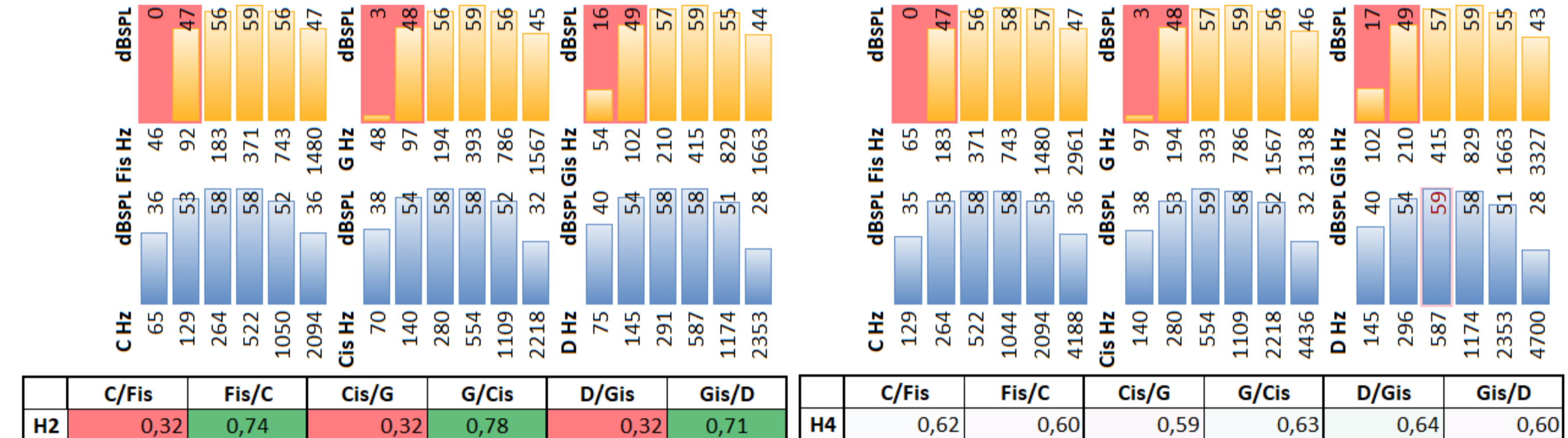


Abb. 3: Amplituden und Frequenzen der Shepard-Tritoni **C-Fis**, **Cis-G** und **D-Gis** unter den Shepard-Hüllkurven **H2** und **H4**. Darunter die Mittelwerte der Versuchspersonen-Urteile (1 = das Intervall geht aufwärts, 0 = das Intervall geht abwärts). Auch hier wird bei der Hüllkurve **H2** deutlich: der Ton mit der stärksten Steigung zwischen dem 1. und 2. Teilton (rot markiert) wird im Intervall mit großer Übereinstimmung als der tiefere empfunden. Dies gilt jedoch nicht für die Stimuli unter der Hüllkurve **H4**.

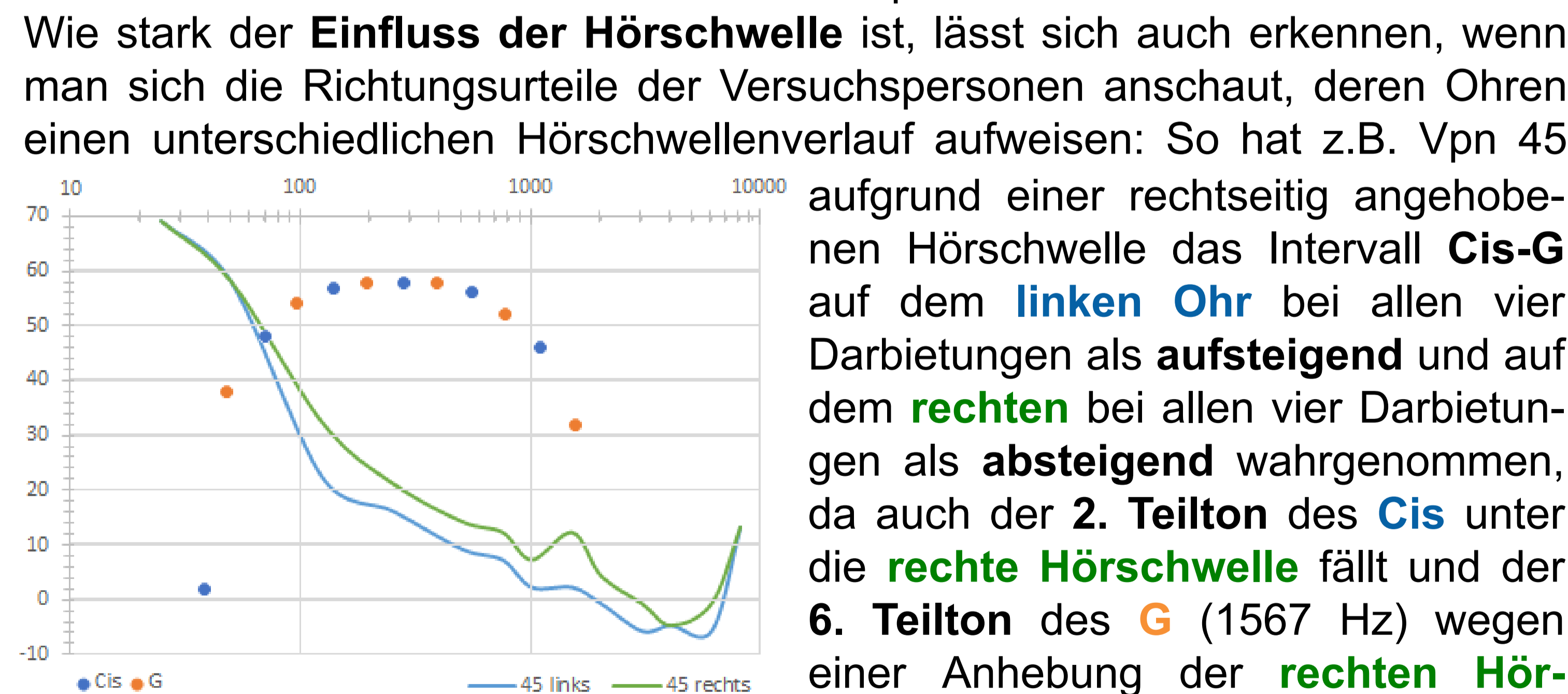
Tritonus	Hüllkurve H1		Hüllkurve H2		Hüllkurve H3		Hüllkurve H4	
	p	d	p	d	p	d	p	d
C/Fis vs. Fis/C	0,000	1,35	0,000	1,34	0,000	2,69	0,330	0,21
Cis/G vs. G/Cis	0,000	1,61	0,000	1,69	0,000	2,42	0,480	0,15
D/Gis vs. Gis/D	0,000	1,95	0,000	1,08	0,000	1,88	0,592	0,11
Dis/A vs. A/Dis	0,000	0,97	0,000	0,99	0,000	0,85	0,159	0,30
E/Ais vs. Ais/E	0,000	0,93	0,062	0,40	0,465	0,15	0,886	0,03
F/H vs. H/F	0,235	0,25	0,000	1,59	0,000	1,88	0,023	0,49

Abb. 4: Zweiseitiger t-Test zur Ermittlung der Signifikanz der Intervallrichtungsentscheidung in Abhängigkeit von der Hüllkurve (p = rot markiert bei p > 0,05; d = Effektstärke Cohens d). Die Entscheidung für eine bestimmte Intervallrichtung ist für Tritoni unter den Hüllkurven **H1**, **H2** und **H3** in fast allen Fällen höchstsignifikant, unter der Hüllkurve **H4** jedoch zufällig.

**Ursachen** für die hüllkurvenabhängige Richtungsentscheidung bei **H1**, **H2**, **H3**:

- Bei den Hüllkurven **H1**, **H2** und **H3** liegt der jeweils **tiefste (1.) Teilton** unterhalb der Hörschwelle, bei der Hüllkurve **H4** nicht (s. Abb. 1).
- Bei den Hüllkurven **H1**, **H2** und **H3** endet der jeweils **höchste (6.) Teilton** im Bereich zwischen 2-4 kHz (wo die menschliche Hörfähigkeit besonders gut ist), bei der Hüllkurve **H4** endet der höchste Teilton darüber. Dadurch: Unter den Hüllkurven **H1**, **H2** und **H3** ist der Einfluss des jeweils **höchsten (6.) Teiltons** stärker als es sein durch die Hüllkurve geschwächter Pegel vermuten lässt.

So lässt sich die oben aufgestellte Regel für die Tritoni unter den Hüllkurven **H1**, **H2** und **H3** unter Einbeziehung der **Hörschwelle** folgendermaßen modifizieren: Es wird derjenige Ton mit dem jeweils **tiefere 2. und 6. Teilton** als der **tiefere Ton** des Tritonusintervalls empfunden. Wie stark der **Einfluss der Hörschwelle** ist, lässt sich auch erkennen, wenn man sich die Richtungsurteile der Versuchspersonen anschaut, deren Ohren einen unterschiedlichen Hörschwellenverlauf aufweisen: So hat z.B. Vpn 45 aufgrund einer rechtseitig angehobenen Hörschwelle das Intervall **Cis-G** auf dem **linken Ohr** bei allen vier Darbietungen als **aufsteigend** und auf dem **rechten** bei allen vier Darbietungen als **absteigend** wahrgenommen, da auch der **2. Teilton** des **Cis** unter die **rechte Hörschwelle** fällt und der **6. Teilton** des **G** (1567 Hz) wegen einer Anhebung der **rechten Hörschwelle** bei 1500 Hz nicht genügend präsent sein konnte.



### Zusammenfassung

Das Tritonus-Paradox erweist sich bei näherer Betrachtung als ein **Artefakt**, welches sich auf den Verlauf der von Deutsch gewählten **Shepard-Hüllkurven** sowie auf die **Hörschwellen** der HörerInnen zurückführen lässt.

Bei Shepard-Tönen mit tiefen Hüllkurven (**H1**, **H2**, **H3**) lässt sich aufgrund der Hüllkurvenform und der zu den tiefen Frequenzen hin ansteigenden Hörschwelle mit ihrer Senke bei 2-4 kHz für die Intervalle **C-Fis**, **Cis-G** und **D-Gis** die Regel aufstellen, dass der Intervallton mit dem **tiefere 2. und 6. Teilton** als der jeweils **tiefere** empfunden wird.

### Literatur

Deutsch, D. (1986): A musical paradox. Music Perception 3(3), 275-280. <-> Deutsch, D. (1991): The tritone paradox: An influence of language on music perception. Music Perception 8(4), 335-347. <-> Deutsch, D. (1995): Musical illusions. La Jolla: Philomel. <-> Giannandrea, J. (1998): The tritone paradox: Effects of pitch class and position of the spectral envelope. Music Perception 15(3), 253-264. <-> Ragazzo, F. (2002): The tritone paradox and perception of single octave related complexes. Music Perception 19(2), 155-168. <-> Repp, B. (1994): The tritone paradox and the pitch range of the speaking voice: A dubious connection. Music Perception 12(2), 227-255. <-> Shepard, R.N. (1964): Circularity in judgments of relative pitch. JASA 36, 2345-2353. <-> Terhardt, E., Grubert, A. (1988): Zur Erklärung des Tritonus-Paradoxons. Fortschritte der Akustik, DAGA88, 717-720.