

Methoden der Psychophysik

Hans Irtel

Die Psychophysik kann als ein Reduktionsprogramm betrachtet werden, dessen Ziel es ist, psychologische Theorien zu entwickeln, in denen möglichst wenige psychologische Größen vorkommen. Eine Theorie ist dann eine *psychophysische* Theorie, wenn sie Verhalten allein aufgrund einer physikalischen Beschreibung der Reizsituation erklärt. Der psychologische Gehalt einer solchen Theorie steckt in den (*psychophysischen*) Gesetzen, die den Zusammenhang zwischen den quantitativen, physikalischen Beschreibungen der Reizsituation und den vorherzusagenden psychologischen Größen herstellen. Bei den psychologischen Größen handelt es sich in der Regel um die Intensität von Empfindungen, deren Messung sehr aufwendig ist, da sie individuell durchgeführt werden muß und in den meisten Fällen einer besonderen empirischen Begründung bedarf. Physikalische Reizbeschreibungen aufgrund physikalischer Messungen sind dagegen in der Regel leicht herzustellen, so daß psychophysische Theorien, wenn sie möglich sind, zu einfacheren Vorhersagen führen als Theorien, die eigene psychologische Messungen voraussetzen.

Ein Beispiel, bei dem eine psychologische Größe mit Hilfe eines psychophysischen Gesetzes durch eine physikalische Reizbeschreibung ersetzt wird, ist der Begriff *Helligkeit* als wahrgenommene Intensität eines Lichtreizes, der aus elektromagnetischer Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen besteht. Der Begriff *Helligkeit* soll dazu dienen vorherzusagen, wann zwei ausgedehnte Strahlungsquellen, die Strahlungen unterschiedlicher Wellenlängen abgeben, vor gleichen Umfeldern als gleich hell wahrgenommen werden. Die physikalisch meßbare Strahldichte der Strahlungsquellen ist dazu allein nicht geeignet, da in ihr die unterschiedliche Gewichtung verschiedener Wellenlängen durch das visuelle System des Menschen nicht berücksichtigt wird. Man konstruiert deshalb mit Hilfe psychophysischer Methoden eine Gewichtungsfunktion $V(\lambda)$, die jeder Wellenlänge λ ein Gewicht $V(\lambda)$ zuordnet, so daß eine Vorhersage der Urteile über die Gleichhelligkeit von Strahlungsquellen unter bestimmten Randbedingungen möglich wird. Die so definierte psychologische Größe wird zur Abgrenzung gegenüber anderen Konzepten der Helligkeit *Leuchtdichte* genannt. Ihr Zusammenhang mit der physikalischen Strahldichte ist

$$L_v = K_m \int L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

wobei $L_{e,\lambda}$ die Strahldichte der Wellenlänge λ , $V(\lambda)$ die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion und K_m eine dimensionale Konstante mit dem Wert 683 und der Bezeichnung [Lumen/Watt] ist (Wyszecki & Stiles, 1982). Um Urteile von Personen über die Helligkeit von Strahlungen in vergleichbaren Versuchsanordnungen vorherzusagen, müssen damit keine psychologischen Messungen der Helligkeit durchgeführt

werden, sondern es genügt eine physikalische Messung der Strahldichte und die Anwendung des oben definierten psychophysischen Gesetzes. Dies ist beispielsweise auch mit Hilfe eines geeignet konstruierten Gerätes möglich, dessen Meßergebnisse dann Verhaltensvorhersagen erlauben. Der psychologische Gehalt des Begriffs *Leuchtdichte* ist in der speziellen Form (1) und der Funktion $V(\lambda)$ enthalten. Um diese Funktion zu bestimmen, ist keine fundamentale Messung im Sinne der Meßtheorie notwendig; sie kann durch eine psychologische Relation auf den physikalisch gemessenen, spektralen Strahldichten definiert werden (Elzinga, 1984).

Formeln, die wie Gleichung (1) die Ausprägung einer psychologischen Größe, also etwa einer Empfindungsintensität, in Abhängigkeit von einer oder mehreren physikalischen Größen angeben, werden *psychophysische Funktionen* genannt. Die spezifischen Methoden der Psychophysik sind fast alle zur Konstruktion psychophysischer Funktionen entwickelt worden. Während die psychologische Meßtheorie psychologische Größen aufgrund qualitativer Daten konstruiert, werden in der Psychophysik vor allem solche Methoden angewandt, mit deren Hilfe der Zusammenhang zweier quantitativer Größen untersucht werden kann. Bevor einige dieser Methoden genauer dargestellt werden, sollen jedoch einige Konzepte der Psychophysik erläutert werden, die einerseits als Grundlage für die Konstruktion psychophysischer Funktionen dienen können, andererseits aber auch häufig direkt als Parameter zur Verhaltensbeschreibung in wahrnehmungspsychologischen Experimenten dienen.

1 Detektion und Diskrimination einfacher Reize

1.1 Die Konstanzmethode

Eine der einfachsten wahrnehmungspsychologischen Fragestellungen ist die, ob zwei Reize unterscheidbar sind oder nicht. Bei der experimentellen Untersuchung dieser Fragestellung versucht man, Reize so zu konstruieren, daß sie sich in möglichst wenigen physikalischen Merkmalen voneinander unterscheiden, um nachher genau angeben zu können, aufgrund welcher Merkmale die Reize unterscheidbar sind. Die Reizsituationen, die bei der *Konstanzmethode* benutzt werden, enthalten immer einen Standardreiz s und einen Vergleichsreiz x_i . Soll etwa untersucht werden, wie stark sich zwei Objekte in ihrer Masse unterscheiden müssen, damit sie als unterschiedlich schwer wahrgenommen werden, dann werden als Reize Objekte benutzt, die sich möglichst *nur* durch ihre Masse unterscheiden. Die Versuchsperson erhält bei jeder Beurteilung zuerst das Objekt s , den Standardreiz, danach das Objekt x_i , den Vergleichsreiz. Die Frage an die Versuchsperson ist, ob das zweite Objekt schwerer ist als das erste. Als Antwort wird nur „ja“ oder „nein“ zugelassen. Eine solche Reizsituation kann mit (s, x_i) bezeichnet werden, womit angedeutet ist, daß die Versuchsperson zuerst den Standardreiz mit der Masse s und danach den Vergleichsreiz mit der Masse x_i vorgelegt bekommt. Ihr Urteil („ja“ oder „nein“) wird dann als Reaktion auf die Reizsituation (s, x_i) aufgefaßt. Falls die Versuchsperson nun die Reizsituation (s, x_1) anders beurteilt als die Reizsituation (s, x_2) , dann werden die Reize x_1 und x_2 als bezüglich s unterscheidbar betrachtet. Dieses etwas komplizierte Vorgehen wird deshalb angewandt, weil es eine sehr gute Kontrolle der Randbedingungen erlaubt. Würde man keinen Standardreiz verwenden, sondern x_1 und x_2

direkt vergleichen lassen, dann ergäbe sich ein Reihenfolgeeffekt: Das Objekt, das zuerst angehoben wird, beeinflusst die Beurteilung des zweiten Objekts. Durch die Darbietung des konstanten Standardreizes wird zwar auch die Beurteilung des folgenden Objekts beeinflusst, allerdings geschieht dies für x_1 und x_2 in der gleichen Weise.

Die Urteile der Versuchsperson hängen auch vom Standardreiz ab. Dabei kann man beobachten, daß bei sehr geringen physikalischen Unterschieden zwischen Standard- und Vergleichsreiz die Versuchsperson zufällig urteilt. Sie gibt bei wiederholter Darbietung derselben Reizsituation (s, x_i) nicht immer das gleiche Urteil ab. Man nimmt deshalb an, daß für jede Reizsituation (s, x_i) eine Wahrscheinlichkeit $p_s(x_i)$ existiert, mit der die Versuchsperson bei der Darbietung von (s, x_i) auf die Frage, ob das zweite Objekt schwerer ist als das erste, mit „ja“ antwortet. Falls die Massen von s und x_i genügend ähnlich sind, dann hat diese Wahrscheinlichkeit einen Wert, der sowohl von 0 als auch von 1 verschieden ist. Der Wert von $p_s(x_i)$ ändert sich mit der Ausprägung von x_i . Je größer die Masse x_i ist, desto größer sollte auch die Wahrscheinlichkeit $p_s(x_i)$ sein.

Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeiten $p_s(x_i)$ kann die Unterscheidbarkeit von Reizen definiert werden. Dazu müssen beliebig viele, fein abstufbare Vergleichsreize x_i existieren, so daß es möglich ist, zu jeder Wahrscheinlichkeit π einen Reiz x_π zu finden, so daß die Antwortwahrscheinlichkeit bei der Darbietung von (s, x_π) genau den Wert π annimmt. Es gilt also $p_s(x_\pi) = \pi$. Der Reiz $x_{1/2}$ wird als *Punkt der subjektiven Gleichheit* (*point of subjective equality, pse*) bezeichnet, da die Versuchsperson diesen Reiz in der Hälfte der Fälle als schwerer als den Standardreiz einstuft und in der anderen Hälfte der Fälle nicht. Als Maß für die Unterscheidbarkeit von Reizen wird in der Psychophysik häufig der *ebenmerkliche Unterschied EU* (*just noticeable difference, jnd*) benutzt. Das ist diejenige Reizintensität, um die der Punkt der subjektiven Gleichheit $x_{1/2}$ nach unten oder nach oben verändert werden muß, damit sich eine Antwortwahrscheinlichkeit von $1/4$ oder $3/4$ ergibt. Da die Änderungen nach unten und oben nicht gleich sein müssen, nimmt man als Wert für den ebenmerklichen Unterschied das arithmetische Mittel. Es gilt also $EU = (x_{3/4} - x_{1/4})/2$. Der Reihenfolgeeffekt, der beim direkten Vergleich von Standard- und Vergleichsreiz auftritt, wird durch den *konstanten Fehler KF* beschrieben. Dies ist die Differenz zwischen dem Standardreiz und dem Punkt der subjektiven Gleichheit: $KF = x_{1/2} - s$.

Sollen die Parameter EU und KF aus empirischen Daten geschätzt werden, dann müßten dazu die Werte für $x_{1/4}$, $x_{1/2}$ und $x_{3/4}$ bekannt sein. Diese sind aber über die Wahrscheinlichkeiten $p_s(x_i)$ definiert, so daß die Formeln für EU und KF nur dann anwendbar sind, wenn im Experiment die Reize $x_{1/4}$, $x_{1/2}$ und $x_{3/4}$ tatsächlich auch als Vergleichsreize benutzt werden. Da dies ohne vorherige Kenntnis der Ergebnisse des Experiments sehr unwahrscheinlich ist, benutzt man für die praktische Anwendung andere Methoden, um die Parameter zu schätzen. Es wird angenommen, daß die Antwortwahrscheinlichkeiten $p_s(x)$ in einer ganz bestimmten Weise von den Reizintensitäten x abhängen, d.h. es soll eine Funktion $F_s(x)$ geben, die für jede Reizausprägung x angibt, welchen Wert die Antwortwahrscheinlichkeit $p_s(x)$ hat. Eine solche Funktion wird *psychometrische Funktion* genannt. Als Funktionsgleichung für $F_s(x)$ wird heute meist die logistische Funktion in der Form $F_s(x) = 1/(1 + e^{-(x-c)/a})$ angenommen. Die Parameter dieser Funktion können direkt als Maßzahlen für den

Punkt der subjektiven Gleichheit und den ebenmerklichen Unterschied benutzt werden, da gilt: $c = x_{1/2}$ und $a = x_{0.73} - x_{1/2}$. Da die logistische Funktion symmetrisch ist, kann deshalb der Parameter a als ebenmerklicher Unterschied und c als Punkt der subjektiven Gleichheit betrachtet werden. Ein Verfahren zur Schätzung der Parameter der logistischen Funktion wird von Bock und Jones (1968) dargestellt.

Da bei der Konstanzmethode die Vergleichsreize vor dem Experiment festliegen und zur Parameterschätzung eine wiederholte Darbietung notwendig ist, kann der Zeitaufwand für die Bestimmung des ebenmerklichen Unterschieds mit dieser Methode recht groß werden. Dies gilt vor allem dann, wenn der ebenmerkliche Unterschied für verschiedene Standardreize bestimmt werden soll. Eine erheblich effizientere Methode zur Bestimmung des ebenmerklichen Unterschieds besteht darin, nur solche Vergleichsreize anzubieten, bei denen die Antwortwahrscheinlichkeit nahe an dem gesuchten Wert liegt, für den ebenmerklichen Unterschied also nahe bei $3/4$. Dies ist mit adaptiven Verfahren möglich, die es erlauben, auf der Basis stochastischer Approximationsverfahren Vergleichsreize zu suchen, die bestimmte Antwortwahrscheinlichkeiten erzeugen. Auf diese Weise kann während der Reizvorgabe aus den bisherigen Daten das optimale weitere Vorgehen bestimmt und die Parameterschätzung durchgeführt werden (vgl. Wetherill, 1963; Levitt, 1970; Green, 1990).

1.2 Die Theorie der Signalentdeckung

Mit dem Konzept des ebenmerklichen Unterschieds wird versucht, die Leistung eines Beobachters beim Unterscheiden von Reizen mit einer einzigen Zahl zu beschreiben. Empirische Untersuchungen des Urteilsverhaltens zeigten jedoch, daß nicht nur die Signalintensität, sondern auch der motivationale Zustand des Beobachters die Urteile beeinflusst. Dieser Tatsache trägt die Theorie der Signalentdeckung (Green & Swets, 1966) dadurch Rechnung, daß sie versucht, die motivationalen Komponenten von den sensorischen zu trennen. Bei Experimenten zur Theorie der Signalentdeckung muß die Versuchsperson entscheiden, ob innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls ein Reiz bzw. Signal dargeboten wurde oder nicht. Der Versuchsleiter kontrolliert also, ob in einem bestimmten Zeitintervall, das etwa durch das Aufleuchten einer Lampe markiert wird, ein Signal, etwa ein Ton, erscheint oder nicht. Die Versuchsperson antwortet mit „ja“, falls sie glaubt, das Signal wahrgenommen zu haben, mit „nein“, falls sie kein Signal wahrnimmt. Die Signale werden wiederholt angeboten, jedoch immer mit konstanter Intensität. Es zeigt sich bei diesen Experimenten, daß die Versuchspersonen auch dann gelegentlich mit „ja“ antworten, wenn ein Darbietungsintervall kein Signal enthält, bzw. daß sie gelegentlich mit „nein“ antworten, obwohl ein Signal angeboten wurde. Im ersten Fall spricht man von *falschem Alarm*, im zweiten von *Verpasser*. Korrekt erkannte Signale werden als *Treffer* und *nein*-Antworten bei fehlendem Signal als *richtige Zurückweisung* bezeichnet.

In der Signalentdeckungstheorie wird angenommen, daß diese vier Ergebnisse von der Versuchsperson auf verschiedene Weise bewertet werden können und sich dadurch bei den Entscheidungen Veränderungen ergeben, obwohl die Signalintensität und die sensorische Leistung der Versuchsperson konstant bleiben. Man nimmt an, daß die Versuchsperson in jedem Zeitintervall eine Signalintensität x wahrnimmt, deren Ausprägung jedoch zufällig schwankt, auch wenn kein Signal vorhanden ist oder

das Signal immer mit konstanter Intensität angeboten wird. Die mit den vier möglichen Ergebnissen verbundenen Konsequenzen werden nun von der Versuchsperson so behandelt, als würde sie bei gegebener wahrgenommener Intensität x versuchen, den Erwartungswert ihres „Gewinns“ zu maximieren. Steht S für einen Durchgang mit Signal, R für einen Durchgang ohne Signal, j für eine „ja“-Antwort und n für eine „nein“-Antwort, dann sind (j, S) , (j, R) , (n, S) und (n, R) die vier möglichen Ergebnisse einer Darbietung. Seien nun $v(j, S)$, $v(j, R)$, $v(n, S)$ und $v(n, R)$ die mit den jeweiligen Ergebnissen verbundenen Konsequenzen für die Versuchsperson, die im Experiment etwa durch unterschiedliche Geldbeträge beeinflusst werden können. $p(S|x)$ sei die bedingte Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen eines Signals, wenn die Intensität x wahrgenommen wird, und $p(R|x)$ sei die bedingte Wahrscheinlichkeit für einen Durchgang ohne Signal, wenn die wahrgenommene Intensität den Wert x hat. Der bedingte Erwartungswert des Gewinns für den Fall, daß die Versuchsperson bei der wahrgenommenen Intensität x mit „ja“ antwortet, ist dann

$$E(v|j, x) = p(S|x)v(j, S) + p(R|x)v(j, R) \quad (2)$$

und analog dazu

$$E(v|n, x) = p(S|x)v(n, S) + p(R|x)v(n, R). \quad (3)$$

Eine wesentliche Annahme der Signalentdeckungstheorie ist, daß sich die Versuchsperson bei ihren Entscheidungen so verhält, als würde sie ihren Gewinnerwartungswert maximieren. Sie sagt genau dann „ja“, wenn $E(v|j, x)$ größer oder gleich $E(v|n, x)$ ist. Aus den Gleichungen (2) und (3) erhalten wir dann

$$p(S|x)v(j, S) + p(R|x)v(j, R) \geq p(S|x)v(n, S) + p(R|x)v(n, R).$$

Hieraus folgt

$$p(S|x)[v(j, S) - v(n, S)] \geq p(R|x)[v(n, R) - v(j, R)]$$

und wenn beide Seiten mit $p(x)$ multipliziert werden

$$p(S|x)p(x)[v(j, S) - v(n, S)] \geq p(R|x)p(x)[v(n, R) - v(j, R)].$$

Wegen der Definition der bedingten Wahrscheinlichkeit gilt aber

$$p(S|x)p(x) = p(x|S)p(S).$$

Setzt man dies in die obige Gleichung für $p(S|x)p(x)$ und analog für $p(R|x)p(x)$ ein, ergibt sich

$$p(x|S)p(S)[v(j, S) - v(n, S)] \geq p(x|R)p(R)[v(n, R) - v(j, R)].$$

In der Regel wird natürlich $v(j, S)$ größer sein als $v(n, S)$. Das bedeutet, daß die Versuchsperson genau dann mit „ja“ antwortet, wenn für die wahrgenommene Signalintensität x gilt

$$\frac{p(x|S)}{p(x|R)} \geq \frac{p(R)}{p(S)} \frac{v(n, R) - v(j, R)}{v(j, S) - v(n, S)}. \quad (4)$$

Dabei sind $p(x | S)$ und $p(x | R)$ die bedingten Wahrscheinlichkeiten für die Ausprägungen von x jeweils für den Fall, daß ein Signal vorliegt (S) bzw. nicht vorliegt (R). $p(R)$ und $p(S)$ sind die Apriori-Wahrscheinlichkeiten eines Durchgangs mit Signal und die eines Durchgangs ohne Signal.

Die Entscheidungsregel (4) zeigt, daß das Verhalten einer Versuchsperson für ein bestimmtes x von mehreren Faktoren abhängt: Sie wird umso eher dazu neigen, mit „ja“ zu antworten,

1. je größer die Apriori-Wahrscheinlichkeit für ein Signal ist;
2. je größer der Quotient aus den Unterschieden der Gewinne für „ja“ und „nein“ im Falle eines Signals und im Falle eines Durchgangs ohne Signal ist;
3. je größer der Quotient der Wahrscheinlichkeiten $p(x | S)$ und $p(x | R)$ an der Stelle x der wahrgenommenen Signalintensität ist.

Die rechte Seite der Entscheidungsregel (4) enthält nur Komponenten, die unabhängig von der wahrgenommenen Intensität x sind. Sie beschreibt deshalb die motivationalen Einflüsse auf das Verhalten, nämlich die vom Versuchsleiter festzusetzenden Apriori-Wahrscheinlichkeiten und die Bewertung der Konsequenzen. Die linke Seite beschreibt die sensorische Leistung der Versuchsperson. In der Signalentdeckungstheorie werden allerdings nicht die Wahrscheinlichkeiten $p(x | S)$ und $p(x | R)$ zur Beschreibung der sensorischen Leistung benutzt, sondern die sogenannte ROC-Kurve (*receiver operating characteristic*). Sie entsteht dadurch, daß die bedingten Wahrscheinlichkeiten $p(j | S)$ gegen die bedingten Wahrscheinlichkeiten $p(j | R)$ abgetragen werden. Bei einem Experiment mit festen Randbedingungen ergibt sich jedoch nur ein Punkt dieser Kurve, der durch die relativen Häufigkeiten der Ereignisse ($j | S$) und ($j | R$) geschätzt werden kann. Mehrere Punkte der ROC-Kurve erhält man, wenn bei konstantem Reiz die motivationalen Einflüsse verändert werden, also die Apriori-Wahrscheinlichkeiten oder die Konsequenzen, oder wenn ein Rating-Verfahren benutzt wird. Beim Rating-Verfahren gibt die Versuchsperson nicht die Antworten „ja“ bzw. „nein“, sondern stuft ihre Zuversicht darüber, ob sie glaubt ein Signal wahrgenommen zu haben, auf einer mehrstufigen Rating-Skala ein. Ist n die Anzahl der Stufen, dann lassen sich damit $(n - 1)$ Punkte der ROC-Kurve schätzen (Egan, 1975). Diese Punkte müssen alle auf der gleichen ROC-Kurve liegen, da die Signalentdeckungstheorie annimmt, daß sich die sensorische Leistung des Beobachters bei Änderungen des motivationalen Zustands nicht ändert.

Um die Signalentdeckungstheorie empirisch prüfen zu können, sind Annahmen über die Form der ROC-Kurve bzw. über die Wahrscheinlichkeiten $p(x | S)$ und $p(x | R)$ notwendig. Im einfachsten Fall wird vorausgesetzt, daß bedingte Normalverteilungsdichten $f(x | S)$ und $f(x | R)$ mit gleicher Varianz vorliegen, die sich nur durch die Mittelwerte unterscheiden können. Die oben eingeführte Entscheidungsregel der Erwartungswertmaximierung führt dazu, daß die Versuchsperson immer dann, wenn die wahrgenommene Signalintensität x kleiner ist als ein bestimmter Wert x_c , mit „nein“ antwortet und mit „ja“, wenn sie größer ist als x_c . Der Kriteriumswert x_c ist genau diejenige Ausprägung von x , für die Ungleichung (4) zur Gleichung wird. Die Lage von x_c hängt deshalb allein von motivationalen Bedingungen ab. Die sensorische Leistung der Versuchsperson wird unter der Annahme

von Normalverteilungen für $f(x|S)$ und $f(x|R)$ durch den Abstand der Mittelwerte der beiden Verteilungsdichten beschrieben. Dieser Mittelwertsabstand wird üblicherweise mit d' bezeichnet. Unter dieser Annahme läßt sich auch die Form der ROC-Kurve berechnen. Hohe sensorische Leistung führt zu einer guten Trennung der beiden Dichten $f(x|R)$ und $f(x|S)$ und damit zu einem großen d' . Die ROC-Kurve weicht dann stark von der Diagonalen ab, bei der $p(j|S) = p(j|R)$ gilt und folglich Darbietungsintervalle mit und ohne Signal von der Versuchsperson nicht unterschieden werden können.

2 Psychophysische Skalierung

2.1 Indirekte Unterscheidbarkeit

Sowohl der ebenmerkliche Unterschied EU als auch der Diskriminationsparameter d' kennzeichnen die sensorische Leistung nur lokal, also nur für solche Reize, die nicht mit Sicherheit unterscheidbar sind. Ein psychologisches Maß für die Reizintensität sollte aber Aussagen über den gesamten wahrnehmbaren Intensitätsbereich machen. Der erste Versuch, aufgrund von lokaler Information ein globales Maß für die wahrgenommene Reizintensität zu konstruieren, stammt von G. Th. Fechner (Fechner, 1860). Seine Konstruktionsmethode beruht auf der Annahme, daß Reize, die gleich gut unterscheidbar sind, auf der Skala der wahrgenommenen Intensität den gleichen Abstand haben, außer sie werden nie oder immer unterschieden.

Fechner schlug eine Konstruktionsmethode für Empfindungsskalen vor, die von ebenmerklichen Reizunterschieden ausgeht. Man bestimmt dabei zu einem Reiz x_0 den Reiz x_1 so, daß er genau ebenmerklich von x_0 verschieden ist. Danach wird x_2 bestimmt, so daß auch x_2 gerade ebenmerklich von x_1 verschieden ist usw. Dies ergibt eine Reihe von Reizen x_0, x_1, x_2, \dots , die zwar nicht physikalisch gleichabständig sind, deren physikalische Abstände jedoch jeweils genau einem ebenmerklichen Unterschied entsprechen. Die wahrgenommene Intensität $\varphi(x)$ wird dann so definiert, daß die Differenz $\varphi(x_i) - \varphi(x_{i-1})$ von Reizen, die um genau einen ebenmerklichen Unterschied verschieden sind, konstant ist. Wird die Unterscheidbarkeit der Reize x und y durch die Wahrscheinlichkeit $p(x, y)$ definiert, mit der der Reiz x bezüglich einer bestimmten Eigenschaft dem Reiz y vorgezogen wird, dann besteht das *Fechner-Problem* darin, eine Transformation φ der physikalischen Reizgröße x zu finden, so daß gilt $p(x, y) = F[\varphi(x) - \varphi(y)]$, wobei F eine streng monoton steigende Funktion sein soll. Eine allgemeine Lösung dieses Problems gibt Falmagne (1974). Spezielle Lösungen werden von Fechner (1860) selbst und in neuerer Darstellung von Luce und Galanter (1963) behandelt. Die bekannteste Lösung des Fechner-Problems ist die logarithmische Transformation der physikalischen Reizintensität. Sie ist dann als Lösung geeignet, wenn das Webersche Gesetz gilt, das besagt, daß der ebenmerkliche Unterschied $EU(s)$ proportional zum Standardreiz s ist: $EU(s) = ks$. Damit ist $p(ks, s)$ für bestimmte Werte von k — die *Webersche Konstante*, deren Wert spezifisch für die angesprochene Sinnesmodalität ist — und für alle Werte von s konstant. Daraus ergibt sich, daß $\varphi(ks) - \varphi(s)$ für alle s konstant ist, da F eine streng monotone Funktion ist. Die Funktion $\varphi(x) = \log(x)$ ist damit als Lösung des Fechner-Problems geeignet, da $\log(ks) - \log(s) = \text{const}$ gilt. Von Luce und Galanter

(1963) und Falmagne (1974, 1985) wird gezeigt, daß das Fechner-Problem auch unter schwächeren Bedingungen lösbar ist, als sie das Webersche Gesetz darstellt.

2.2 Direkte Unterschiedsurteile

Bei vielen psychophysischen Untersuchungen werden eindimensionale psychologische Größen untersucht, die von den Versuchspersonen bei genügend großen Reizunterschieden problemlos angeordnet werden können, wie etwa Helligkeit, Lautheit oder Schwere. Für die Konstruktion einer psychophysischen Funktion besteht in diesen Fällen das wesentliche Problem darin, Informationen über Unterschiede in den wahrgenommenen Größen zu erhalten. Bei der Fechner-Skalierung werden Unterschiede in den wahrgenommenen Größen indirekt durch die ebenmerklichen Reizunterschiede definiert. Man nimmt einfach an, daß alle ebenmerklichen Reizunterschiede zu gleichen Empfindungsunterschieden führen. Man kann die Versuchsperson auch direkt über wahrgenommene Unterschiede befragen, indem man etwa beurteilen läßt, ob der Unterschied zwischen den Reizen x und y größer ist, als der zwischen den Reizen x' und y' . Die Versuchsperson muß dann nicht nur die Reize selbst ordnen, sondern auch Reizpaare, nämlich nach der Größe des wahrgenommenen Unterschieds zwischen den Reizen. Falls die Versuchsperson die Reizunterschiede im Sinne numerischer Differenzen psychologischer Skalenwerte beurteilt, dann kann jedem Reiz x ein Zahlenwert $\varphi(x)$ zugeordnet werden, so daß die Versuchsperson den Unterschied zwischen zwei Reizen x, y genau dann als größer beurteilt als den zwischen zwei Reizen x', y' , wenn die Differenz $\varphi(x) - \varphi(y)$ größer ist als die Differenz $\varphi(x') - \varphi(y')$. Die Konstruktion der Abbildung φ stellt damit ein Problem der *Differenzmessung* dar.

Urteile über wahrgenommene Reizunterschiede bilden die wichtigste Grundlage zur Konstruktion psychophysischer Funktionen. Während sich die formalen Methoden zur Konstruktion psychologischer Größen, die auf diesen Urteilen aufbauen, alle auf die Differenzstrukturen der Meßtheorie zurückführen lassen, sind die experimentellen Vorgehensweisen beim Erheben der Unterschiedsurteile teilweise sehr verschieden. Eine der am häufigsten angewandten Methoden besteht darin, von der Versuchsperson Unterschiede über verschiedene Empfindungsbereiche hinweg vergleichen zu lassen. Die Frage an die Versuchsperson ist dann etwa, ob der Unterschied zwischen den Helligkeiten der Lichter x und y größer ist als der zwischen den Lautstärken der Töne z und w . Solche *intermodalen Vergleiche* (*cross-modality matching*) gestatten die gleichzeitige Konstruktion und den Vergleich psychophysischer Funktionen über verschiedene Wahrnehmungsbereiche hinweg (vgl. Stevens & Galanter, 1957; Krantz, 1972; Luce, 1990). Bei intermodalen Vergleichen wird als Bezugsgröße häufig das Kontinuum der Zahlen benutzt. Man spricht dann von *Größenschätzung* (*magnitude estimation*, vgl. dazu auch Borg & Schönemann, in diesem Band). Nimmt man weiterhin an, daß die empfundene Größe der Zahlenwerte linear mit dem numerischen Wert zusammenhängt, also eine lineare *psychophysische* Funktion darstellt, dann kann man sehr leicht zu psychophysischen Funktionen für verschiedene Wahrnehmungsbereiche gelangen, falls die Daten die von der Meßtheorie verlangten, strukturellen Restriktionen für Differenzstrukturen erfüllen.

2.3 Operationen auf der Reizmenge

Urteile über Reizunterschiede sind deshalb zur Konstruktion psychophysischer Funktionen geeignet, weil sie Information über die Metrik der psychologischen Größe liefern. Eine andere Möglichkeit, diese Information zu erheben, besteht darin, von der Versuchsperson Operationen auf der Reizmenge durchführen zu lassen, da diese ebenfalls metrische Informationen liefern können. Geeignet ist hierzu die *Mittenbildung*. Die Versuchsperson hat dabei die Aufgabe, zu zwei vorgegebenen Reizen x und y einen dritten Reiz z zu suchen oder herzustellen, der in der Ausprägung der untersuchten Größe genau in der Mitte zwischen x und y liegt. Dabei kommt es nicht darauf an, daß die Versuchsperson die mittlere physikalische Reizausprägung herausfindet, sondern sie soll einen Reiz suchen, der eine Empfindung erzeugt, deren Ausprägungsgrad in der Mitte zwischen den Empfindungen liegt, die die beiden Bezugsreize erzeugen. Wird diese Zuordnung für alle Reizpaare der Reizmenge durchgeführt, dann können die Daten als Operation auf der Menge der Reize aufgefaßt werden. Die Versuchsperson erzeugt also eine Abbildung, die jedem Reizpaar (x, y) die subjektive Mitte $m(x, y) = z$ zuordnet. Die Mittenbildungsoperation muß zwei wesentliche Strukturmerkmale haben, damit sie zur Konstruktion einer psychophysischen Funktion geeignet ist. Sie muß monoton sein (die Mitte von Reizpaaren, bei denen ein gleiches Element vorkommt, muß der Ordnung der ungleichen Elemente folgen: wenn $x \succsim y$, dann $m(x, z) \succsim m(y, z)$), und sie muß die Bisymmetrie-Bedingung erfüllen (von jeweils vier Reizen muß die Mitte der Mitten aller möglichen, paarweisen Kombinationen gleich sein: $m[m(x, y), m(z, w)] = m[m(x, z), m(y, w)]$). Gelten diese Bedingungen, dann läßt sich eine psychophysische Funktion φ konstruieren, mit deren Hilfe sich der Skalenwert des als Mitte ausgewählten Reizes aus den Einzelreizen berechnen läßt: $\varphi[m(x, y)] = \alpha\varphi(x) + \beta\varphi(y) + \gamma$. Durch zusätzliche empirische Bedingungen können die Konstanten so bestimmt werden, daß $\varphi[m(x, y)] = [\varphi(x) + \varphi(y)]/2$ sein muß (Krantz, Luce, Suppes & Tversky, 1971, Kap. 6.9).

2.4 Transformationen auf der Reizmenge

Die meßtheoretisch begründeten Verfahren auf der Basis von Differenzen- und Bisymmetriestrukturen erlauben zwar die Konstruktionen psychophysischer Funktionen als numerische Repräsentationen der Reizmenge, die eigentliche psychophysische Frage nach der Abhängigkeit der psychologischen von den physikalischen Größen läßt sich mit diesen Methoden allein jedoch nicht beantworten. Dies liegt daran, daß die meßtheoretischen Repräsentationen auf der Reizmenge definiert sind und deshalb eine physikalische Messung nicht vorausgesetzt wird. Um Informationen über den Zusammenhang zwischen physikalischer und psychologischer Intensität zu erhalten, sind zusätzliche strukturelle Annahmen über die psychophysische Funktion notwendig. Solche strukturellen Annahmen wurden vor allem von Luce (1959, 1990) und Falmagne (1985) untersucht. So konnte Luce (1959) folgendes zeigen: Ist φ eine psychophysische Funktion, die verhältnisskalierte physikalische Reizintensitäten in intervallskalierte, psychologische Größen abbildet, dann ist φ entweder von der Form $\varphi(x) = \alpha x^\beta + \gamma$ oder von der Form $\varphi(x) = \alpha \log(x) + \beta$. Ist darüber hinaus die psychologische Größe ebenfalls verhältnisskaliert, dann muß φ die Form $\varphi(x) = \alpha x^\beta$ haben. Einfache physikalische Reize sind in der Regel verhältnisskaliert. Damit folgt aus den

Ergebnissen von Luce, daß die psychophysische Funktion nur die oben angegebenen Formen haben kann, wenn mit Hilfe einer Differenzenstruktur oder einer Bisymmetriestruktur eine meßtheoretisch begründete Intervallskalierung der psychologischen Größe gelingt. Die neueren Arbeiten von Falmagne (1985) zeigen, daß auch ohne direkte Berücksichtigung des Skalenniveaus der physikalischen Reizbeschreibung die Möglichkeiten für die funktionale Form der psychophysischen Funktion eingeschränkt werden können. Für experimentelle Untersuchungen eignet sich hier etwa eine Homogenitätseigenschaft, bei der die Veränderung der Beobachterurteile untersucht wird, die auftritt, wenn alle Reizintensitäten einer Reizsituation mit einem konstanten Faktor multipliziert werden. Aus solchen experimentellen Operationen lassen sich in vielen Fällen starke strukturelle Konsequenzen für die psychophysischen Funktionen ableiten (Falmagne, 1985).

3 Weiterführende Literatur

Als Begründer der Psychophysik wird Gustav Theodor Fechner betrachtet, der mit seiner Monographie „Elemente der Psychophysik“ (Fechner, 1860) die erste umfassende Darstellung psychophysischer Methoden vorgelegt hat. Die Bezeichnung *psychometrische Funktion* wurde von Urban (1909) eingeführt. Die statistischen Methoden zur Schätzung der Parameter psychometrischer Funktionen sind bei Bock und Jones (1968) zu finden. Präzise Definitionen des *Fechner-Problems* und der Begriffe *ebenmerklicher Unterschied* und *konstanter Fehler* geben Luce und Galanter (1963). Von Falmagne (1974, 1985) wird das Konzept der psychometrischen Funktion verallgemeinert und als Grundlage einer allgemeinen Theorie der Diskrimination benutzt. Die Theorie der Signalentdeckung wurde von Green und Swets (1966) entwickelt und ist dort auch in umfassender Weise dargestellt. Als neueres Nachschlagewerk eignet sich die Monographie von Macmillan und Creelman (1991). Das Standardwerk über Meßtheorie ist Krantz, Luce, Suppes und Tversky (1971). Zur Einführung in dieses Gebiet eignet sich besonders das Lehrbuch von Roberts (1979), da es wenig Vorkenntnisse verlangt und stärker als Krantz et al. (1971) auf psychophysische Probleme eingeht. Die neueren Methoden der Psychophysik werden umfassend und detailliert in Falmagne (1985) dargestellt.

Literaturverzeichnis

- Bock, R. D. & Jones, L. V. (1968). *The measurement and prediction of judgement and choice*. San Francisco: Holden-Day.
- Egan, J. P. (1975). *Signal detection theory and ROC analysis*. New York: Academic Press.
- Elzinga, C. H. (1984). Sensitivity in spectral structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 28, 421–435.
- Falmagne, J.-C. (1974). Foundations of Fechnerian psychophysics. In D. H. Krantz, R. C. Atkinson, R. D. Luce & P. Suppes (Eds.), *Contemporary developments in mathematical psychology*, Vol. 2. *Measurement, psychophysics, and neural information processing* (pp. 127–159). San Francisco: Freeman.
- Falmagne, J.-C. (1985). *Elements of psychophysical theory*. New York: Oxford University Press.
- Fechner, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf und Härtel.

- Green, D. M. (1990). Stimulus selection in adaptive psychophysical procedures. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87, 2662–2674.
- Green, D. M. & Swets, J. A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics*. New York: Wiley.
- Krantz, D. H. (1972). A theory of magnitude estimation and cross-modality matching. *Journal of Mathematical Psychology*, 9, 168–199.
- Krantz, D. H., Luce, R. D., Suppes, P. & Tversky, A. (1971). *Foundations of measurement*, Vol. I. New York: Academic Press.
- Levitt, H. (1970). Transformed up-down methods in psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 49, 467–476.
- Luce, R. D. (1959). On the possible psychophysical laws. *Psychological Review*, 66, 81–95.
- Luce, R. D. (1990). „On the possible psychophysical laws“ revisited: Remarks on cross-modal matching. *Psychological Review*, 97, 66–77.
- Luce, R. D. & Galanter, E. (1963). Discrimination. In R. D. Luce, R. R. Bush & E. Galanter (Eds.), *Handbook of mathematical psychology*, Vol. I (pp. 191–243). New York: Wiley.
- Macmillan, N. A. & Creelman, C. D. (1991). *Detection theory: A user's guide*. New York: Cambridge University Press.
- Roberts, F. S. (1979). *Measurement theory*. New York: Addison-Wesley.
- Stevens, S. S. & Galanter, E. (1957). Ratio scales and category scales for a dozen perceptual continua. *Journal of Experimental Psychology*, 54, 377–411.
- Urban, F. M. (1909). Die psychophysischen Maßmethoden als Grundlagen empirischer Messungen. *Archiv für die gesamte Psychologie*, 15, 261–355 und 16, 168–227.
- Wetherill, G. B. (1963). Sequential estimation of quantal response curves. *Journal of the Royal Statistical Society*, B25, 1–48.
- Wyszecki, G. & Stiles, W. S. (1982). *Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae* (2nd ed.). New York: Wiley.