

Adaptive Verfahren in der Psychophysik

Effiziente Bestimmung von Absolut- und Unterschiedsschwellen

Manuel Kühner

Heiner Bubb

Klaus Bengler

Jörg Wild

1 Einleitung

Bei vielen Fragestellungen in den Projekten des Lehrstuhls für Ergonomie ist es notwendig, im Rahmen von Hypothesentests Schwellwerte zu bestimmen. Der folgende Artikel zeigt Möglichkeiten auf, wie Schwellwerte schnell und zuverlässig bestimmt werden können. Darüber hinaus erlauben ausgewählte Literaturhinweise eine zielgerichtete Vertiefung der Thematik.

In der Psychophysik wird nach dem Zusammenhang zwischen den physikalischen Merkmalen von Reizen, beispielsweise Reizintensität oder -dauer und dem Erleben gefragt. Von zentraler Bedeutung ist hierbei der Begriff der Schwelle. Es werden zwei Arten von Schwellen unterschieden: Absolut- und Unterschiedsschwelle (z. B. Baird & Noma, 1978; oder Gescheider, 1997).

Die Absolutschwelle DT (engl. *Detection Threshold*) ist die kleinste Reizintensität, die nötig ist, damit eine Person einen Reiz in 50 % der Fälle entdeckt. Die Unterschiedsschwelle JND (engl. *Just Noticeable Difference*) ist die kleinste Differenz zwischen zwei Reizen, die einer Person in 50 % der Fälle ihre Unterscheidung erlaubt. Dabei ist das 50%-Kriterium prinzipiell willkürlich gewählt, aber in der Literatur dennoch üblich.

2 Grundlagen

Für das Verständnis der weiter unten beschriebenen adaptiven Verfahren zur Schwellwertbestimmung ist es zunächst notwendig, die klassischen Verfahren zu verstehen. Die Grundlagen zur sogenannten psychometrischen Funktion und zu den verschiedenen Antwort-Paradigmen sind ebenfalls von zentraler Bedeutung und werden daher in den folgenden Abschnitten kurz angesprochen.

2.1 Klassische Verfahren

Die drei klassischen Verfahren zur Ermittlung von Schwellwerten gehen auf Fechner (1860) zurück – heute kennt man sie unter den Bezeichnungen

- Konstantreiz- oder Konstanzmethode,
- Grenzverfahren und
- Herstellungsverfahren.

Für die weiteren Betrachtungen ist vor allem das Grenzverfahren interessant. Beim Grenzverfahren werden einem Probanden in mehreren Durchgängen auf und absteigende Reize (Absolutschwelle) beziehungsweise Reizpaare (Unterschiedsschwelle) dargeboten. Die jeweiligen Anfangsintensitäten werden meistens variiert.

Bei einem Experiment zur Bestimmung einer Absolutschwelle wird ein Proband gefragt, ob er den Reiz x wahrnimmt oder nicht. Bei einer Veränderung der Antwort, also bei einem Ja/Nein-Wechsel, wird der jeweilige Durchgang beendet. Die Absolutschwelle ergibt sich durch Mittelung der Reizintensitäten an den Ja/Nein-Grenzen.

Zur Ermittlung einer Unterschiedsschwelle werden einem Probanden Reizpaare (Konstantreiz R und Vergleichsreiz $R + \Delta R$) präsentiert. Der Vergleichsreiz ist dabei entweder anfangs intensiver (absteigende Durchgänge) oder weniger intensiv (aufsteigende Durchgänge) als der Konstantreiz. Der Proband muss den Vergleichsreiz in Bezug auf den Konstantreiz beurteilen (größer/gleich/kleiner). Somit ergeben sich pro Durchlauf zwei Antwort-Wechsel, wobei der jeweilige Durchgang nach dem zweiten Antwort-Wechsel beendet wird. Die obere beziehungsweise untere Unterschiedsschwelle ergibt sich ebenfalls durch Mittelung der Reizintensitäten an den Übergangspunkten. Tabelle 1 zeigt das fiktive Ergebnis eines solchen Experiments.

Tabelle 1: Fiktives Ergebnis eines Grensverfahrens-Experiments zur Ermittlung einer Unterschiedsschwelle. Die obere Unterschiedsschwelle $\Delta \bar{R}_{\text{JND,o}}$ ergibt sich durch Mittelung zu 2,33 und die untere Unterschiedsschwelle $\Delta \bar{R}_{\text{JND,u}}$ betragsmäßig zu 2,5.

ΔR	①↓	②↑	③↓	④↑	⑤↓	⑥↑
6	>					
5	>				>	
4	>		>		>	
3	>		>	>	=	
2	=	>	=	=	=	>
1	=	=	=	=	=	=
0	=	=	=	=	=	=
-1	=	=	=	=	=	=
-2	<	=	=	=	<	=
-3		<	<	=		=
-4		<		<		<
-5		<		<		<
-6		<		<		<
$\Delta R_{\text{JND,o}}$	2,5	1,5	2,5	2,5	3,5	1,5
$\Delta R_{\text{JND,u}}$	-1,5	-2,5	-2,5	-3,5	-1,5	-3,5

2.2 Die psychometrische Funktion

Der Zusammenhang zwischen den Antworten beziehungsweise der Wahrnehmung einer Person und dem physikalischen Reiz lässt sich durch eine sogenannte psychometrische Funktion beschreiben – eingeführt wurde der Begriff von Urban (1908, S. 107). Sie ist eine stetige eindimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilung und modelliert die Wahrnehmung als einen stationären stochastischen Prozess. Die psychometrische Funktion stellt die theoretische Grundlage für eine Vielzahl von psychophysischen Verfahren dar. Unter den klassischen Verfahren hat lediglich die hier nicht näher diskutierte Konstanzmethode Stützstellen für eine psychometrische Funktion zum Ergebnis. Anhand des folgenden Beispiels wird das Grundkonzept verdeutlicht.

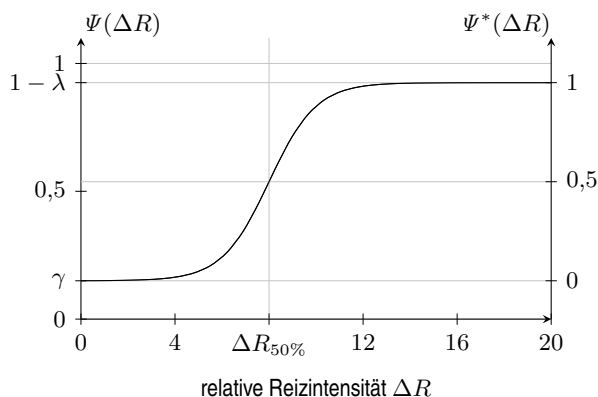


Bild 1: Hypothetische psychometrische Funktion eines Unterschiedsschwellen-Experiments – die Unterschiedsschwelle gemäß dem 50%-Kriterium liegt bei 8.

In einem hypothetischen Experiment werden einem Probanden zuerst ein Konstantreiz R und danach ein variabler Ver-

gleichsreiz $R + \Delta R$ beispielsweise in Form zweier unterschiedlich lauter Töne präsentiert, dabei gilt $\Delta R \geq 0$. Der Proband muss beurteilen, ob der Vergleichsreiz intensiver als der Konstantreiz oder gleich intensiv ist. In Bild 1 beschreibt die psychometrische Funktion die Wahrscheinlichkeit für die Nennung der Antwort “intensiver”. Das Ergebnis des Experiments ist zunächst die beobachtete Wahrscheinlichkeit $\Psi(\Delta R)$. Idealiert verläuft eine derartige psychometrische Funktion zwischen 0 und 1. Man unterscheidet jedoch zwei Parameter, die den Wertebereich einschränken können: die Ratewahrscheinlichkeit γ und die Lapsus-Rate λ .

Die Ratewahrscheinlichkeit γ modelliert im Falle eines Unterschiedsschwellen-Experimentes das vermeintliche Erkennen eines Reiz-Unterschiedes durch Raten. Die Lapsus-Rate λ hingegen modelliert ein beispielsweise nachlässigkeitsbedingtes Nichterkennen eines Reizunterschiedes im eigentlich überschwelligen Bereich – sie ist normalerweise vernachlässigbar.

Die um die Ratewahrscheinlichkeit γ und Lapsus-Rate λ korrigierte Wahrscheinlichkeit

$$\Psi^*(\Delta R) = \frac{\Psi(\Delta R) - \gamma}{1 - \gamma - \lambda} \quad (1)$$

wird zur Bestimmung der Schwellwerte herangezogen. Im Beispiel – siehe Bild 1 – ergibt sich die Unterschiedsschwelle $\Delta R_{50\%}$ gemäß dem 50%-Kriterium (korrigierte Wahrscheinlichkeit) bei einer relativen Reizstärke von 8. Gleichung 1 wird auch als erweiterte Abbott’sche Formel bezeichnet (Treutwein, 1995, S. 2504; Treutwein & Strasburger, 1999, S. 87).

2.3 Antwort-Paradigmen

Bei den bisherigen zwei Beispielen wurde jeweils die subjektive Antwort des Probanden ausgewertet. Dieses Antwort-Paradigma wird unabhängig von den tatsächlichen Antwortmöglichkeiten als Ja/Nein-Paradigma bezeichnet. Hierbei vermischen sich sensorische und kognitive Entscheidungsprozesse: Ein Proband erkennt einen Reiz oder Reizunterschied erst, nachdem eine interne subjektive Schwelle – ein Kriterium – überschritten wurde. Zwei Probanden können daher das gleiche sensorische interne Empfinden haben und trotzdem unterschiedlich urteilen.

Bei Experimenten mit dem Ja/Nein-Paradigma lässt sich das Kriterium vom Versuchsleiter nur bedingt kontrollieren, daher wurden sogenannte Zwangswahl-Verfahren beziehungsweise Forced-Choice-Methoden entwickelt (z. B. W. H. Ehrenstein & A. Ehrenstein, 1999, S. 1219). Die Grundidee wird nachfolgend anhand eines Beispiels erläutert.

In einem Experiment soll die Absolutschwelle für die Lautstärke eines Tons mit einer festen Frequenz ermittelt werden. Durch ein optisches Signal wird dem Probanden das Zeitintervall angezeigt, in dem der Ton (Zielreiz) abgespielt wird. Die Lautstärke wird dabei pseudo-zufällig variiert. Bei einem Ja/Nein-Paradigma muss der Proband urteilen, ob der Ton hörbar war oder nicht (Ja/Nein) – jeder Durchgang besteht aus einem Intervall. Ausgewertet werden die subjektiven Antworten – die resultierende psychometrische Funktion entspricht prinzipiell der in Bild 1 dargestellten Funktion.

Unter Anwendung eines Forced-Choice-Paradigmas hingegen, besteht jeder Durchgang beispielsweise aus drei Intervallen. Allerdings wird nur in einem der drei Intervalle der Ton tatsächlich abgespielt. Der Proband hat nun die Aufgabe, das Intervall mit dem Zielreiz zu identifizieren und ist somit gezwungen, sich zu entscheiden, auch wenn er sich nicht sicher ist. Da stets ein zufälliges Intervall pro Durchgang den Ton enthält, ist die Ratewahrscheinlichkeit γ von $\frac{1}{3}$ a priori bekannt.

Ausgewertet werden im Gegensatz zum Ja/Nein-Paradigma die objektiv richtigen Antworten. Bei der psychometrischen Funktion wird dann nicht mehr die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Antwort in Abhängigkeit der (relativen) Reizintensität aufgetragen, sondern die Wahrscheinlichkeit für eine objektiv korrekte Antwort. Die Schwelle gemäß dem 50%-Kriterium lässt sich bei vernachlässigbarer Lapsus-Rate λ bei einer beobachteten Wahrscheinlichkeit Ψ von 66,7% beziehungsweise einer ratekorrigierten Wahrscheinlichkeit Ψ^* von 50% ablesen.

Durch Zwangswahl-Verfahren ermittelte Schwellwerte sind in der Regel niedriger als durch "zwanglose" Verfahren ermittelte Schwellwerte.

3 Adaptive Verfahren zur Schwellwertbestimmung

Oft ist man nicht an dem genauen Verlauf der psychometrischen Funktion, sondern lediglich an den Schwellwerten interessiert. Die klassischen Verfahren weisen in dieser Hinsicht Nachteile auf, da viele Informationen fern der eigentlichen Schwellwerte gesammelt werden (z. B. Falmagne, 1986, S. 1-24). Das Grenz- und das hier nicht diskutierte Herstellungsverfahren sind zudem für den Probanden sehr einfach zu durchschauen und gelten als ungenau. Insbesondere das Herstellungsverfahren führt aber sehr schnell zu Ergebnissen.

Neben den klassischen Verfahren haben sich sogenannte adaptive Verfahren im Bereich der Psychophysik etabliert. Sie

können als Variation des Grenzverfahrens gesehen werden. Im Gegensatz zu den klassischen Verfahren wählt der Versuchsleiter die zu präsentierenden Reizintensitäten nicht im Vorfeld aus, sondern die Reizintensität richtet sich nach den früheren Antworten des Probanden (z. B. Hellbrück & Ellermeier, 2004, S. 227). Adaptive Verfahren können sowohl in Verbindung mit einem Ja/Nein-Paradigma als auch mit einem Forced-Choice-Paradigma verwendet werden.

Im Laufe der Zeit wurde eine Vielzahl von unterschiedlichen adaptiven Verfahren entwickelt. Alleine in Treutwein (1995) werden 21 Verfahren aufgezählt. Prinzipiell lassen sich parametrische und nicht-parametrische Verfahren unterscheiden.

Bei den parametrischen Verfahren müssen vom Versuchsleiter mehrere Annahmen über die zugrunde liegende psychometrische Funktion gemacht werden (z. B. Kingdom & Prins, 2010, S. 127). Die nicht-parametrischen Verfahren hingegen setzen im Wesentlichen lediglich die Monotonie der psychometrischen Funktion im zu untersuchenden Bereich voraus (z. B. Levitt, 1971, S. 448).

Gerade in neuen Forschungsbereichen werden eher nicht-parametrische Verfahren eingesetzt, da es für die notwendigen Annahmen der parametrischen Verfahren oft zu wenig Vorwissen gibt (Macmillan & Creelman, 2004, S. 291). Im Folgenden wird auf drei wichtige Vertreter der nicht-parametrischen Verfahren eingegangen.

Die verschiedenen Verfahren bieten zum Teil unterschiedliche Antworten auf die folgenden vier Fragen (Macmillan & Creelman, 2004, S. 277):

1. Unter welchen Bedingungen soll die aktuelle Reizintensität geändert werden?
2. Welche Reizintensität soll bei einer Änderung gewählt werden?
3. Unter welchen Bedingungen wird das Experiment beendet?
4. Mit welcher Berechnungsvorschrift wird der Schwellwert berechnet?

Darüber hinaus muss der Versuchsleiter die Zielwahrscheinlichkeit Ψ_{Ziel} , auf der das Verfahren konvergieren soll, festlegen. Bei einem Ja/Nein-Paradigma beträgt die Zielwahrscheinlichkeit typischerweise 50% während sie bei einem Forced-Choice-Paradigma wie im Beispiel zuvor häufig 66,7% beträgt.

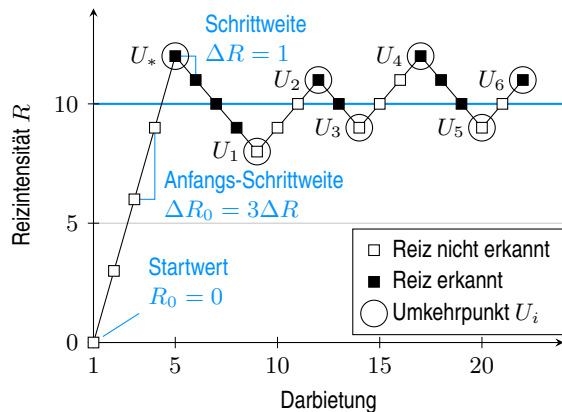


Bild 2: Exemplarischer Verlauf eines Experimentes zur Bestimmung einer Absolutschwelle nach dem Simple-Staircase-Verfahren – das Verfahren konvergiert hier bei der Reizintensität von 10.

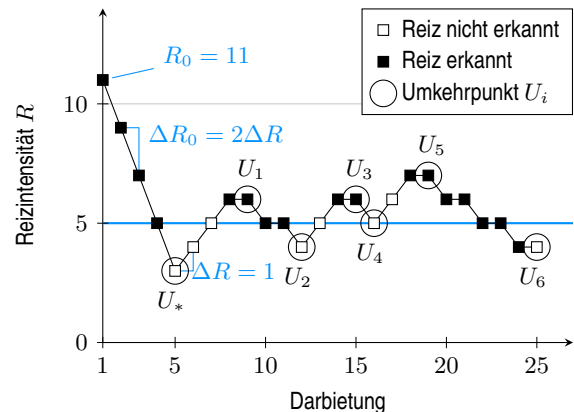


Bild 3: Exemplarischer Verlauf eines Experimentes zur Bestimmung einer Absolutschwelle nach dem Transformed-Up/Down-Verfahren – das Verfahren konvergiert hier bei der Reizintensität von 5.

4 Ausgewählte adaptive Verfahren

Drei nicht-parametrische adaptive Verfahren werden im Folgenden kurz vorgestellt. Diese Verfahren gehören zu den ältesten der adaptiven Verfahren, sind aber weit verbreitet und bilden zum Teil die Grundlage für neuere Verfahren. Alle Verfahren sind geeignet, um sowohl Absolut- als auch Unterschiedsschwellen zu bestimmen. Darüber hinaus lassen sie sich mit beiden Antwort-Paradigmen kombinieren.

4.1 Simple-Staircase-Verfahren

Das von Dixon und Mood (1948) entwickelte Simple-Staircase- oder Up/Down-Verfahren ist neben der Békésy-Audiometrie (von Békésy, 1947) das älteste adaptive Verfahren. Die Grundidee ist einfach: Erkennt ein Proband einen Reiz beziehungsweise einen Reizunterschied, so wird die Reizintensität bei der nächsten Darbietung um einen festen Betrag verringert beziehungsweise – bei Nichterkennen – erhöht. Bild 2 zeigt einen exemplarischen Verlauf bei der Bestimmung einer Absolutschwelle mit einigen wichtigen Parametern in Kombination mit dem Ja/Nein-Paradigma.

Das Verfahren konvergiert bei der Reizintensität mit einer Zielwahrscheinlichkeit ψ_{Ziel} von 50%. Die Berechnung des Schwellwertes erfolgt typischerweise durch Mittelung der Reizintensitäten an den Umkehrpunkten U_i . Um das Erreichen der probandenindividuellen Schwelle zu beschleunigen, kann bis zum ersten Umkehrpunkt U_* eine größere Anfangs-Schrittweite ΔR_0 verwendet werden – im Beispiel ist diese drei Mal größer als die Schrittweite ΔR . Der erste Umkehrpunkt wird dann von der Schwellwertberechnung ausgeschlossen.

Das Experiment wird nach dem Erreichen einer zuvor festgelegten Anzahl von Umkehrpunkten oder Darbietungen beendet. Die Empfehlungen für die notwendige Anzahl von Umkehrpunkten gehen weit auseinander und reichen von vier bis vierzig (für eine Übersicht siehe z. B. Sincoc, 2008, S. 9).

Andere Autoren schlagen eine Reduzierung der Schrittweite zum Beispiel in Abhängigkeit der Anzahl der Darbietungen vor (für eine Übersicht siehe z. B. Levitt, 1971, S. 470-471).

4.2 Transformed-Up/Down-Verfahren

Neben der einfachen Durchschaubarkeit ist das feste Konvergenzniveau von 50% der Hauptnachteil des Simple-Staircase-Verfahrens. Levitt (1971) hat mit dem sogenannten Transformed-Up/Down-Verfahren eine Modifikation vorgeschlagen, mit der weitere – wenn auch nicht beliebige – Konvergenzniveaus möglich sind.

Bei einem Transformed-Staircase-Verfahren mit einer 2-Down/1-Up-Regel wird die Reizintensität reduziert, wenn der Proband den Reiz beziehungsweise den Reizunterschied zwei Mal in Folge erkannt hat – sie wird aber bereits nach einem einmaligen Nichterkennen wieder erhöht. Bild 3 zeigt einen entsprechenden exemplarischen Verlauf. In Bezug auf die Anfangs-Schrittweite, dem Abbruch-Kriterium und der Berechnung des Schwellwertes gelten die gleichen Überlegungen wie beim Simple-Staircase-Verfahren. Wetherill und Levitt (1965) (zitiert in Kingdom & Prins, 2010, S. 125) schlagen vor, zunächst eine 1-Up/1-Down-Regel zu verwenden, um das Konvergieren zu beschleunigen. In Bild 3 ist diese Empfehlung in Kombination mit einer größeren Anfangs-Schrittweite umgesetzt.

Mit einer n -Down/1-Up-Regel konvergiert das Verfahren idea-

lisiert bei

$$\Psi_{\text{konv}}(n) = \sqrt[n]{1/2}, \text{ mit } n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Im Beispiel mit einer 2-Down/1-Up-Regel konvergiert das Verfahren demnach bei einer Wahrscheinlichkeit von 71 %. In Kombination mit einem Forced-Choice-Paradigma mit m Alternativen (m -AFC) ergibt sich die ratekorrigierte Wahrscheinlichkeit Ψ_{konv}^* zu

$$\Psi_{\text{konv}}^*(n, m) = \frac{\Psi_{\text{konv}}(n) - 1/m}{1 - 1/m}, \text{ mit } m \geq 2 \quad (3)$$

Hintergründe zu (3) finden sich beispielsweise in Treutwein (1995), Gescheider (1997, Kapitel 4), Klein (2001) oder Kingdom und Prins (2010, Kapitel 4.3).

Die üblicherweise angestrebte ratekorrigierte Zielwahrscheinlichkeit Ψ_{Ziel}^* von 50 % lässt sich daher mit einer 2-Down/1-Up-Regel in Kombination mit einem Forced-Choice-Paradigma mit 3 Alternativen (3-AFC) nahezu erreichen (56 %).

4.3 PEST-Verfahren

Das PEST-Verfahren von Taylor und Creelman (1967a) (Erratum Taylor & Creelman, 1967b) ist das erste adaptive Verfahren, bei dem ein sequentieller statistischer Test verwendet wird. Das Verfahren erlaubt es dem Versuchsleiter, das Konvergenzniveau frei zu wählen. PEST steht dabei für *Parameter Estimation by Sequential Testing*. Mit Hilfe eines vereinfachten Wald-Tests (Wald, 1947) wird überprüft, ob die aktuelle Reizintensität mit der erwarteten Trefferquote beziehungsweise Zielwahrscheinlichkeit erkannt wird. Der Versuchsleiter definiert dafür eine maximal erlaubte Abweichung von der erwarteten Trefferquote. Weicht die beobachtete Trefferquote mehr als erlaubt von der erwarteten ab, so wird die Nullhypothese verworfen und Reizintensität entsprechend angepasst. Die Nullhypothese beinhaltet die Gleichheit der beobachteten und der geforderten Trefferquote. Liegt die beobachtete Trefferquote über oder unter der geforderten, so ist die aktuell gewählte Reizintensität zu hoch beziehungsweise zu niedrig.

Die Schrittweite wird dabei anhand eines Satzes heuristischer Regeln bestimmt. Eine Regel lautet zum Beispiel, dass nach jedem Umkehrpunkt, die Schrittweite halbiert wird (für weitere Details siehe z. B. Taylor & Creelman, 1967a; Macmillan & Creelman, 2004, S. 278-283; Leek, 2001; oder Ciba, 2008, S. 45-48). Das Experiment wird beendet, wenn eine zuvor definierte minimale Schrittweite erreicht wird. Als Schwellwert dient die zuletzt dargebotene Reizintensität.

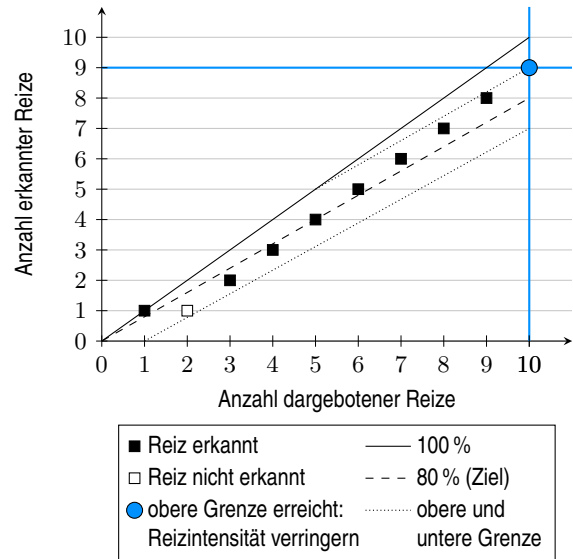


Bild 4: Visualisierung des vereinfachten Wald-Tests, wie er beim PEST-Verfahren verwendet wird – Darstellung angelehnt an Macmillan und Creelman (2004, S. 279, Fig. 11.3).

Bild 4 visualisiert den sequentiellen statistischen Test – die Zielwahrscheinlichkeit beträgt 80 % und die maximal erlaubte Abweichung beträgt ± 1 . Bei der zehnten Darbietung verletzt die beobachtete Trefferquote die obere Grenze und die Nullhypothese kann verworfen werden: Die Reizintensität ist zu hoch und muss verringert werden. Die durchgezogene Linie kennzeichnet die maximal erzielbare Trefferquote.

5 Evaluation der Verfahren

In der Literatur finden sich mehrere Studien, in denen verschiedene Verfahren in Kombination mit verschiedenen Antwort-Paradigmen evaluiert werden - Übersichten finden sich beispielsweise in Leek (2001, S. 1289-1291), Macmillan und Creelman (2004, S. 289-294) oder Gelfand (2009, S. 155). Die Ergebnisse basieren überwiegend auf Computer-Simulationen ansonsten auf Experimenten mit teilweise nur drei Probanden. Im Rahmen dieses Artikels lassen sich die teilweise widersprüchlichen Studienergebnisse nicht zusammenfassen.

6 Tipps für die Praxis

Verschiedene Studien zeigen, dass Zielwahrscheinlichkeiten unterhalb des Wendepunktes der psychometrischen Funktion ungünstige statistische Eigenschaften aufweisen (z. B. Green, 1990a; bzw. (Erratum) Green, 1990b). Insbesondere

re die Kombination mit einem Forced-Choice-Paradigma mit zwei Alternativen (2-AFC) ist durch starke Beschneidung des Wertebereichs der psychometrischen Funktion ungünstig (z. B. McKee, Klein & Teller, 1985; für eine Übersicht siehe Leek, 2001, S. 1290-1291; oder Macmillan & Creelman, 2004, S. 280-281, S. 292-293). Empfehlenswert sind Forced-Choice-Paradigmen mit drei oder vier Alternativen – allerdings verlängert sich mit der Anzahl der Alternativen auch die Versuchsdauer.

Eine gängige Empfehlung, um die zum Teil einfache Durchschaubarkeit der Verfahren zu reduzieren, ist die Verschachtelung von mehr als einem adaptiven Verfahren. Beispielsweise kann man Verfahren kombinieren, die unterschiedliche Konvergenzniveaus haben, oder eine Annäherung an den Schwellwert von unten und von oben kombinieren. In der Literatur wird dies häufig *Interleaving* genannt. Der offensichtliche Nachteil dieser Methode ist die deutliche Erhöhung der benötigten Darbietungen und damit der Versuchsdauer.

Für die softwareseitige Implementierung der einzelnen Verfahren stehen zum Teil mächtige Bibliotheken für verschiedene Programmiersysteme zur Verfügung. Für das weit verbreitete MATLAB von THE MATHWORKS kommt beispielsweise die Palamedes-Toolbox aus Kingdom und Prins (2010) in Frage (<http://www.palamedestoolbox.org/>).

Literatur

- Baird, J. C. & Noma, E. J. (1978). *Fundamentals of scaling and psychophysics*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- von Békésy, G. (1947). A new Audiometer. *Acta otolaryng*, 35, 411–422.
- Ciba, S. (2008). *Erstellung einer Softwarebibliothek für Hörversuche: Programmkonzept und zu implementierende Testverfahren*. (Magisterarbeit, Institut für Sprache und Kommunikation an der Technische Universität Berlin).
- Dixon, W. J. & Mood, A. M. (1948). A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data. *Journal of the American Statistical Association*, 43(241), 109–126.
- Ehrenstein, W. H. & Ehrenstein, A. (1999). Psychophysical Methods. In U. Windhorst & H. Johansson (Hrsg.), *Modern Techniques in Neuroscience Research* (Kap. 43, S. 1211–1241). Springer.
- Falmagne, J.-C. (1986). Psychophysical Measurement and Theory. In K. R. Boff, L. Kaufman & J. P. Thomas (Hrsg.), *Handbook of Perception and Human Performance: Bd. 1. Sensory Processes and Perception* (Kap. 1, Bde. 2). Wiley-Interscience.
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik* (Bde. 2). Leipzig: Breitkopf & Härtel.
- Gelfand, S. A. (2009). *Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics* (5. Aufl.). Informa Healthcare.
- Gescheider, G. A. (1997). *Psychophysics: The Fundamentals* (3. Aufl.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Green, D. M. (1990a). Stimulus selection in adaptive psychophysical procedures. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87, 2662–2674.
- Green, D. M. (1990b). Stimulus selection in adaptive psychophysical procedures (**Erratum**). *Journal of the Acoustical Society of America*, 88, 2486.
- Hellbrück, J. & Ellermeier, W. (2004). *Hören: Physiologie, Psychologie und Pathologie* (2. Aufl.). Hogrefe.
- Kingdom, F. A. A. & Prins, N. (2010). *Psychophysics: A Practical Introduction*. Academic Press.
- Klein, S. A. (2001). Measuring, estimating, and understanding the psychometric function: A commentary. *Attention, Perception, & Psychophysics (Sonderausgabe)*, 63(8), 1421–1455.
- Leek, M. R. (2001). Adaptive procedures in psychophysical research. *Attention, Perception, & Psychophysics (Sonderausgabe)*, 63(8), 1279–1292.
- Levitt, H. (1971). Transformed Up-Down Methods in Psychoacoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 49, 467–477.
- Macmillan, N. A. & Creelman, C. D. (2004). *Detection Theory: A User's Guide*. Routledge.
- McKee, S. P., Klein, S. A. & Teller, D. Y. (1985). Statistical properties of forced-choice psychometric functions: Implications of probit analysis. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 37, 286–298.
- Sincock, B. P. (2008). *Clinical applicability of adaptive speech testing: a comparison of the administration time, accuracy, efficiency and reliability of adaptive speech tests with conventional speech audiometry*. (Masterthesis, University of Canterbury).
- Taylor, M. M. & Creelman, C. D. (1967a). PEST: Efficient estimates on probability functions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 41, 782–787.
- Taylor, M. M. & Creelman, C. D. (1967b). PEST: Efficient estimates on probability functions (**Erratum and Note**). *Journal of the Acoustical Society of America*, 42, 1097.
- Treutwein, B. (1995). Adaptive Psychophysical Procedures. *Vision Research*, 35(17), 2503–2522.
- Treutwein, B. & Strasburger, H. (1999). Fitting the psychometric function. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 61(1), 87–106.
- Urban, F. M. (1908). *The application of statistical methods to the problems of psychophysics*. Experimental Studies in Psychology and Pedagogy. Philadelphia: Psychological Clinic Press.
- Wald, A. (1947). *Sequential analysis*. Wiley.
- Wetherill, G. B. & Levitt, H. (1965). Sequential estimation of points on a psychometric function. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 18(1), 1–10.