

Aus dem Institut für Psychologie der Universität Regensburg

## Ein dynamisches Modell der Lautheitsadaptation

Von R. Hübner

Mit 3 Abbildungen

### Einleitung

Betrachtet man die bis jetzt erbrachten Ergebnisse zur Lautheitsadaptation, dann zeigt sich ein sehr heterogenes Bild. Eine Vielzahl verschiedener Methoden ist angewendet worden, um den Verlauf der Adaptation zu ermitteln. Aber anstatt mehr Klarheit zu schaffen, führte jede Methode zu eigenen Resultaten, die untereinander kaum vergleichbar sind und sich z. T. widersprechen (für eine Übersicht siehe Elliot und Fraser, 1970; Scharf, 1983; Small, 1963).

Eine der ältesten dieser Methoden ist die simultane dichotische Lautheitsjustierung (simultaneous dichotic loudness balance) (SDLB). Sie wurde lange Zeit bevorzugt, weil dabei keine Unterbrechung des adaptierenden Reizes erforderlich ist. Von dieser Methode gibt es mehrere Varianten. Eine ist die *wiederholte* SDLB (rSDLB) Methode. Sie wurde von Hood (1950) eingeführt und sei an einem Beispiel erläutert.

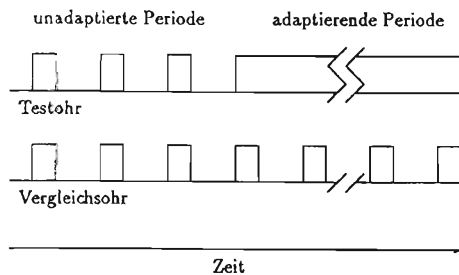


Abb. 1. Schematische Darstellung der „repeated simultaneous dichotic loudness balance“ (rSDLB-Methode)

Einem Ohr (Testohr) wird ein Schallreiz (Testreiz) mit einer bestimmten Intensität dargeboten. Dem anderen Ohr (Vergleichsohr) wird ein Reiz (Vergleichsreiz) dargeboten, der so eingestellt werden soll, daß Test- und Vergleichsreiz gleich laut sind (s. Abb. 1). Von kurzen Pausen unterbrochen wird dieser Vorgang mehrmals wiederholt. Ein normalhöriger Proband stellt in der Regel für den Vergleichsreiz dieselbe Intensität ein wie die des Testreizes. Der Testreiz wird nun nicht mehr unterbrochen (Adaptationsperiode), während der Vergleichsreiz periodisch wiederkehrt, wobei jedesmal eine Einstellung des Vergleichsreizes erfolgt. Nach einiger Zeit wird dann der Proband für den Vergleichsreiz eine geringere Intensität einstellen. Die Intensitätsdifferenz zwischen Test- und Vergleichsreiz wird dann als Maß für die bis dahin erfolgte Adaptation genommen. In Abbildung 2 sind zwei Verlaufskurven dargestellt, die mit dieser Methode von Hood (1950) erhoben wurden. Sie machen deutlich, daß die Adaptation im Verlaufe der Zeit einen asymptotischen Zustand erreicht, der von der Intensität des Testreizes abhängt.

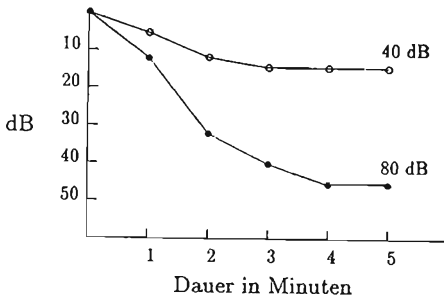


Abb. 2. Verlauf der Lautheitsadaptation bei Testreizen mit 40 und 80 dB (SPL) (nach Hood, 1950). Erhebung der Daten mit der rSDLB-Methode

Eine andere Variante der SDLB-Methode erlaubt den Probanden während der Adaptationsperiode nur am Ende eine Justierung (sSDLB). Man würde erwarten, daß das Ausmaß der ermittelten Adaptation mit dieser Variante ähnlich ausfällt. Dies ist aber nicht der Fall. Wie Experimente zeigen, ist die Adaptation wesentlich geringer als bei der rSDLB-Methode. Ferner wurde eine Unabhängigkeit von der Dauer der Adaptationsperiode gefunden (vgl. Fraser und Elliot, 1970; Petty, Fraser und Elliot, 1970; Stockinger und Studebaker, 1968; Stockinger, Cooper und Meissner, 1972).

Stockinger und Studebaker (1968) haben die rSDLB-Methode mit der sSDLB-Methode bei Verwendung eines Testreizes mit einer Frequenz von 1000 Hz und 80 dB (SPL) verglichen. Die rSDLB-Methode führte zu einer Adaptation von 26 dB im Gegensatz zu nur 13 dB bei der sSDLB-Methode. Als Ursache für diese Differenzen werden die häufiger auftretenden Vergleichsreize bei der rSDLB angesehen.

Diese Ergebnisse haben die Vermutung nahegelegt, daß das Ausmaß der Adaptation von der Dauer der Reizung im kontralateralen Ohr abhängt. Ahaus, Stockinger und Wylde (1975) haben speziell diese Vermutung experimentell überprüft. Sie verwendeten einen Testreiz mit 1000 Hz und 60 dB (SPL). Die Adaptationszeit betrug 5 min. Variiert wurden die An-Aus(on-off)-Zeiten des Vergleichsreizes (in ms: 200 : 200, 500 : 500, 800 : 800, 200 : 800 und 800 : 200). Die Ergebnisse zeigen, daß mit zunehmendem An-Anteil auch die Adaptation zunahm. Bei einem An-Anteil von 20 % betrug sie im Durchschnitt 14 dB und bei 80 % 28 dB.

Diese und ähnliche Ergebnisse führten zu der Hypothese, daß Lautheitsadaptation nur bei simultaner kontralateraler Reizung stattfindet. Um dies nachzuweisen, wurde nach Verfahren gesucht, die eine Interaktion zwischen Test- und Vergleichsohr ausschließen. Eine Möglichkeit ist, monaurale Methoden dafür zu verwenden.

Eine monaurale Methode, die in jüngerer Zeit häufig angewendet wurde, ist das sogenannte „successive magnitude estimation“ (SME). So hatten in den Experimenten von Fishken, Arpino, Testa und Scharf (1977) und Scharf und Horton (1978) die Probanden zu bestimmten Zeiten innerhalb einer 2- bis 3minütigen Darbietung der Reize so Zahlen zu nennen, daß sie deren Lautheit wiedergaben. Wie erwartet, konnte bei Intensitäten von mehr als 30 dB (SL) ungeachtet der Frequenz keine Abnahme der Lautheit nachgewiesen werden.

Die SME-Methode bietet auch die Möglichkeit, monaurale Reizdarbietungen mit binauralen zu vergleichen. So berichtet Scharf (1983) von Ergebnissen, wonach mit der SME-Methode bei monauraler Darbietung keine Adaptation bei Reizen mit einer Intensität

von mehr als 30 dB (SPL) nachgewiesen werden konnte. Bot man jedoch dem kontralateralen Ohr einen durch Pausen unterbrochenen Reiz (I-Reiz) – ähnlich wie bei der sSDLB-Methode – dar, so führt das auch bei intensiveren Testreizen zu Adaptation. Im Zusammenhang mit diesen Ergebnissen wurde von Botte, Canévet und Scharf (1982) der Begriff der *induzierten Lautheitsadaptation* geschaffen. Danach wird eine Lautheitsadaptation durch einen kontralateralen Reiz über zentrale Mechanismen induziert.

Ein der induzierten Lautheitsadaptation allerdings widersprechendes Ergebnis brachte ein Experiment von Canévet, Scharf und Botte (1983). Sie boten einen Testreiz mit 1000 Hz und 60 dB (SPL) zusammen mit einem I-Reiz für 3 min dar. Dann wurde der I-Reiz abgeschaltet und 20 s später der Testreiz kurz für 30 s unterbrochen, um danach ohne den I-Reiz bis 8 min fortgesetzt zu werden. Nach der Unterbrechung des Testreizes war eine vollständige Erholung von der Adaptation zu verzeichnen. Allerdings setzte sie dann bei der Fortsetzung des Testreizes wieder ein, obwohl jetzt kein I-Reiz mehr vorhanden war. Nach Canévet und Mitarb. (1983) ist die Readaptation auch dann vorhanden, wenn die Pause 2 min beträgt.

Gegen die These der induzierten Lautheitsadaptation sprechen auch Ergebnisse, die zeigen, daß Adaptation nicht nur bei einer unterbrochenen kontralateralen Reizung auftritt, sondern auch bei ipsilateraler Reizveränderung. Weiler, Sandman und Pederson (1981) haben argumentiert, daß das Ausbleiben der Adaptation bei der SME-Methode auf das Fehlen eines Referenzreizes zurückzuführen sei und nicht auf eine binaurale Interaktion. Um dies zu erhärten, haben sie einen Reiz mit einer Intensität von 60 dB (SPL) und einer Frequenz von 1000 Hz monaural dargeboten. Alle 30 s wurde die Intensität für 5 s um 20 dB erhöht. Die Probanden hatten anhand von SME die Lautheit des Reizes vor, während und nach der Intensitätserhöhung zu beurteilen. Als Ergebnis zeigte sich eine signifikante Adaptation, im Gegensatz zur Kontrollbedingung ohne Intensitätserhöhung. Weiler und Cobb (1982) variierten die Dauer der Intensitätserhöhung um 20 dB von 0,5 über 1–5 s. Zwischen den Erhöhungen lag ein Zeitraum von ca. 25 s. Eine signifikante Adaptation ergab sich hier nur bei einer Erhöhungsdauer von 5 und 1 s.

Mit dem Fehlen eines Referenzreizes als Ursache für das Fehlen der Adaptation bei der SME-Methode argumentieren auch Hood und Wade (1982), die mit einer ähnlichen Methode wie Weiler und Cobb (1982) Adaptation nachgewiesen haben. Auch Canévet et al. (1983) haben gezeigt, daß eine regelmäßige, kurzfristige Erhöhung der Intensität eines monaural dargebotenen Reizes zu einer Adaptation führt. Sie erhöhten einen Reiz mit 1000 Hz und 60 dB (SPL) alle 30 s für 1 oder 5 s auf 65 oder 80 dB (SPL). In allen Bedingungen zeigte sich Adaptation. Sie nahm sowohl mit der Dauer der Erhöhung als auch mit der Größe der Erhöhung zu. Damit haben sie die Ergebnisse von Weiler und Cobb (1982) bestätigt. Eine Reihe weiterer Bestätigungen lassen sich anführen (vgl. z. B. Canévet, Scharf und Botte, 1985; Charron und Botte, 1987; Sandman, Weiler und Pederson, 1982).

Durch diese verschiedenen Interpretationen der Ergebnisse wird deutlich, daß hinsichtlich der verwendeten Maße ein Validitätsproblem besteht. Bei allen, durch die verschiedenen Methoden bedingten Maßen wird von Adaptation gesprochen. Ob aber alle Maße tatsächlich mit einer Lautheitsveränderung in Zusammenhang stehen, ist fraglich, be-

sonders bei der SME-Methode, worauf auch Weiler und Mitarb. (1981) hinweisen. Verschiedene Ergebnisse scheinen die Hypothese zu unterstützen, daß sich durch eine Darbietung von kontralateralen Reizen oder durch ipsilaterale Intensitätsveränderungen die Beurteilungsgrundlage ändert, zumal die SME-Methode hohe Ansprüche an die Probanden stellt.

Die Frage, ob eine Variation der Reizintensitäten oder eine kontralaterale Reizung als Auslöser für eine Adaptation angesehen werden können, oder ob sie lediglich eine notwendige Beurteilungsgrundlage für die Probanden darstellen, kann nicht unabhängig von einer *Definition* des Begriffs „Adaptation“ beantwortet werden. Da dies ein quantitativer Begriff ist, kann er letztendlich nur exakt durch eine Meßvorschrift definiert werden. Diese soll im Rahmen der Meßtheorie durch die Angabe eines meßtheoretischen Modells in der vorliegenden Arbeit angegeben werden. Da es zur Beschreibung der Lautheitsadaptation angemessen ist, ein dynamisches Modell anzugeben, die Meßtheorie dafür aber noch keine Strukturen zur Verfügung stellt, wurde sie von Hübner (1989) entsprechend erweitert.

Mit dieser neuen Definition ist noch ein weiterer Vorteil verbunden, der deutlich wird, wenn man die vorhandene Literatur zur Lautheitsadaptation betrachtet. Dabei ist nämlich ein Mangel an formalen, insbesondere an dynamischen Modellen für die Lautheitsadaptation zu entdecken. Normalerweise ist es angebracht, bei der Modellierung dynamischer Vorgänge systemtheoretische Methoden zu verwenden. Allerdings treten dabei in der Psychologie Schwierigkeiten auf, weil von den Ein- und Ausgabemengen des zu modellierenden Systems bestimmte Eigenschaften gefordert werden, die nur schwierig zu überprüfen sind. Hübner (1989) hat deshalb eine Methode entwickelt, mit der auf meßtheoretischer Grundlage allein mit Hilfe des Paarvergleichs auf der Menge der Eingabefolgen bestimmte lineare Systeme identifiziert werden können, und die diese Schwierigkeiten beseitigt.

### Ein meßtheoretisches Modell

Das Modell beruht auf einer Verallgemeinerung des additiv verbundenen Messens. Hier soll nur der für diese Arbeit relevante Spezialfall betrachtet werden (für die Details siehe Hübner, 1989). Es wird hypostasiert, daß die zum Zeitpunkt  $t$  empfundene Lautheit von der Intensität des Reizes zum Zeitpunkt  $t$  und von der Intensität der Reize zu früheren Zeitpunkten  $t-1$ ,  $t-2$ , ...,  $t-(n-1)$  in noch näher zu spezifizierender Weise abhängt. Sei  $\varphi(a_t, a_{t-1}, \dots, a_{t-(n-1)})$  ein Skalenwert für die Lautheit am Ende (zum Zeitpunkt  $t$ ) der Darbietung einer Reizfolge  $a_t, a_{t-1}, \dots, a_{t-(n-1)}$ . Dann kann ein allgemeines dynamisches Modell lauten:

$$\varphi(a_t, a_{t-1}, \dots, a_{t-(n-1)}) = F[f_0(a_t), f_1(a_{t-1}), \dots, f_{n-1}(a_{t-(n-1)})].$$

Die  $f_i$  sind Abbildungen der Reize in die reellen Zahlen (Skalen). Nimmt man der Einfachheit halber ein additives Modell an, ergibt sich:

$$\varphi(a_t, a_{t-1}, \dots, a_{t-(n-1)}) = f_0(a_t) + f_1(a_{t-1}) + \dots + f_n(a_{t-(n-1)}).$$

Dieses Modell entspricht einer  $n$ -Komponenten additiv verbundenen Meßstruktur (vgl.

Hübner, 1989). Da alle Komponenten aus derselben Menge stammen, können qualitative Bedingungen angegeben werden, bei denen eine einzige Intervallskala  $u$  für die Reize existiert und sich die Unterschiede zwischen den Zeitpunkten durch Proportionalitätskoeffizienten ausdrücken lassen:

$$\varphi(a_t, a_{t-1}, \dots, a_{t-(n-1)}) = \lambda_0 u(a_t) + \lambda_1 u(a_{t-1}) + \dots + \lambda_n u(a_{t-(n-1)}).$$

Die Koeffizienten sind eindeutig bis auf Multiplikation mit einer positiven Konstante. Solche meßtheoretischen Modelle lassen sich als lineare Filter auffassen und durch ein lineares System realisieren (vgl. Hübner, 1989). Wenn beispielsweise nur 3 Komponenten einen Einfluß auf die Lautheit haben, dann ergibt sich, wenn  $u_i$  für  $u(a_{t-i})$  und  $y_t$  für  $\varphi(a_t, a_{t-1}, \dots, a_{t-(n-1)})$  geschrieben wird, eine Realisation durch das lineare System:

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x_t + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_t \\ y_t &= [\lambda_0 \ \lambda_1 \ \lambda_2] x_t. \end{aligned}$$

Hierbei bezeichnet  $x_t$  den Zustand des Systems zum Zeitpunkt  $t$ .

Mit einem Experiment sollte geprüft werden, inwieweit sich der Prozeß der Lautheitsadaptation durch ein solches lineares System repräsentieren läßt. Dabei wurde angenommen, daß es bei der Adaptation einen negativen Einfluß der vorangegangenen Reize auf die Lautheit des momentanen Reizes gibt. Speziell soll das Modell getestet werden, daß die Lautheit zum Zeitpunkt  $t$  additiv von der skalierten momentanen Reizintensität und den zwei skalierten vorangegangenen Reizintensitäten abhängt. Bei der Skala wird vereinfachend von „Lautheit“ gesprochen, obwohl das Verhältnis zu der sonst üblichen Lautheit nicht geklärt ist.

## Methoden

### *Methode der Reizdarbietung*

Die Eingabemenge ist eine Menge von Reizen mit einer konstanten Darbietungsdauer, die sich nur hinsichtlich ihrer Intensität unterscheiden. Eine Eingabefolge ist dann eine Folge solcher Reize. Der Ausgangspunkt für eine Systemrealisation ist eine Ordnungsrelation auf der Menge der Eingabefolgen. Empirisch kann sie durch einen Paarvergleich ermittelt werden. Dabei wird beurteilt, ob die Ausgabe des Systems nach Verarbeitung der einen Eingabefolge mindestens so groß ist wie nach Verarbeitung der anderen. Der Nachteil dieser Methode ist, daß dazu ein „Gedächtnis“ benötigt wird, das die Ausgabe nach der ersten Eingabefolge für den späteren Vergleich speichert. Ohne Gedächtnis kommt man aus, wenn man über zwei gleiche Systeme verfügt, so daß zwei Eingabefolgen simultan verarbeitet bzw. verglichen werden können. Die Methode des simultanen Paarvergleichs fand auch im folgenden Experiment Anwendung, wobei die Tatsache genutzt wurde, daß der Mensch unter normalen Umständen zwei gleiche Hörorgane und damit zwei gleiche psychophysische Systeme besitzt.

In dem Experiment wurden 3 Reizausprägungen verwendet. Bei einer Folgenlänge von 3

gab das 27 Reizfolgen und damit 729 Paare für den Paarvergleich. Da dies ein erheblicher experimenteller Aufwand ist, wurden Paare mit identischen Komponenten nicht und von symmetrischen Reizpaaren nur jeweils eines dargeboten. Danach verblieben noch 351 Paarvergleiche von 3-Komponentenfolgen. Durch die Voraussetzung, daß nur die letzten 3 Eingaben einen Einfluß auf die Ausgabe haben, ergab sich die Möglichkeit, bei *jeder* Eingabe einen Vergleich vornehmen zu lassen und die jeweils letzten 3 Eingaben als entsprechende Eingabefolge für den Vergleich zu betrachten. Bei Verwendung von langen Folgenpaaren, in denen alle möglichen Paare der 3-Komponentenfolgen enthalten sind, können diese mit Hilfe von „Fenstern“ gefunden werden. Abbildung 3 veranschaulicht diese Methode. Die Konstruktion der langen Reizfolgenpaare kann so erfolgen, daß sie möglichst kurz ist.

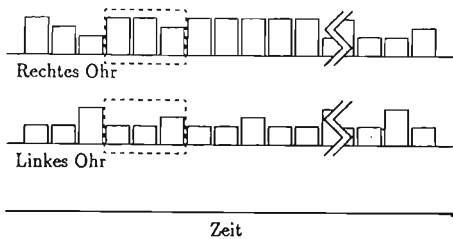


Abb. 3. Schematische Darstellung der Paarvergleichsmethode

Der Nachteil bei dieser Methode ist, daß die Reihenfolge der Reize nicht zufällig ist. Um hier den Einfluß der Reihenfolge beurteilen zu können, wurden drei verschiedene Folgenpaare verwendet mit einer jeweiligen Länge von 540, 548 und 548 Reizen. Sie werden im folgenden mit a, b und c bezeichnet. Damit konnten die 351 Paarvergleiche von 3-Komponentenfolgen auf 540 bis 548 Paarvergleiche von einzelnen Reizkomponenten reduziert werden. In dem mit diesen drei Reizfolgenpaaren durchgeführten Experiment betrug die Darbietungsdauer der einzelnen Reizkomponenten 3 s und deren Frequenz 3000 Hz. Die Intensitäten von 50, 60 und 66 dB (SPL) wurden so gewählt, daß sie hinsichtlich der Sone-Skala in etwa gleichen Lautheitsabständen entsprachen.

#### *Versuchsaufbau und -ablauf*

Ein Funktionsgenerator (HP 3325A) erzeugte eine 3000 Hz Sinusschwingung. Dieses Signal ging in einen zweikanaligen Abschwächer, der von einem Rechner (Olivetti M24) gesteuert wurde. Von hier gingen die zwei Signale über einen zweikanaligen Verstärker (Marantz 4100) in den Kopfhörer (Beyer DT 48A). Zur Aufnahme der Reaktionen der Probanden standen zwei Tasten zur Verfügung, deren Betätigung vom Rechner registriert werden konnte. Zur Vermittlung optischer Signale an die Probanden dienten zwei Leuchtdioden. Die Kalibrierung der Kopfhörer wurde mit einem künstlichen Ohr (Brühl und Kjaer Typ 4153) und einem Meßverstärker (Brühl und Kjaer Typ 2607) vorgenommen. Während des Experiments saßen die Probanden in einer schallisolierten doppelwandigen Kammer. Die Reize wurden binaural über Kopfhörer dargeboten. Die Darbietungsdauer der Reizkomponenten betrug 3 s mit einer Pause von 10 ms dazwischen. Die Anstiegs- und Abstiegszeiten (rise/fall times) betragen 25 ms. Die Pause zwischen den Komponenten

wurde eingeführt, weil sich in Vorversuchen herausgestellt hatte, daß sich sonst die Intensitätsveränderungen innerhalb einer Reizfolge störend auf die Beurteilung auswirkt. Vor den eigentlichen Komponentenfolgenpaaren wurden 20 Komponentenpaare zur Probe dargeboten. Damit ergaben sich Folgenpaare mit einer Gesamtdarbietungsdauer von ca. einer halben Stunde pro Durchgang.

Bei der Darbietung eines neuen Komponentenpaares leuchtete die jeweils andere Leuchtdiode auf, die erlosch, sobald eine Taste gedrückt wurde. Die Probanden waren instruiert, auf die linke Taste zu drücken, wenn sie den Reiz im linken Ohr und die rechte Taste, wenn sie den Reiz im rechten Ohr als lauter empfanden. Konnten sie sich nicht entscheiden, sollten sie keine Taste drücken.

Das Experiment wurde mit 3 Probanden im Alter von 21 (PB, weiblich), 32 (RH, männlich) und 24 (TL, männlich) Jahren durchgeführt. Ihre Normalhörigkeit wurde mit einem Audiometer (Brüel und Kjaer, Typ 1800) überprüft. Vor den eigentlichen Versuchen wurde ein Probedurchgang durchgeführt. Dann erfolgten mit den drei Folgenpaaren jeweils zwei Durchgänge.

### *Methode der Auswertung*

Ein Problem bei der Auswertung der Daten ergab sich daraus, daß die hier verwendete Theorie deterministisch ist. Sie ist genaugenommen bereits bei einer einzigen Axiomenverletzung falsifiziert. Eine weitere Schwierigkeit ergab sich aus der Formulierung der Theorie für Strukturen mit unendlichen Mengen. Bei der empirischen Überprüfung hat man nur Strukturen mit endlichen Mengen. Zwar gibt es auch für solche Strukturen Axiomatisierungen (vgl. Scott, 1964), aber die empirisch testbaren Axiome sind nicht hinreichend für eine additive Repräsentation, so daß ein Nachweis der Gültigkeit der Axiome in der Regel dadurch erbracht wird, indem direkt die Skalenwerte der Repräsentation angegeben werden. Das Auffinden von Skalenwerten führt zu dem Problem, ein System homogener linearer Ungleichungen zu lösen.

Die Schwierigkeit der Fehlerbehandlung ist aber damit nicht behoben, da die Lösung der Ungleichungen bereits Additivität voraussetzt. Aus diesem Grund wurde eine andere Methode angewendet<sup>1</sup>. Die Skalenwerte wurden so mit einem Minimierungsalgorithmus (Powell, 1964) gesucht, daß die damit rekonstruierte Relationenmatrix möglichst gut mit der empirischen übereinstimmt<sup>2</sup>. Ein Vorteil dieser Methode ist, daß damit auch die Parameter für das hier spezifizierte speziellere Modell gesucht werden konnten.

### **Ergebnisse**

Die Daten können gut durch das allgemeinere Modell beschrieben werden. Bei allen drei Probanden wurden Skalenwerte gefunden (für jeden Durchgang), die die Relationenmatrix bis auf 3 bis 8 % reproduzieren. Auch für das speziellere Modell konnte eine gute Anpassung erzielt werden. Da die intraindividuellen Unterschiede gering waren,

<sup>1</sup> Für die Idee zu dieser Methode danke ich Dr. Josef Lukas.

<sup>2</sup> Für ein C-Programm mit diesem Algorithmus danke ich Karl Gegenfurtner.

wurden die Daten gepoolt und dann für das spezielle Modell die Skalenwerte und Koeffizienten gesucht. In den Zellen der gepoolten Relationenmatrix stehen Werte zwischen 0 und 6. Die maximale Differenz beträgt in diesem Fall 2106. In Tabelle I sind die Ergebnisse für die drei Probanden angegeben. Der jeweils erste Skalenwert wurde zu den anderen beiden hinzuaddiert, so daß der erste Skalenwert jeweils Eins beträgt. In der Spalte 7 steht die absolute Abweichung und in Spalte 8 die prozentuale. Die Anpassung ist ebenso gut wie bei dem allgemeineren Modell.

Tab. I. Skalenwerte und Proportionalitätskonstanten der gepoolten Daten

	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	Min	%
pb	1	14,90	22,48	-0,291	-0,208	144	7
rh	1	13,69	22,05	-0,369	-0,052	130	6
tl	1	24,56	34,58	-0,276	-0,185	177	8
m	1	17,72	26,37	-0,312	-0,148		

Interessant ist aber nicht nur, daß die Anpassung relativ gut ist, sondern, daß die bei der Minimierung gefundenen Werte einer Adaptation entsprechen. Die drei Skalenwerte sind hinsichtlich der Reizintensität monoton steigend. Das bedeutet, daß die Lautheit eine positiv monotone Funktion der Reizintensität ist. Entscheidend sind die Koeffizienten. Der erste Koeffizient  $\lambda_0$  wurde auf Eins gesetzt. Damit hängt die Lautheit positiv von der Reizintensität zum Zeitpunkt  $t$  ab. Anders sieht es bei den zurückliegenden Reizen aus. Sie haben einen negativen Einfluß auf die Lautheit, denn die entsprechenden Koeffizienten sind negativ, wobei der Einfluß zum Zeitpunkt  $t-2$  etwas geringer ist als zum Zeitpunkt  $t-1$ .

### Ergebnisse bei variierten Bedingungen

Mit einer ersten Variation der Reizintensitäten wurde getestet, wie gut die Modellanpassung bei Reizen ist, deren Lautheitsabstände hinsichtlich der Sone-Skala nicht gleich sind. Dazu wurden Reize mit einer Intensität von 50, 60 und 70 dB (SPL) verwendet. Da die intra- sowie interindividuellen Unterschiede im ersten Experiment gering waren, wurden die Variationen nur mit jeweils einem Probanden (RH) bzw. einer Probandin (PB) durchgeführt und mit nur einem Durchgang pro Reizfolgenpaar.

In der Tabelle II sind die Ergebnisse für das speziellere Modell wiedergegeben. Bei der

Tab. II. Skalenwerte und Proportionalitätskonstanten der Daten bei ungleichen Reizzuständen (RH)

	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	Min	%
a	1	9,60	20,21	-0,212	0,036	62	18
b	1	6,65	16,05	-0,237	-0,186	65	19
c	1	7,03	16,67	-0,335	-0,266	69	20
m	1	7,75	17,64	-0,261	-0,139		



Bedingung a ist der zweite Koeffizient positiv. Die anderen beiden Bedingungen entsprechen in der Tendenz den Erwartungen. Insgesamt ist die Anpassung deutlich schlechter als im ersten Experiment. Da die Reihenfolge der Bedingungen in der Tabelle der Reihenfolge im Experiment entspricht, liegt die Vermutung nahe, daß hier erst eine Gewöhnung an die neuen Reize stattfinden mußte, und somit ein Übungseffekt aufgetreten ist. Allerdings geht damit eine Verschlechterung der Reproduzierbarkeit einher.

In einem letzten Experiment wurde der Lautheitsabstand in bezug auf die Sonc-Skala zwischen den Reizen in etwa um die Hälfte verringert. Es wurden Intensitäten von 50, 56 und 60 dB (SPL) verwendet. Wie die Tabelle III zeigt, hat eine Verringerung des Abstandes keinen Effekt auf die Ergebnisse. Sie sind vergleichbar mit denen aus dem ersten Experiment.

Tab. III. Skalenwerte und Proportionalitätskonstanten der Daten bei geringerem Intensitätsabstand (PB)

	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\lambda_1$	$\lambda_3$	Min %
a	1	10,91	14,92	-0,346	0,256	17 5
b	1	10,50	17,25	-0,445	-0,234	26 7
c	1	14,59	20,42	-0,341	-0,198	19 5
m	1	12,00	17,53	-0,377	-0,229	

## Diskussion

Die Schwierigkeit, Lautheitsadaptation valide zu messen, wird bei Betrachtung der heterogenen Ergebnisse deutlich. Keine der bis jetzt verwendeten Methoden hat zu einem befriedigenden Resultat geführt. Hier wird deshalb eine Definition der Lautheitsadaptation durch die Spezifizierung eines meßtheoretisch begründeten dynamischen Modells angegeben. Gleichzeitig wird damit die Möglichkeit eröffnet, mit einfachen Methoden dynamische Modelle zu identifizieren.

Mit den durchgeführten Experimenten wurde speziell die Frage untersucht, ob sich der Prozeß der Lautheitsadaptation durch ein lineares System beschreiben läßt. Dazu wurde die neue Methode angewandt, bei der zur Systemidentifikation lediglich Paarvergleiche hinsichtlich der Eingabefolgen gefordert werden. Gleichzeitig mit der Identifikation werden die Ein- und Ausgabegrößen gemessen. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber den üblichen Methoden der Systemtheorie, insbesondere bei psychologischen Anwendungen.

Die empirischen Ergebnisse sprechen dafür, daß eine Beschreibung durch ein lineares System möglich ist. Das identifizierte System ist linear in bezug auf eine psychologische Ein- und Ausgabegröße, und läßt sich schreiben als:

$$x_{i+1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x_i + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_i$$

$$y_i = [1 - 0,312 - 0,148] x_i.$$

Dabei wurden die gemittelten Koeffizienten der gepoolten Daten aus dem ersten Experiment verwendet. Die Eingabewerte  $u_i$  sind die Skalenwerte der Reizintensitäten. Da die Eingaben jeweils eine Dauer von 3 s hatten, ist die Adaptation nach diesem Modell bereits nach ca. 9 s abgeschlossen. Dies widerspricht vielen bisherigen Ergebnissen, wenn auch nicht allen. Adaptation über so kurze Zeiträume wurde beispielsweise auch in der Arbeit von Wittich (1966) nachgewiesen. In weiteren Arbeiten muß überprüft werden, inwieweit diese, mit dem Modell angegebene Definition der Lautheitsadaptation angemessen ist. Der hier vorgenommene erste Versuch läßt sie als angemessen erscheinen.

## Zusammenfassung

Die heterogenen und z. T. widersprüchlichen Ergebnisse zur Lautheitsadaptation werden auf die Vielzahl der verwendeten Methoden und eine damit einhergehende uneinheitliche Verwendung des Begriffs „Adaptation“ zurückgeführt. In dieser Arbeit wird deshalb eine auf meßtheoretischer Grundlage basierende Definition der Lautheitsadaptation gegeben. Damit verbunden ist eine neue Methode zur Identifikation spezieller linearer dynamischer Systeme. Dies ist besonders deshalb interessant, weil dynamische Modelle der Lautheitsadaptation bis heute fehlen. In einem Experiment mit sinusförmigen Schallreizen (3000 Hz) wurde getestet, ob sich die Lautheitsadaptation durch ein lineares System beschreiben läßt. Die Ergebnisse der Systemidentifikation sprechen dafür. Damit ist zum einen gezeigt, daß die angegebene Definition der Lautheitsadaptation angemessen ist und zum anderen, daß die Methode der Systemidentifikation brauchbar ist.

## Summary

Previous research on loudness adaptation has provided heterogeneous and partly contradictory results. One major reason seems to be the inconsistent use of the term 'adaptation', which is due to differing operational definitions. Here, a measurement-theoretic definition of loudness adaptation is introduced, which also comprises a new method for the identification of certain linear dynamic systems. This is of particular interest, since there is a lack of dynamic models describing loudness adaptation. An experiment with sinusoidal sound stimuli (3000 Hz) was performed to test whether loudness adaptation can be modeled by such a linear system. The results of the system identification indicate that this is possible. Therefore, it can be concluded that the given definition of loudness adaptation might be appropriate and that the method of system identification is an applicable research tool.

## Резюме

Гетерогенные и частично противоречивые результаты по адаптации к шуму объясняются многообразием использованных методов и связанным с этим неоднозначным использованием термина «адаптация». Поэтому в данной работе дается определение адаптации на основе теории измерений. С этим связан и новый метод идентификации специальных линейных динамических систем. Это особенно интересно потому, что еще не существуют динамические модели адаптации к шуму. В эксперименте с применением синусоидных звуковых раздражителей (3000 гц) проверялось, можно ли адаптацию к шуму описать линейной системой. Результаты системной идентификации подтверждают это. Таким образом показано, что данное определение адаптации к шуму является верным, а метод системной идентификации полезным.

**Literatur**

- Ahaus, W. H.; Stokinger, T. E.; Wylde, Margareta A.: Influence of duty cycle and off time of comparison-tone pulse trains on the measurement of perstimulatory loudness adaptation. *Percep. Psychophysics*, 18 (1975) 287–292.
- Canévet, G.; Scharf, B.; Botte, Marie-Claire: Loudness adaptation, when induced, is real. *Br. J. Audiol.* 17 (1983) 49–57.
- Canévet, G.; Scharf, B.; Botte, Marie-Claire: Simple and induced loudness adaptation. *Audiology* 24 (1985) 430–436.
- Charron, Sylvie; Botte, Marie-Claire: Frequency selectivity in loudness adaptation and auditory fatigue. *J. Acou. Soc. Am.* 83 (1988) 178–187.
- Elliot, D. N.; Fraser, W. R.: Fatigue and adaptation. In: *Foundations of modern auditory theory*. Hrsg.: Tobias, J. V. New York: Academic Press (1970).
- Fishken, D.; Arpino, E.; Testa, M.; Scharf, B.: Loudness may adapt, after all. *J. Acou. Soc. Am.* 61 (1977) S 61 (A).
- Fraser, W. D.; Petty, J. W.; Elliot, D. N.: Adaptation: central or peripheral? *J. Acou. Soc. Am.* 47 (1970) 1016–1021.
- Hood, J. D.: Studies in auditory fatigue and Adaptation. *Acta Oto-Laryngologica Suppl.* 92 (1950).
- Hood, J. D.; Wade, P.: Loudness adaptation: real or illusory. *Br. J. Audiol.* 16 (1982) 9–15.
- Hübner, R.: Repräsentation dynamischer Strukturen durch lineare Systeme. *Z. exp. ang. Psychol.* 36 (1989) 57–71.
- Petty, J. W.; Fraser, W. D.; Elliot, D. N.: Adaptation and loudness decrement: a reconsideration. *J. Acou. Soc. Am.* 47 (1970) 1074–1081.
- Powell, M. J. D.: An efficient method for finding the minimum of a function in several variables without calculating derivatives. *Comp. J.* 7 (1964) 155–162.
- Sandman, D. E.; Weiler, E. M.; Pederson, L. M.: Perstimulatory adaptation by magnitude estimation: Effects of time of day, level of continuous tone, and relative level of periodic increments. *J. Audi. Res.* 22 (1982) 65–70.
- Scharf, B.: Loudness adaptation. In: *Hearing research and theory*, Vol. II. Hrsg.: Tobias, J. V.; Schubert, E. D. New York: Academic Press 1983.
- Scharf, B.; Horton, T. J.: Scaling loudness and annoyance as a function of duration. *J. Acou. Soc. Am.* 63 (1978) S1 (S16).
- Scott, D.: Measurement structures and linear inequalities. *J. Mathematical Psychol.* 1 (1964) 233–247.
- Small, A. M.: Auditory adaptation. In: *Modern developments in audiology*. Hrsg.: Jerger, J. New York: Academic Press 1963.
- Stokinger, T. E.; Studebaker, G. A.: Measurement of perstimulatory loudness adaptation. *J. Acou. Soc. Am.* 44 (1968) 250–256.
- Stokinger, T. E.; Cooper, W. A., Jr.; Meissner, W. A.: Influence of binaural interaction on the measurement of perstimulatory loudness adaptation. *J. Acou. Soc. Am.* 51 (1972) 602–607.
- Weiler, E. M.; Cobb, F.: Duration of increment, magnitude estimation adaptation and a proposed loudness function. *J. Aud. Res.* 22 (1982) 233–239.
- Weiler, E. M.; Sandman, D.; Pederson, L.: Magnitude estimation of loudness adaptation at 60 dB SPL. *Br. J. Audiol.* 15 (1981) 201–204.
- Wittich, B. A.: Experimental studies on auditory adaptation. *Int. Audiol.* 5 (1966) 7–47.
- Wright, N. N.: Measurement of perstimulatory auditory adaptation. *J. Acou. Soc. Am.* 32 (1960) 1558–1567.

Fingegangen am 8. 7. 1988

Anschr. d. Verf.: Dr. R. Hübner

Institut für Psychologie der Universität Regensburg  
Universitätsstr. 31, D - 8400 Regensburg