

*Der Begriff der Kanalkapazität und seine Anwendung auf das Klangfarbenhören**

VON VOLKER RAHLFS, MÜNCHEN

Die zunehmende Vervollkommnung elektro-akustischer Apparaturen sowie die fortgeschrittene psychometrische Methodik haben in den letzten 20 Jahren wieder eine verstärkte Tätigkeit auf dem Gebiet der Erforschung der Hörwahrnehmung ausgelöst. Im Gegensatz zu den Arbeiten der 20er Jahre, etwa von Carl Stumpf¹ und Erich Schumann², in denen die quantitativ-experimentelle Methodik mehr auf die physikalischen Aspekte der Wahrnehmung beschränkt war, wird heute mehr und mehr auch die Wahrnehmung, insbesondere die dimensionale Struktur der Wahrnehmung, exakt-quantitativ untersucht. So wurden mit einer Reihe von mehrdimensionalen Skalierungsverfahren die verschiedensten Reize untersucht: Sonar-Gerät-Geräusche³, musikalische Klänge⁴, speziell Klarinetten-Klänge⁵, schließlich auch komplexe synthetische Klänge⁶. Das Problem des Klangfarben-Erkennens wurde in den letzten Jahren in drei amerikanischen Arbeiten untersucht, varianzanalytisch von Berger⁷, quantitativ über Verwechslungsmatrizen von Saldanha und Corso⁸, schließlich auch von einer Forschungsgruppe im Elektronik-Forschungslaboratorium des MIT⁹. In dem vorliegenden Aufsatz soll der aus der Nachrichtentechnik entlehnte Begriff der Kanalkapazität auf die Klangfarbenwahrnehmung angewendet werden.

Der Begriff der Kanalkapazität und die informationstheoretischen Grundlagen

Garner und Hake haben 1951 die menschliche Wahrnehmung als ein Kommunikationssystem betrachtet, wobei gegebene Reize als Input und Reaktionen als Output interpretiert wurden¹⁰. Im einfachsten Falle ergibt sich damit eine bivariate Wahrscheinlichkeitsverteilung, bei der die Reize die eine Variable, die Reaktionen die andere Variable darstellen. Der Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Ausgangs-Variablen, quantifiziert als „kontingente Ungewißheit“ mit Hilfe des bekannten Wiener-Shannon-Maßes der Informationstheorie, kann hierbei als „über-

* Diese Arbeit wurde mit Unterstützung der Thyssen-Stiftung im Studio für elektronische Musik, München, gefertigt.

¹ C. Stumpf, *Die Sprachlaute*, Berlin 1926.

² E. Schumann, *Die Physik der Klangfarben*, Habil.-Schr. Berlin 1929.

³ L. N. Solomon, *Navy Electronics Laboratory Report 443* (1953); ferner: derselbe, *Semantic approach to the perception of complex sounds*, J. Acoust. Soc. Amer. 30 (1958) 421—425.

⁴ V. Rahlfs, *Psychometrische Untersuchungen zur Wahrnehmung musikalischer Klänge*, Diss. Hamburg 1966.

⁵ E. Jost, *Akustische und psychometrische Untersuchungen an Klarinettenklängen*, Diss. Hamburg 1967.

⁶ R. W. Peters, *Research on psychological parameters of sound*, ASTIA Document 240 814, WADD TR 60—249.

⁷ K. W. Berger, *Some factors in the recognition of timbre*, J. Acoust. Soc. Amer. 36 (1964) 1888—1891.

⁸ E. L. Saldanha und J. F. Corso, *Timbre cues and the identification of musical instruments*, J. Acoust. Soc. Amer. 36 (1964) 2021—2026.

⁹ M. Clark, Jr., D. Luce, R. Abrams, H. Schlossberg und J. Rome, *Preliminary experiments on the aural significance of parts of tones of orchestral instruments and on choral tones*, J. Audio Eng. Soc. 11 (1963) 45—54.

¹⁰ W. R. Garner und H. W. Hake, *The amount of information in absolute judgments*, Psychol. Rev. 58 (1951) 446—459.

tragene Information“ („*transmitted information*“) bezeichnet werden und ist ein Maß für die Erkennungsfähigkeit des wahrnehmenden Subjektes.

Nach dem Vorgehen von Garner und Hake wurden die Identifizierungsmöglichkeiten auf sehr vielen Dimensionen der Wahrnehmung untersucht. Allgemein ergab sich: Bei steigendem Reizangebot steigt der übertragene Informationsbetrag zunächst an (mehr Reize werden richtig identifiziert), erreicht aber schon recht bald einen für jede Dimension charakteristischen Höchstwert (das zusätzliche Informationsangebot führt zu Verwechslungen). Dieser Höchstwert definiert die Kanalkapazität des betreffenden Wahrnehmungssystems. Da das Maß für die übertragene Information nicht von einem bestimmten Maßsystem abhängt, lassen sich die Kanalkapazitäten verschiedener Dimensionen und auch Sinnesgebiete gut vergleichen. Es zeigt sich, daß auf einer Dimension gewöhnlich nur 5 bis 9 Reize richtig identifiziert werden („*Seven plus or minus two*“¹¹). Am meisten Reize werden vom Gesichtssinn identifiziert (3,25 bit \approx 10 Reize bei der Lage von Punkten¹², 3,1 bit \approx 8 Reize bei Farben¹³), weniger auf dem akustischen Kanal (2,2 bit \approx 5 Töne bei der Tonhöhe¹⁴, 2,3 bit bei der Lautheit¹⁵), noch weniger durch den hautmechanischen Kanal und den Geschmackssinn.

Bei Experimenten mit mehrdimensionalen Reizen zeigte sich, daß die Kanalkapazität zwar mit jeder zusätzlichen Dimension ansteigt, daß aber dieser Anstieg nicht ganz den Betrag umfaßt, den diese Dimension für sich genommen aufweist.

Die Kanalkapazität des Gehörsinns

An Sinusschwingungen wurde 1953 von I. Pollack die Kanalkapazität auf dem Frequenzkontinuum ermittelt¹⁶. Es ergab sich ein Betrag von 2,2 bit, entsprechend etwa 5 Tönen. Diese Zahl erschien, gemessen an dem, was man vernünftigerweise bei der Wahrnehmung von Sprach- und Musikklängen erwarten durfte, erstaunlich niedrig. Garner ermittelte im selben Jahr für Lautstärke an Sinusschwingungen einen T(S,R)-Wert von 2,1 bits¹⁷. Entsprechend den Ergebnissen auf anderen Gebieten konnte Pollack nachweisen, daß die übertragene Information T ansteigt, wenn man neue Dimensionen hinzunimmt¹⁸. Bei Tonhöhe und Lautheit ergab sich ein T(S,R) von 3,1 bit, was etwa 10 Reizen entspricht. Pollack und Ficks kamen durch Verwendung von insgesamt sechs verschiedenen Reizdimensionen auf 7,9 bits, was etwa 240 Reizen entspricht¹⁹. Sie variierten Frequenz, Lautheit, Unterbrechungsgeschwindigkeit, prozentuale Zeit „ein“, Gesamtdauer, Richtung im Raum.

11 G. A. Miller, *The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information*, *Psychol. Rev.* 63 (1956) 81–97.

12 H. W. Hake und W. R. Garner, *The effect of presenting various numbers of discrete steps on scale reading accuracy*, *J. exp. Psychol.* 67 (1954) 1–14. W. J. McGill, *Multivariate information transmission*, *Psychometrika* 19 (1954) 97–116.

13 A. Chapanis und R. M. Halsey, *Absolute judgments of spectrum colors*, *J. Psychol.* 42 (1956) 99–103.

14 I. Pollack, *The information of elementary auditory displays*, *J. Acoust. Soc. Amer.* 24 (1952) 745–749; derselbe, *The information of elementary auditory displays*, II, *J. Acoust. Soc. Amer.* 25 (1953) 765–769.

15 W. R. Garner, *An informational analysis of absolute judgments of loudness*, *J. exp. Psychol.* 46 (1953) 373–380.

16 Vgl. Anmerkung 14.

17 W. R. Garner, ebenda.

18 I. Pollack, *The information of elementary auditory displays*, II, *J. Acoust. Soc. Amer.* 25 (1953) 765–769.

19 I. Pollack und L. Ficks, *Information of multidimensional auditory displays*, *J. Acoust. Soc. Amer.* 26 (1954) 155–158.

Die bekannten Untersuchungen zur Bestimmung der Kanalkapazität der Hörwahrnehmung bedienen sich vorzugsweise der leicht manipulierbaren Sinusschwingungen. Lediglich von R. W. Peters wurden in neuerer Zeit komplexe Schallereignisse untersucht, die mit Musikinstrumentenklängen zu vergleichen sind: Das Reizmaterial bestand aus „Multitönen“, die im Laboratorium aus verschiedenen Sinusschwingungen aufgebaut worden waren²⁰. Aus den Ergebnissen der Untersuchung folgerte jedoch der Autor, daß die informationstheoretische Methodik eher für Reizsysteme geeignet ist, welche dem wahrnehmenden Subjekt schon bekannt sind, wie etwa die Sprache²¹.

In der vorliegenden Arbeit soll ein bekanntes System, nämlich Klänge von Musikinstrumenten, informationstheoretisch untersucht werden. Langes Einüben der Benennung erübrigt sich damit. Indessen hat man es dabei — wie später noch deutlich wird — mit Schwierigkeiten eigener Art zu tun: Die Wahrnehmungs-Dimensionen können nicht mehr so vollkommen kontrolliert werden wie bei Sinusschwingungen.

Experimentelle Methodik

Die Auswertung einer von K. W. Berger veröffentlichten Verwechslungsmatrix²² für Blasinstrumentenklänge ergab einen Wert $T(S, R)$ von 1,81 bit, was einer vollkommenen Identifikation von drei bis vier Klängen entspricht. Daher durfte ein Angebot von 10 verschiedenen Reizen als ausreichend für die Bestimmung der Kanalkapazität angesehen werden. Es wurden zehn möglichst verschiedene Musikinstrumente ausgewählt, die einen konstanten Klang abgeben können: Geige, Saxophon, Oboe, Posaune, Klarinette, Horn, Fagott, Trompete, Akkordeon, Flöte. Es war geboten, Lautheit, Tonhöhe und Dauer möglichst konstant zu halten, damit nicht zusätzliche Anhalte zur Identifizierung hereinkommen. Die Lautheit war einigermaßen gut zu kontrollieren. Bekanntlich hängt sie bei komplexen Schwingungen vor allem von der Produktionsstärke ab²³. Die Klänge wurden deshalb in den gewohnten musikalischen Kategorien forte, piano und mezzoforte produziert und mit etwa gleicher Intensität vom Tonband reproduziert. Innerhalb einer musikalischen Lautstärkekategorie schwanken die Pegel in einem Bereich von 10 dB. Die einzelnen Klänge sind zwischen drei und 4 Sekunden lang. Es wurde nicht versucht, hier durch Tonbandschnitte gleiche Dauer zu erreichen, da dabei nur der Klang verfälscht worden wäre.

Schwieriger war die Tonhöhe zu kontrollieren: Nach neueren Untersuchungen hängt der Tonhöhereindruck, der sich bei einer sogenannten Absolutbeurteilung von Klängen einstellt, nicht nur vom Grundton, sondern auch vom Spektrum ab²⁴. Er ist — musikalisch gesprochen — hoch mit der Lage auf dem Instrument korre-

²⁰ R. W. Peters, *Research on psychological parameters of sounds*, ASTIA Document 240 814, WADD TR 60—249.

²¹ R. W. Peters, ebenda, S. 22.

²² K. W. Berger, ebenda, S. 1889.

²³ Vgl. hierzu H. P. Reinecke, *Über den doppelten Sinn des Lautheitsbegriffes beim musikalischen Hören*, Diss. Hamburg 1953 (Ms.); ferner: P. Ladefoged, *The perception of speech*, Proc. Symp. on Mechanization of Thought Processes, National Physical Laboratory Teddington, England, Nov. 24—27, 1958.

²⁴ V. Rahlfs, *Psychometrische Untersuchungen zur Wahrnehmung musikalischer Klänge*, Diss. Hamburg 1966, vgl. S. 88 f.

liert²⁵. Der Tonhöheindruck wird deshalb gerade bei gleicher musikalischer Tonhöhe stark variieren. Hinzu kommt eine andere Schwierigkeit beim Experimentieren mit Musikinstrumenten. Die Klangfarbe ist in den verschiedenen Lagen sehr unterschiedlich und überdies, wenn man alle Instrumente denselben Ton spielen läßt (etwa das eingestrichene *e*), sind einige Instrumente gerade im uncharakteristischen Bereich²⁶.

Es wurden insgesamt sechs verschiedene Test-Tonbänder präpariert:

1. Klänge im eingestrichenen *e*, forte, 2. Klänge in tiefer Lage, forte, 3. Klänge in tiefer Lage, piano, 4. Klänge in hoher Lage, forte, 5. Klänge in hoher Lage, piano und 6. Fünfton-Folge, mezzoforte, in jeweils typischer Lage der Instrumente.

Jeder dieser sechs Blöcke enthielt die 10 Instrumenten-Klänge in zufälliger Reihenfolge, jedoch mit zwei Einschränkungen: Jeder Klang sollte genau achtmal gespielt werden und es sollte nicht derselbe Klang unmittelbar aufeinander folgen²⁷. Entsprechend den Prinzipien der Absolut-Beurteilung lag zwischen den Klängen eine Pause von 15 sec. Zu Beginn der Identifikation bekamen die Versuchspersonen jeden Klang zweimal mit Namen vorgestellt, so daß eine Test-Sitzung alles in allem etwa 35 Minuten in Anspruch nahm.

Als Versuchspersonen dienten Studenten der Musikwissenschaft und Soziologie, außerdem Oberstufen-Klassen (17–20 Jahre) von Münchener Mädchen-Gymnasien²⁸. Die Testsitzungen fanden im sogenannten Musikraum des Studio für elektronische Musik, einem „trockenen“ Aufnahmerraum mit einem Volumen von ca. 117 m³, statt. Die Wiedergabeapparatur bestand aus einem Telefunken-Magnetophongerät M 5 (Vollspur), 2 Siemens-10-Watt-Tischverstärkern 6 S Ela 2427c und 2 Isophon Lautsprecherboxen, Druckstrahler-Kombination G 3037. Nach subjektiver Einschätzung wurden die Verstärker derart geregelt, daß etwa die gleiche Schall-Intensität wie bei der Aufnahme herrschte. In einer Gemeinschaftssitzung kreuzte jeder Teilnehmer in einem Vier-Seiten-Testbogen eines der vorgedruckten 10 Instrumente bzw. eine Unsicherheits-Kategorie an.

Resultate der Untersuchung

Es wurde zunächst für jede Versuchsperson durch Auszählen der Reiz-Reaktions-Kategorien eine Verwechslungsmatrix erstellt²⁹. Die über eine bestimmte Stichprobe von Klängen und Versuchspersonen hinweg kumulierten Matrizen, die als Unterlagen für die Berechnung der Kanalkapazität dienten, seien hier mit angeben, für den Fall, daß irgend jemand die Verwechslungsmatrizen noch in einer anderen Art als der informationstheoretischen auswerten möchte.

²⁵ Ebenda, S. 85.

²⁶ Aus diesem Grunde bevorzugte schon C. Stumpf bei seinen Identifikationsexperimenten unterschiedliche Tonhöhen. Man vergleiche dazu auch seine diesbezügliche Anmerkung auf Seite 375 in: *Die Sprachlaute*, Berlin 1926.

²⁷ Durch ein Versehen macht Block 4 und 5 eine Ausnahme, das Saxophon erscheint hier nur 7 bzw. 6 mal, ein bzw. zwei andere Instrumente dafür 9 mal. Für die informationstheoretische Analyse dürfte das ziemlich belanglos sein.

²⁸ Ich möchte mich an dieser Stelle für das Entgegenkommen der Münchener Schulbehörde bedanken, insbesondere für die Unterstützung durch Herrn Stadtschulrat Dr. Fingerle.

²⁹ Sämtliche Auszählungen und T-Wert-Berechnungen erfolgten elektronisch mit Hilfe des Telefunken-Rechners TR 4, welcher der Bayerischen Akademie der Wissenschaften durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt wird.

Tabelle 1

		Reaktion										
		Ak	Fl	Ob	Sa	Fa	Ho	Po	Kl	Ge	Tr	?
	Akkordeon	108	0	0	2	0	0	0	1	0	0	1
	Flöte	0	111	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Oboe	0	5	105	0	2	0	0	0	0	0	0
	Saxophon	0	0	0	85	20	1	0	6	0	0	0
	Fagott	0	0	1	13	96	1	0	1	0	0	0
Reiz	Horn	0	0	0	0	0	108	4	0	0	0	0
	Posaune	0	0	0	3	0	2	98	0	0	9	0
	Klarinette	0	0	0	3	1	0	0	107	0	1	0
	Geige	0	0	1	3	1	0	0	0	107	0	0
	Trompete	0	0	1	1	0	0	7	1	2	100	0

Block 1, eingestrichenes e, Musikwissenschaftler als Beurteiler.

Tabelle 2

		Reaktion										
		Ak	Fl	Ob	Sa	Fa	Ho	Po	Kl	Ge	Tr	?
	Akkordeon	44	0	0	3	0	0	1	5	0	3	0
	Flöte	0	46	4	2	2	0	0	0	0	1	1
	Oboe	0	10	36	6	1	0	0	3	0	0	0
	Saxophon	0	1	4	23	15	3	2	7	1	0	0
	Fagott	1	1	15	9	19	3	0	6	0	0	2
Reiz	Horn	0	0	1	1	3	46	4	0	0	0	1
	Posaune	0	0	0	0	0	7	28	0	0	21	0
	Klarinette	2	0	2	7	10	0	0	31	1	1	2
	Geige	1	0	0	3	0	0	0	0	52	0	0
	Trompete	0	2	0	6	1	1	5	7	2	31	1

Block 1, eingestrichenes e, Nicht-Musikwissenschaftler als Beurteiler.

Tabelle 3

		Reaktion										
		Ak	Fl	Ob	Sa	Fa	Ho	Po	Kl	Ge	Tr	?
	Akkordeon	143	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	Flöte	0	141	1	0	2	0	0	0	0	0	0
	Oboe	0	1	142	0	1	0	0	0	0	0	0
	Saxophon	2	0	0	127	6	1	0	7	0	0	1
	Fagott	0	0	0	1	132	2	8	0	0	1	0
Reiz	Horn	0	0	0	0	18	61	63	1	0	1	0
	Posaune	0	0	0	0	8	11	120	2	0	3	0
	Klarinette	1	0	0	7	0	2	0	134	0	0	0
	Geige	1	0	0	0	0	0	0	3	140	0	0
	Trompete	0	0	0	1	0	6	0	0	0	136	1

Block 2, tiefe Klänge, forte, Musikwissenschaftler als Beurteiler.

Tabelle 4

		Reaktion										
		Ak	Fl	Ob	Sa	Fa	Ho	Po	Kl	Ge	Tr	?
	Akkordeon	34	0	1	1	3	0	0	11	3	3	0
	Flöte	1	41	1	1	2	0	0	3	6	0	1
	Oboe	1	10	34	0	2	0	0	8	1	0	0
	Saxophon	4	0	3	34	3	0	0	5	3	0	4
	Fagott	0	0	1	3	36	2	13	0	0	1	0
Reiz	Horn	0	0	3	1	9	24	18	0	0	1	0
	Posaune	0	0	0	5	2	17	25	0	0	3	4
	Klarinette	1	1	7	6	2	0	1	36	0	0	2
	Geige	0	0	0	3	0	0	0	3	49	0	1
	Trompete	0	0	0	4	2	2	1	4	0	42	1

Block 2, tiefe Klänge, forte, Nicht-Musikwissenschaftler als Beurteiler.

Tabelle 5

		Reaktion										
		Ak	Fl	Ob	Sa	Fa	Ho	Po	Kl	Ge	Tr	?
	Akkordeon	169	1	18	3	3	2	3	1	6	2	0
	Flöte	1	192	2	1	2	0	1	6	3	0	0
	Oboe	5	12	173	8	0	0	0	5	4	0	1
	Saxophon	2	0	7	93	16	12	21	18	9	28	2
	Fagott	0	3	0	4	137	41	20	0	0	2	1
Reiz	Horn	0	0	1	2	60	84	47	1	1	10	2
	Posaune	1	0	4	21	20	64	66	10	2	19	1
	Klarinette	0	0	1	21	6	4	4	150	0	21	1
	Geige	0	1	3	3	1	0	0	2	196	1	1
	Trompete	0	4	7	40	12	21	13	38	1	70	2

Block 3, tiefe Klänge, piano, Oberstufenklasse als Beurteiler.

Tabelle 6

		Reaktion										
		Ak	Fl	Ob	Sa	Fa	Ho	Po	Kl	Ge	Tr	?
	Akkordeon	67	0	4	3	0	0	1	7	2	1	3
	Flöte	2	68	1	2	1	0	0	11	1	0	2
	Oboe	0	17	57	4	3	0	1	4	1	0	1
	Saxophon	0	1	5	27	8	4	6	11	0	3	1
	Fagott	0	0	1	8	59	9	8	2	0	0	1
Reiz	Horn	1	2	5	2	5	48	18	10	0	7	1
	Posaune	0	1	0	13	30	23	24	4	0	3	1
	Klarinette	11	1	3	9	2	2	1	27	27	4	1
	Geige	3	0	0	1	1	0	0	5	75	2	1
	Trompete	2	0	1	17	0	1	16	5	0	46	0

Block 4, hohe Klänge, forte, Oberstufenklasse als Beurteiler.

Tabelle 7
Reaktion

	Ak	Fl	Ob	Sa	Fa	Ho	Po	Kl	Ge	Tr	?
Akkordeon	109	2	4	0	1	0	1	6	1	0	4
Flöte	0	114	0	0	1	0	0	8	2	0	3
Oboe	2	5	89	0	1	0	1	3	8	0	3
Saxophon	2	3	3	90	6	1	3	9	0	0	11
Fagott	0	0	5	4	100	4	8	0	0	0	7
Reiz Horn	0	0	1	2	1	114	11	1	2	9	3
Posaune	1	0	2	16	1	25	61	0	0	2	20
Klarinette	1	2	7	3	3	0	0	104	0	3	5
Geige	1	0	6	2	0	0	0	0	115	0	4
Trompete	0	0	0	0	0	4	2	2	0	115	5

Block 5, hohe Klänge, piano, Musiker und Komponisten als Beurteiler.

Tabelle 8
Reaktion

	Ak	Fl	Ob	Sa	Fa	Ho	Po	Kl	Ge	Tr	?
Akkordeon	206	3	1	1	0	0	0	1	1	1	2
Flöte	0	190	8	1	2	3	1	8	1	1	1
Oboe	0	6	178	8	1	1	0	11	7	1	3
Saxophon	4	3	32	146	0	1	7	16	0	3	4
Fagott	1	0	0	12	151	16	21	7	2	3	3
Reiz Horn	1	1	1	2	9	161	23	4	1	13	0
Posaune	1	1	3	4	41	18	139	3	2	4	0
Klarinette	2	5	5	12	9	5	5	163	1	7	2
Geige	2	0	0	2	1	1	1	1	208	0	0
Trompete	0	2	11	6	0	5	7	5	1	175	4

Block 6, Fünftonfolge, Oberstufenklasse als Beurteiler.

In den Tabellen stehen die dargebotenen Klänge links, die identifizierten horizontal oben. Die 11. Spalte enthält die nichtidentifizierten Klänge. Die Zahlen in jeder Zeile geben die Häufigkeit an, mit der eine bestimmte Reiz-Reaktions-Kombination erfolgte.

Für die einzelnen Blöcke ergeben sich die folgenden T-Werte (Block 1 und 2 nach musikwissenschaftlichen und nicht-musikwissenschaftlichen Beurteilern getrennt):

Block	Beurteiler	\hat{T} (Reize, Reaktionen)	$\hat{T}_{V_{pn}}$ (Reize, Reaktionen)
1	e' Musikw.	2,85	3,09
1	e' Nicht-Mus.	1,83	2,37
2	tief, forte Musikw.	2,80	3,01
2	tief, forte Nicht-Mus.	1,78	2,37
3	tief, piano Schulklasse	1,76	2,33
4	hoch, forte Schulklasse	1,52	2,14
5	hoch, piano Musiker	2,37	2,80
6	Fünftonfolge Schulklasse	2,19	2,72

Die Klammern zeigen an, wo es sich um die gleiche Gruppe von Versuchspersonen handelt. Ein Vergleich des Blocks 3 mit Block 6 zeigt, wie der Duktus eines Instrumentes zur Identifikation beiträgt. Es kann ein Instrument mehr identifiziert werden. Der Unterschied zwischen Block 1 und 2 ist bei den musikwissenschaftlich vorgebildeten Versuchspersonen gerade auf dem 50/0-Niveau abgesichert³⁰. Etwas vorschnell indessen wäre die Folgerung, daß Klänge auf dem eingestrichenen e allgemein besser identifiziert werden. Eine andere Stichprobe von Klängen hätte auch zu einem anderen Ergebnis führen können.

Damit ergibt sich für eine wenig ausgelesene Stichprobe (Schulklasse, Soziologiestudenten) bei Einzeltönen und ohne Lernen eine Kanalkapazität von ca. 2,3 bit (T Versuchspersonen [Reize, Reaktionen]), was einer perfekten Identifikation von 5 Instrumenten entspricht. Für musikalische Versuchspersonen liegt der Wert bei 3 bit, was 8 Instrumentenklängen entspricht. Einzelne Personen konnten sogar sämtliche 10 Klänge verwechslungsfrei identifizieren, was einer Kanalkapazität von 3,32 bit entspricht. Es steht zu vermuten, daß bei intensivem Lernen, wie es bei den früheren Untersuchungen mit Sinusschwingungen dem Test vorausging, die Kanalkapazität auf 3,58 bit \approx 12 Klänge steigt, auch ohne daß Schlaginstrumente in die Stichprobe der Klänge mit aufgenommen werden.

D i s k u s s i o n

Unter der Voraussetzung, daß der ermittelte T-Wert der musikalischen Versuchspersonen den T-Werten aus anderen Versuchen mit vorausgegangenem Lernen vergleichbar ist, ergab sich ein erstaunlich hoher Wert für die Kanalkapazität. Der T-Wert des Klangfarbenhörens ist aber mit 3 bit dem für die Farbe im visuellen Gebiet (3,1 bit) ziemlich gleich und übertrifft alle anderen Werte, die auf eindimensionalen Kontinuen ermittelt wurden³¹. Wenn man davon ausgeht, daß bei eindimensionalen Reizen die Kanalkapazität gewöhnlich bei 1,9 bis 2,5 bit liegt und daß die übertragene Information mit der Zahl der Reiz-Aspekte oder -Dimensionen zunimmt, dann ist zu vermuten, daß es sich bei der Klangfarbe um einen mehrdimensionalen Reiz handelt. Wenn man überdies bedenkt, daß zweidimensionale Reize (Tonhöhe-Lautstärke) im auditiven Gebiet zu 3,07 bit Informationsübertragung führten, so ist die Annahme eines dreidimensionalen Systems für die Klangfarbe wohl angemessen.

Die Auswertung der von Berger veröffentlichten Verwechslungsmatrix³² hatte eine Kanalkapazität von $T(S, R) = 1,81$ ergeben. Man fragt sich, warum die Studenten-Musiker Bergers nur halb so viel Klänge identifizieren konnten wie die Musikwissenschaftler in der vorliegenden Untersuchung. Der Unterschied ist leicht mit Bergers Zusammenstellung von Instrumenten zu erklären: Unter seinen zehn Instrumentenklängen sind sich einige recht ähnlich: Trompete und Kornett, Tenor-Saxophon und Alt-Saxophon, Horn (French Horn) und Tenorhorn (Bariton). Die Stichprobe der Klänge in der vorliegenden Untersuchung enthielt neben den Blas-

³⁰ Nach dem Wilcoxon-Test für Paardifferenzen.

³¹ Vgl. hierzu die Aufstellungen bei G. A. Miller oder B. F. Lomow. G. A. Miller, *The magical number seven, plus or minus two: some limits on capacity for processing information*, Reading in perception, Toronto 1958; B. F. Lomow, *Ingenieurpsychologie*, Berlin 1964, vgl. S. 134.

³² K. W. Berger, *Some factors in the recognition of timbre*, J. Acoust. Soc. Amer. 36 (1964) 1888—1891.

instrumenten auch die sehr charakteristischen Klänge der Geige und des Akkordeons. Es dürfte demnach bei Blasinstrumenten ein T von 2,1 bit als angemessen gelten³³, bei Nicht-Schlaginstrumenten ein T von 3,1 bit.

In die gleiche Richtung deuten auch die Ergebnisse einer Untersuchung aus dem Elektronik-Forschungslaboratorium des MIT³⁴. Die Auswertung der veröffentlichten Verwechslungsmatrix ergab einen Wert von $T(S,R) = 2,71$, was nach den Erfahrungen in der vorliegenden Arbeit etwa einem $T_{\text{vpn}}(S,R)$ von 3 bit entspricht. Auch hier wurde kein langes Einüben vorausgeschickt, aber es handelt sich offensichtlich um sonst optimale Bedingungen: Orchestermusiker fungierten als Beurteiler, jeder Ton wurde mehrmals für eine Beurteilung gegeben, es handelt sich um elf Instrumente, Streicher, Holz- und Blechbläser.

Die Daten aus beiden amerikanischen Arbeiten wie aus der eigenen Untersuchung deuten also darauf hin, daß die Kanalkapazität für Klangfarben (Nicht-Schlaginstrumente) unter günstigen Bedingungen bei 3 bit liegt und durch Lernen, das bei den übrigen informationstheoretischen Untersuchungen eingeschaltet war, vermutlich noch etwas verbessert werden kann.

Der Begriff der Kanalkapazität wird auch mitunter zeitlich definiert und umfaßt dann die Menge der Information, die in einem gewissen Zeitintervall übertragen wird. Die Geschwindigkeit der Informationsübertragung R ergibt sich zu

$$R = \frac{T(S,R)}{t},$$

wobei $T(S,R)$ den schon berechneten Wert der übertragenen Information und t die Zeit bedeutet, innerhalb derer die Information T übertragen wird.

In dem schon zitierten Aufsatz von M. Clark, D. Luce u. a. sind Verwechslungsmatrizen angegeben, die auf kurzzeitig dargebotenen Instrumentalklängen basieren: Mit Hilfe eines elektronischen Schalters waren aus den zeitlichen Verläufen der Klänge Sekundenbruchteile des Anschwingvorganges und des stationären Teiles herausgeschnitten. Durch informationstheoretische Auswertung der Matrizen erhielten wir folgende T - und R -Werte:

Stationärer Teil des Klanges, Dauer: 0,15 bis 0,25 s

1. $T(S,R) = 2,12 \text{ bit} \approx 10 \text{ bit/s}$

Anschwingvorgänge

Dauer	$T(S,R)$	$R = \frac{T(S,R)}{t}$
2. 0,6 s	3,22	5 bit/s
3. 0,12 s	3,06	25 bit/s
4. 0,06 s	3,09	51 bit/s

Der Vergleich der Matrizen 3 (0,12 s) und 4 (0,06 s) zeigt kaum eine Veränderung des T -Wertes, so daß die Darbietungszeit möglicherweise noch etwas ver-

³³ Von uns auf Grund des Wertes $T(S,R)$ geschätzt.

³⁴ M. Clark, Jr. et al, *Preliminary experiments on the aural significance of parts of tones of orchestral instruments and on diatonic tones*, J. Audio Eng. Soc. 11 (1963) 45—54.

³⁵ B. F. Lomow, *Ingenieurpsychologie*, Berlin 1964.

kürzt werden könnte, ohne den T-Wert gleich beträchtlich abnehmen zu lassen. Der R-Wert von 51 bit/s mag deshalb noch um ein wenig höher liegen.

Im Laboratorium für industrielle Psychologie an der Leningrader Universität wurde die Kanalkapazität R für Buchstaben- und Ziffernerkennung bestimmt³⁵. Es ergab sich³⁶:

$$R \approx \frac{3,32 \text{ bit}}{0,06 \text{ s}} \text{ (Ziffern)} \approx \frac{5,00 \text{ bit}}{0,09 \text{ s}} \text{ (Buchstaben)} = 55 \text{ bit.}$$

Bemerkenswerterweise konnte soeben für die auditive Wahrnehmung fast derselbe R-Wert errechnet werden, wenn man als Ausgangsbasis für die Berechnung die informationsreicheren Anschwingvorgänge nahm. Wenn man bedenkt, daß wir es in der Praxis gewöhnlich nur mit Ausgleichsvorgängen zu tun haben, dann dürften die 51 bit/s eine realistische Schätzung für die Kanalkapazität darstellen.

Zusammenfassung

Es wird die Kanalkapazität für Klangfarben an Hand von Verwechslungsmatrizen bestimmt, die im Studio für elektronische Musik, München, erstellt wurden. Die Auswertung der Matrizen und auch die informationstheoretische Verarbeitung von in Amerika veröffentlichten Matrizen ergibt — ähnlich wie im visuellen Bereich bei Farben — einen T-Wert von über 3 bit. Es wird vermutet, daß das Klangfarbenhören durch ein dreidimensionales System beschrieben werden kann. Die Auswertung amerikanischer Verwechslungsmatrizen für Kurzzeitdarbietung ergibt einen Wert von 51 bit/s für die zeitlich definierte Kanalkapazität; dieser Wert ist von ähnlicher Größe wie der, welcher von anderen Autoren für Buchstaben- und Zahlenerkennung im visuellen Bereich ermittelt werden konnte.

³⁶ Vgl. Lomow, S. 149.