

(Aus der physikalischen Abteilung des physiologischen Instituts
der Universität Berlin.)

Die Schätzung von Bewegungsgrößen bei Vorderarmbewegungen.

Von

ROSWELL P. ANGIER. Cambridge, U.S.A.

Z. Z. Volontärassistent am Institut.

I. Einleitung.

Der folgende Aufsatz soll über eine Reihe von Versuchen berichten, welche sich mit der Schätzung kleiner Distanzen bei horizontalen Bewegungen des rechten Vorderarmes beschäftigten. Insbesondere wurde die Frage gestellt, welchen Einfluss einige spezielle Versuchsbedingungen, wie Änderung des Widerstandes, der Geschwindigkeit der Bewegung, der Lage des bewegten Gliedes usw. auf die Präzision der Schätzung ausüben.

Auch wenn wir die einfachsten Bedingungen annehmen, unter denen überhaupt eine solche Raumschätzung stattfinden kann, hat man es immer schon mit vier variablen Faktoren zu tun, nämlich mit Haut-, Gelenk-, Sehnen- und Muskelbewegungen. Die meisten früheren Forscher haben aber diese an sich unvermeidliche Kompliziertheit so gesteigert, zum Teil durch Gebrauch mehrerer Gelenke usw., daß es mir unmöglich scheint, aus ihren Ergebnissen unzweideutige Schlüsse abzuleiten. Möge es vorläufig genügen, daß ich hier nun die Arbeiten von CREMER¹, LOEB²,

¹ CREMER: Über das Schätzen von Distanzen bei Bewegungen von Arm und Hand. Inaug.-Diss. Würzburg 1887.

² LOEB: Untersuchungen über den Fühlraum der Hand. *Pflügers Archiv* 41, S. 107 ff. 1887, und 46, S. 1 ff. 1890.

FALK¹, BLOCH², DELABARRE³, FULLERTON and CATTELL⁴ und WOODWORTH⁵ nenne und auf Einzelheiten erst im Laufe dieser Mitteilung näher eingehe.

Ich habe also versucht, die früheren Versuchsbedingungen wesentlich dadurch zu vereinfachen, daß ich erstens allein Bewegungen des Ellbogengelenkes vornehmen ließ; diese fielen natürlich kreisbogenförmig aus, da die Gelenke der Mittelhand und der Finger unbewegt blieben. Zweitens durchlief die Normal- und die Vergleichsbewegung⁶ in gleicher Richtung eine Strecke, deren Ausgangspunkt für beide identisch war. Drittens ließ ich sämtliche Bewegungen innerhalb eines begrenzten Spielraums ausführen.

Daß ich, wie gesagt, kreisbogenförmige Bewegungen den geradlinigen vorzog, brauche ich, nach den Ausführungen von WUNDT⁷, KÜLPE⁸ und NAGEL⁹ kaum zu rechtfertigen.

Was den zweiten Punkt anbelangt, so ließ ich deshalb sämtliche Bewegungen (außer denen, wo der Einfluß verschiedener Armlagen untersucht wurde) von identischen Ausgangspunkten stattfinden, weil ich bei den Vergleichsbewegungen keine ganz neuen Muskeln, Gelenke usw. in Anspruch nehmen wollte und hoffte, auf diese Weise Fehler zu vermeiden, welche den Versuchen¹⁰ anhaften, bei denen z. B. der Endpunkt der Normalbewegung den Ausgangs-

¹ FALK: Versuche über die Raumschätzung mit Hilfe von Armbewegung. Inaug.-Diss. Dorpat 1890.

² BLOCH: Expériences sur les sensations musculaires. *Rev. Scient.* 45 (10), 1890.

³ DELABARRE: Über Bewegungsempfindungen. Inaug.-Diss. Freiburg i. B. 1901.

⁴ FULLERTON and CATTELL: On the Perception of small Differences. Univ. of Pennsylvania Philos. Series 1892.

⁵ WOODWORTH: The Accuracy of Voluntary Movement. *Psychol. Rev.* 1899, Monog. Suppl. Nr. 13.

⁶ Bei successiven Bewegungen, wie sie in meinen Versuchen ausgeführt wurden, ist die Vergleichsbewegung stets die zuzweit folgende. Die Versuchsperson hatte immer zu sagen, ob diese in bezug auf die erste (normale) Bewegung „gleich“, „kleiner“ oder „größter“ ausgefallen war.

⁷ W. WUNDT: Physiologische Psychologie, 4. Aufl., Bd. 1, S. 427.

⁸ KÜLPE: Grundrifs der Psychologie 1893. S. 354.

⁹ NAGEL: Handbuch der Physiologie des Menschen. Bd. 3, S. 754. 1905.

¹⁰ KRAMER und MOSKIEWICZ: Beiträge zur Lehre von den Lage- und Bewegungsempfindungen. *Diese Zeitschrift* 25, S. 101—160. 1901, s. S. 121.

punkt für die Vergleichsbewegung bildet. Dafs es sich bei Innehaltung desselben Ausgangspunktes gar nicht um Bewegungswahrnehmungen, sondern um Lagewahrnehmungen (Erreichung einer bestimmten Endlage) handle¹, halte ich für ausgeschlossen, da aus meinem Versuch über diesen Punkt (Reihe 6 der Tabelle) hervorgeht, dafs innerhalb gewisser Grenzen die Armlage keinen Einfluss auf die Schätzungspräzision hat. Wenn diese Grenzen überschritten werden, kommen, wie oben erwähnt, ganz neue Muskelgruppen ins Spiel, und dadurch resultieren Störungen in der Genauigkeit der Schätzungen; es ist deshalb vorsichtiger und dabei technisch einfacher, denselben Ausgangspunkt beizubehalten.

Der dritte Punkt, welcher oben angedeutet wurde, nimmt Bezug darauf, dafs die meisten früheren Untersucher es vorzogen, im allgemeinen freie, nicht aber begrenzte Bewegungen ausführen zu lassen. Das heifst, es wurden nicht zwei innerhalb festgestellter Grenzen ausgeführte Bewegungen der Gröfse nach miteinander verglichen, sondern die Versuchsperson hatte die Aufgabe, beide Bewegungen gleich grofs zu machen, indem sie die Grenzen wenigstens der zweiten (bei successiven Bewegungen) frei herstellte. Eine nähere Analyse zeigt aber, dafs, wenn die Vergleichsbewegung eine freie ist, die wirklich beurteilte Strecke einen ganz anderen Betrag haben kann als die tatsächlich ausgeführte. Um von der günstigsten Annahme über die Art des Zustandekommens des Urteils in einem solchen Fall auszugehen, stellen wir uns vor, dafs schon bei Beginn der Vergleichsbewegung die zu ihrer Ausführung notwendige Bewegungsgröfse ungefähr vorausgeschätzt wird, und dafs das Urteil definitiv gebildet wird, wenn man eine der Normalbewegung gleiche Strecke zurückgelegt zu haben glaubt. Da aber gegen das Ende der Bewegung der Arm eine nicht unerhebliche Triebkraft haben kann, mufs eine gewisse Zeit vergehen, bis er zum Stehen gebracht werden kann. Mithin mufs die abgelesene Vergleichsstrecke gröfser ausfallen als die beurteilte, und es entsteht der Anschein, die Vergleichsstrecke sei unter- bzw. die Normalstrecke überschätzt worden.

Dafs dieses Plus an Triebkraft an dem Zustandekommen mancher Über- bzw. Unterschätzung bei früheren Versuchen be-

¹ KRAMER und MOSKIEWICZ, S. 113. Auch EBBINGHAUS: Grundzüge der Psychologie. Leipzig, 1902. Bd. I, S. 369.

teilt ist, davon bin ich überzeugt. Aber wie dem auch sein mag, jedenfalls ist es klar, wenn man bei der Vergleichsstrecke die Normalstrecke wirklich zu reproduzieren versucht, wie es in den meisten früheren Versuchen der Fall war, und nicht nur die fertige Bewegung nachträglich schätzt, daß dann ein Urteil gefällt werden muß, während die Vergleichsbewegung tatsächlich noch im Gang ist. Wenigstens der Endteil der Gesamtbewegung steht dann zum Urteil in höchst komplizierten Abhängigkeitsverhältnissen, welche einer quantitativen Bestimmung unzugänglich sind. Wenn aber die Bewegung innerhalb fest fixierter Grenzen ausgeführt wird, entspricht die ausgeführte Bewegung der beurteilten vollständig.

Es liegt mir nun vollkommen fern zu behaupten, die Untersuchungen unter früheren Versuchsbedingungen seien wertlos. Ich bin nur der Ansicht, daß sie kaum zu feineren Feststellungen bezüglich der quantitativen Unterschiede zwischen Normal- und Vergleichsbewegung führen konnten, daß also bei den nach dieser Methodik gewonnenen Beobachtungen nur gröbere Differenzen verlässlich und theoretisch verwertbar sind.

Gewisse Berührungspunkte mit dem von mir gewählten Verfahren haben Versuche, welche SEGSWORTH in WUNDT'S Laboratorium unternahm. Wenn ich die Darstellung¹ richtig verstehe, so wurden tatsächlich bogenförmige Bewegungen innerhalb fixierter Grenzen ausgeführt und zwar von einem bestimmten Anfangspunkt ausgehend. Indessen ist der Bericht so kurz, daß demselben nicht viel zu entnehmen ist. Auch scheint der Einfluß des Widerstandes und anderer spezieller Bedingungen nicht untersucht worden zu sein. Auch KRAMER und MOSKIEWICZ² haben bogenförmige Bewegungen des Vorderarmes in ihre Versuchsmethodik eingeführt. Sie haben aber die Einführung verschiedener Ausgangspunkte für Normal- und Vergleichsbewegung gewählt und haben andere spezielle Bedingungen (Widerstand etc.) nicht variiert.

II. Eigene Versuchsanordnung.

Auf einem Brett waren zwei Paare spitzer Stifte von ungefähr 1,5 cm Höhe befestigt und zwar so, daß die Verbindungslinie je eines Stiftpaares parallel zur Frontalebene der am Tisch

¹ l. c. Bd. 1, S. 429.

² l. c. S. 112 ff.

sitzenden Versuchsperson verlief. Der Abstand des einen Paares blieb konstant, der des anderen konnte durch Verschiebung des rechten Stiftes größer und kleiner gemacht werden. Durch Verschiebung des ganzen Brettes wurde bewirkt, daß der eine (linke) feststehende Stift des konstanten bzw. des in seinem Abstand variablen Stiftpaares in ein und denselben Ort fiel. Dieser war also der gemeinsame Ausgangspunkt für Normal- und Vergleichsbewegung.

Als Versuchsperson diente allein ich selbst. Bei allen Messungen blieben die Augen geschlossen. Ich entblößte den rechten Vorderarm und stützte den Ellbogen auf einen Klotz. Nachdem ich durch natürliche Hin- und Herbewegung des Vorderarms, wobei die Spitze des Mittelfingers die Stiftspitzen leicht berührte, eine Schätzung des Normalabstandes gewonnen hatte, verschob der Gehilfe schnell das Brett, so daß ich, fast ohne die Bewegungen des Armes zu unterbrechen, die Vergleichsmit der Normalstrecke vergleichen konnte. Nach einiger Übung gelang es mir, alle merklichen fremden Gelenkbewegungen zu eliminieren.

Für alle Versuche wurde der Betrag der konstanten Strecke auf 10 cm festgesetzt. Die variable Strecke wurde im Spielraum von 9,2—10,8 cm in Stufen von je 2 mm verändert; somit betrug die größte Differenz zwischen Normal- und Vergleichsabstand 8 mm, die kleinste 2 mm. Rechnet man hinzu, daß bei jeder Versuchsreihe die konstante Strecke einmal mit sich selbst verglichen würde, so ergibt sich also, daß jede Reihe aus 9 Einzelmessungen bestand. Jede derartige Versuchsreihe wurde aber doppelt ausgeführt und zwar wurde in der einen die konstante Strecke immer zuerst als Normalstrecke und die variable als Vergleichsstrecke geboten und in der anderen Reihe zuerst die variable als Normal- und die konstante als Vergleichsstrecke. Ein vollständiger Versuch, d. h. ein solcher, welcher unter vollkommen gleichen Bedingungen ausgeführt wurde, bestand wiederum aus 10 derartigen Doppelreihen (= 180 Urteile). Die Reihenfolge, in der die verschiedenen Beträge der variablen Strecke dargeboten wurden, wurde immer durch das Los bestimmt. Das Urteil bezog sich immer auf die zuzweit ausgeführte (Vergleichs-)Bewegung, einerlei, ob sie die konstante oder die variable war. Es war zu sagen, ob diese Strecke „gleich“, „größer“ oder „kleiner“ als die erste war.

Zur Einführung einiger spezieller Versuchsbedingungen waren folgende Änderungen des Apparates notwendig:

Als Widerstand diente in einem Versuch ein Gewicht von 1400 gr, welches nach links zog, d. h. also der Kontraktion der Streckmuskeln entgegenwirkte, und in einem anderen ein Gewicht von 3325 g nach rechts ziehend, also gegen die Vorderarmbeuger wirkend. Das Gewicht war an einer Schnur aufgehängt, welche über einer Rolle über den rechten bzw. linken Tischrand führte und am anderen Ende an einer 3 cm breiten Tuchmanschette befestigt war, welche über den Vorderarm bis eben oberhalb des Handgelenks übergezogen wurde. In einer Versuchsreihe war das Gewicht sowohl bei Normal-, wie bei Vergleichsbewegung angehängt, bei den Hauptversuchen aber nur bei der Vergleichsbewegung, während bei der Normalbewegung der Gehilfe das Gewicht derart hoch hielt, daß ich den Arm ungehindert hin- und herbewegen konnte.

Um feststellen zu können, wie sich die Schätzungspräzision bei verschiedenen Armlagen stellt, ließ ich das Brett um eine Achse drehbar machen, welche senkrecht durch den Ruhepunkt des Ellbogengelenks ging. Diese Drehung wurde zwischen Normal- und Vergleichsbewegung bewirkt. Bei der zweiten Bewegung also war der sonst konstante Ausgangspunkt um einen kleinen Betrag kreisbogenförmig nach links oder rechts verschoben. Es wurden nach links wie nach rechts 5 verschiedene Stellungen gegeben, in welchen die Stifte von ihrer 0-Stellung (jedes Paar parallel zur Frontalebene) um je 10 mm mehr entfernt wurden. Es waren also im ganzen 11 verschiedene Ausgangspunkte möglich.

Auch passive Bewegungen wurden auf ihre Schätzungspräzision untersucht. Hierzu wurde der Ellbogen auf ein Brettchen gelagert, welches um einen Zapfen durch den Gehilfen gedreht werden konnte und sich wie eine Armschiene bis in die Hand erstreckte. Über den vorderen Rand des Brettchens, in einem kleinen Ausschnitt, fiel der Zeigefinger nach unten, die übrigen Finger lagen auf der oberen Brettfläche. Der Arm wurde auf dem Brett mit einem Tuchband festgeschnallt. Um die Bewegungen dieses wie ein Radius Vector um sein Zapfenlager drehbaren Brettchens oder Hebels beiderseits im richtigen Momente aufzuhalten, waren Klötze auf dem Grundbrett angebracht, welche gerade dann hemmten, wenn die Fingerspitze die Stifte berührte.

Es wurden wiederum doppelte Versuchsreihen (konstante Strecke zuerst, variable zuzweit, und dann umgekehrt) unternommen. Für jede einzelne der 11 Doppelreihen¹ wurde die konstante Strecke in derselben Lage belassen, gleichgültig, ob sie zuerst oder zuzweit kam. Dasselbe relative Lageverhältnis der beiden Strecken kam also in einer doppelten Versuchsreihe nur einmal vor. Es konnte daher von einer Gewöhnung an bestimmte Lageverhältnisse und eine dadurch bedingte Beeinflussung des Urteils nicht die Rede sein.

III. Resultate.

Die Resultate meiner Messungen sind in der untenstehenden Tabelle niedergelegt. In der ersten und zweiten Kolumne sind die Versuche der Reihe nach angegeben und ihren Bedingungen nach charakterisiert. Der Ausdruck „einfache Bewegungen“ soll besagen, daß bei diesen Versuchen die natürlichen aktiven Bewegungen des Vorderarmes vorgenommen wurden, und zwar dies sowohl bei Durchlaufung der variierbaren, wie der konstanten Strecke. Mit diesen Versuchen als Norm sind die Resultate der anderen Versuche zu vergleichen, bei welchen kompliziertere physiologische Bedingungen eingeführt worden sind. In der dritten Kolumne sind die Prozentzahlen der richtigen Fälle angegeben, und zwar unter A für diejenigen Versuchsreihen, in denen die konstante Strecke zuerst und die variable zuzweit geboten wurde, unter B die Versuche, in welchen dies umgekehrt war, unter A + B endlich ist die Summe von A und B zu finden, welche die Gesamtprozentzahl der richtigen Fälle für jeden vollständigen Versuch angibt. Namentlich die Zahlen der letzten Rubrik zeigen sehr anschaulich, welchen Einfluß die Einführung oder Ausschaltung der verschiedenen oben näher bezeichneten physiologischen Bedingungen für die Schätzungspräzision haben. In den nächsten beiden Hauptkolumnen sind die Prozentzahlen der Über- und der Unterschätzungen unter den falschen Fällen angegeben. In der letzten Kolumne schließlic stehen die Gesamtzahlen aller Einzelurteile für jede vollständige Versuchsgruppe verzeichnet.

¹ Leider ist durch ein Versehen die Ausführung einer Versuchsgruppe unterblieben. Es ist dies indessen nur ein Mangel an Vollständigkeit, welcher für die Berechnung ohne Bedeutung ist.

Tabelle.

	Richtige Fälle			Falsche Fälle			Zahl der Urteile			
	Prozentzahl der richtigen Fälle			Prozentzahl der Überschätzungen ¹				Prozentzahl der Unterschätzungen ¹		
	A	B	A+B	A	B	A+B		A	B	A+B
I	36	36	72	39	41	80	10	10	20	180
Ia	38	39	77	17	22	39	37	24	61	180
II	35	35	70	24	26	50	26	24	50	180
III	38	41	79	10	13	23	46	31	77	180
IV	41	37	78	23	21	44	18	38	56	180
V	36	30	66	17	23	40	25	35	60	140
VI	34	37	71	21	21	42	33	25	58	180
VII	26	21	47	42	50	92	4	4	8	90
VIII	25	24	49	48	46	94	2	4	6	90
Prozentuale Durchschnittswerte										
	34	33	67	27	29	56	22	22	44	
Dasselbe, ungerechnet Reihe VII und VIII										
	37	36	73	22	24	46	28	26	54	

¹ Die Gesamtzahl der falschen Fälle ist hier gleich 100 gesetzt.

Wenn man die Kolumne zunächst ins Auge faßt, in welcher die richtigen Fälle angegeben sind, so ist sofort ersichtlich, daß in den Versuchsreihen I bis VI die Prozentzahl gut übereinstimmt. Man kann also behaupten, daß, wenigstens für mich als Versuchsperson, unter allen verschiedenen Versuchsbedingungen, worauf sich diese sechs Reihen beziehen, die Schätzungspräzision sehr nahe gleich blieb, daß sie also durch Widerstand, Veränderung der Armlage oder Einführung passiver Bewegungen nicht in nennenswerter Weise beeinträchtigt wird.

Nur Reihe V, in deren Versuchen gegen ein nach rechts ziehendes Gewicht anzuarbeiten war, und in welcher wir 66 % richtiger Fälle finden, scheint in der Tat eine Ausnahme zu bilden. In diesem Versuch wurde aber die veränderliche Strecke nur in einem Spielraum von 9,4 bis 10,6 cm variiert. Wenn man die gleiche Beschränkung für die Reihen I und Ia einführt, so ergibt sich als Prozentzahl der richtigen Fälle für Reihe I, 66 % und für Reihe Ia, 72 %, der Durchschnittswert beträgt also 69 %. Tatsächlich zulässig ist wohl nur der Vergleich mit Reihe I, denn ich hatte keine Übung im Beurteilen der Bewegungsgrößen, wenn gegen ein nach rechts ziehendes Gewicht anzuarbeiten war, Reihe Ia aber wurde nach Reihe I ausgeführt. Reihe V bildet also keine eigentliche Ausnahme, obgleich das Gewicht mehr als doppelt so schwer war, als bei Reihe III und IV.

Im Gegensatz zu den bisher erörterten speziellen Faktoren war die Geschwindigkeit der Bewegung von unverkennbarem und erheblichem Einfluß auf die Schätzungspräzision und dies liefs sich, obgleich ich mir des Fehlers wohl bewußt war, durch keine Übung beseitigen. Wurden Normal- und Vergleichsbewegung (Reihe VII und VIII) mit verschiedener Geschwindigkeit ausgeführt, so betrug die Zahl der richtigen Fälle kaum 50 %, während in den anderen Versuchsreihen 70 % richtiger Fälle durchschnittlich festgestellt wurden. Noch auffallender und bedeutungsvoller als die Zahl der richtigen Fälle ist das Verhältnis der Über- zu den Unterschätzungen bei den falschen Fällen. Man ersieht daraus, daß eine Überschätzung der zweiten Strecke, wenn diese schneller durchlaufen wurde als die erste, in 92 % aller falschen Urteile bei aktiven Bewegungen

sich einstellt und in 94 % bei passiven. Wenn die zweite Strecke tatsächlich kleiner war als der Normalabstand, so wurde sie unter den angegebenen Versuchsbedingungen fast ausnahmslos für ganz erheblich gröfser gehalten. Die verhältnismäfsig grofse Zahl von 50 % für die richtigen Fälle erklärt sich daraus, dafs ungefähr die Hälfte aller zuzweit auszuführenden Bewegungen tatsächlich gröfser als die zuerst dargebotenen waren. Aber wo ein Irrtum überhaupt möglich war, da wurde er auch begangen.

Als ich dieses Resultat gefunden hatte, schien es mir möglich, dafs die gute Schätzungspräzision bei den Widerstandsversuchen vielleicht seinen Grund darin habe, dafs die Bewegung des belasteten Armes langsamer abliefe, und dafs damit eine Unterschätzung dieser langsamen Bewegung entsprechend der Überschätzung bei schnellen verknüpft wäre. Auf diese Weise könnte, falls an und für sich durch den Widerstand eine Überschätzung bedingt sein sollte, diese durch die Verlangsamung der Bewegung kompensiert werden und die Zahl der richtigen Fälle sich günstiger stellen. Aus diesen Gründen führte ich nachträglich einige Kontrollversuche aus, und es wurde zuerst eine Reihe von 63 Versuchen ausgeführt, bei denen nach Feststellung mittels des Metronoms Normal- und Vergleichsbewegungen in natürlichem Rhythmus abliefen und in denen jede eine Dauer von $\frac{3}{4}$ Sekunden besafs. Dann wurde eine zweite Reihe unternommen, bei welcher die Normalbewegung $\frac{3}{4}$, die Vergleichsbewegung $1\frac{1}{2}$ Sekunde dauerten. Im ersten Fall betrug die falschen Fälle 28 %, im zweiten 27 %, im ersten waren aber 72 % aller falschen Fälle Unterschätzungen, im zweiten nur 53 %. Daraus ergibt sich, dafs eine Bewegung, welche nicht unerheblich langsamer als dem natürlichen Rhythmus entsprechend abläuft, wenigstens nicht die Tendenz hat, das Urteil im Sinne einer Unterschätzung zu beeinflussen.

Nach diesen Versuchen darf man vermuten, dafs die Geschwindigkeit der Bewegungen erst dann die Präzision der Schätzung wesentlich beeinflusst, wenn sie schneller ausgeführt werden als dem natürlichen Rhythmus entspricht.

Auch andere Forscher haben den Einfluss des Widerstandes, der Lage, und der Schnelligkeit, wenn auch unter ganz anderen Bedingungen, wie oben erwähnt, untersucht. KRAMER und

MOSKIEWICZ¹ und BLOCH² konnten mit Bezug auf die Lagewahrnehmungen einen Einfluss der Belastung des Armes nicht finden; bei diesen Versuchen wurden die zu beurteilenden Lagen durch Bewegungen der Extremität erst aufgesucht. FALK³ fand, dass auch die Raumschätzung des sich bewegenden Armes sich unabhängig von der seiner Belastung vollzog.

FALK³ und WOODWORTH⁴ fanden die Präzision der Raumschätzung auch durch Lageänderungen des Ausgangspunktes der Bewegung unbeeinflussbar. Die Arbeiten anderer Autoren, namentlich die von LOEB,⁵ deren Versuche unter erheblicher Änderung der Lage beider Arme ausgeführt wurden, und die von KRAMER und MOSKIEWICZ, bei welchen ein und derselbe Arm die Lage erheblich wechselte, sind unter anderem Gesichtspunkt zu beurteilen; denn wenn sich hierbei gewisse konstante Fehler ergaben, so beruht dies wohl sicher darauf, dass nicht nur Lageänderungen ins Spiel kamen, sondern auch ganz andersartige Wechsel in den Bewegungsbedingungen, nämlich Eintreten von Ermüdung, Unbequemlichkeit und neue mechanische Momente. Wenn man aber zeigen will, dass die Raumschätzung bei einer Bewegung präzise ausfällt, auch wenn Anfangs- und Endpunkte der zu vergleichenden Bewegungen verschieden sind, genügt es, die Verschiedenheit beider Strecken nur größer zu machen als der Unterschiedsschwelle für einfache Lageänderungen des Gliedes entspricht und festzustellen, ob dieses Plus an Differenz die Präzision beeinträchtigt. Meine Resultate zeigen nichts von einem solchen Einfluss.

FALK³ behauptet, dass ein Unterschied der Geschwindigkeit, in welcher Normal- und Vergleichsbewegung ausgeführt werden, ohne Einfluss auf die Präzision der Schätzung sei. DELABARRE⁶ und LOEB⁵ dagegen fanden, dass schnellere Bewegungen, welche „frei“ im obengenannten Sinne ausgeführt wurden, größer ausfielen, als langsame. Will man sich der Redeweise VIERORDTS⁷ bedienen, so wäre zu sagen, dass wir dieselbe Distanz

¹ l. c. S. 104.

² l. c.

³ l. c. S. 45, 49–50.

⁴ l. c.

⁵ l. c. (Bd. XLVI, 1890). S. 1–46.

⁶ l. c.

⁷ CAMERER, VON VIERORDT zitiert: Der Zeitsinn. 1868. S. 48

mit zunehmender Geschwindigkeit der messenden Bewegung für kleiner halten.

Mit allen diesen Angaben über den Einfluss der Schnelligkeit stehen meine Resultate in entschiedenem Widerspruch, da bei mir schnellere Bewegungen keineswegs unterschätzt, sondern erheblich überschätzt wurden, und ich muß annehmen, daß die widersprechenden Ergebnisse früherer Forscher auf die Einführung der freien Bewegungen in die Versuchsmethodik zurückzuführen sind, und ich glaube, daß der erwähnte konstante Fehler in den Versuchen von DELABARRE, LOEB, KRAMER und MOSKIEWICZ wohl darauf zurückzuführen ist, daß die größere Triebkraft des schneller bewegten Gliedes bei der Bildung des Urteils nicht mit in die Berechnung eingeht, wie schon oben auseinandergesetzt.

Was nun die konstanten Fehler meiner Versuche betrifft, so läßt sich, abgesehen von denen mit schnellerer Vergleichsbewegung, keine Regel daraus ableiten über eine Über- oder Unterschätzung der Vergleichsbewegung. Zwar könnte man aus den Reihen III, IV und V entnehmen, daß das Vorhandensein eines Widerstandes eine Unterschätzungstendenz mit sich bringt.¹ Es wäre indessen nicht berechtigt, hierin einen wesentlichen Grund erblicken zu wollen, denn auch bei anderen Versuchen (Reihe Ia, VI), wo kein Widerstand vorhanden war, findet man ebenfalls Unterschätzungen. Die hierin zum Ausdruck kommende Unregelmäßigkeit des Verhaltens erscheint noch größer, wenn man auch die Über- bzw. Unterschätzungstendenz in den A-Reihen, in welchen die Vergleichsbewegung in der variablen Strecke ablief, und in den B-Reihen, in welcher das umgekehrte Verhältnis zu recht bestand, miteinander vergleicht. Indessen hat es keinen Zweck diesen, wie es vorläufig scheint, regellosen Zahlenverhältnissen zu sehr nachzugehen.

¹ Bemerkenswert ist, in bezug auf die größere Zahl der Unterschätzungen bei belastetem Arm, daß nach den Ansichten anderer hier eine Überschätzungstendenz zu erwarten wäre. Man erinnere sich nur an eine Äußerung DELABARRES, derzufolge die überhaupt vorhandene Quantität des Reizes für das Urteil bestimmend sein soll, und an den Versuch von MARTIN und MÜLLER, (Zur Analyse der Unterschiedsempfindlichkeit: Leipzig, 1899. S. 117.) eine wirklich vorhandene Tendenz zur Überschätzung eines zuweit gehobenen Gewichts auf Ermüdung zurückzuführen. Reihe III meiner Tabelle zeigt aber nichts von einem solchen Einfluss, obgleich das Gewicht auch bei der ersten Bewegung wirksam war.

Bestimmt aber kann behauptet werden, daß ein konstanter Zeitfehler im FECHNERSchen Sinne sich bei einfachen Bewegungen in normalem Rhythmus (Reihe I und Ia) für mich nicht nachweisen liefs, denn in beiden Reihen, die unter gleichen Bedingungen ausgeführt wurden, sind die Fehler von entgegengesetzter Art. Der positive Zeitfehler, d. h. ein solcher, bei welchem die zweite reproduzierte Strecke gröfser ausfällt als der Normalabstand und wie ihn z. B. FALK und FULLERTON und CATTELL bei kurzen Strecken konstatierten, kommt meiner Ansicht nach wieder auf Rechnung der fehlerhaften freien Bewegungen, namentlich auf den unberechenbaren Einfluß, welchen die über das Ziel drängende Triebkraft des Armes ausübt. Der negative Fehler andererseits, welchen KRAMER und MOSKIEWICZ fanden, ist wohl darauf zurückzuführen, daß, wie bei ähnlichen Versuchen LOEB schon behauptet hat, beide Bewegungen in weit verschiedenen Lagen des Armes ausgeführt wurden.

IV. Theoretisches.

Ich möchte jetzt zu der einzelnen Beobachtung zurückkehren, bei welcher sich eine Beeinträchtigung der Schätzungspräzision durch geänderte Versuchsbedingungen sicher konstatieren liefs. Das geschah, wie erinnerlich sein wird, wenn die Vergleichsbewegung schneller ausgeführt wurde als die Normalbewegung und war ebensowohl bei aktiven wie bei passiven Bewegungen der Fall und äußerte sich in einer fast ausnahmslosen Überschätzung der schneller ausgeführten Bewegung.

Hier ist zu beachten, daß bei Ausführung aktiver schnellerer Bewegungen eine energische Kontraktion beider antagonistischen Muskelgruppen eintreten mußte, die ganze Armmuskulatur wurde tatsächlich in so hochgradige Spannung versetzt, daß mir das feinere Unterscheidungsvermögen, soweit es seinen Sitz in den Muskeln und Sehnen hat, ganz erheblich reduziert zu sein schien. Entweder die gesteigerte Gegeneinanderwirkung der Antagonisten oder die störende Spannung der Gesamtmuskulatur oder beides zusammen könnte nun den Grund für die starken Überschätzungstäuschungen bei schnellen Bewegungen abgeben. Aus einer vergleichenden Betrachtung von Reihe II (passive Bewegungen), I und Ia (aktive) und IV und V (Bewegungen gegen Gewichte von verschiedener Gröfse und Richtungswirkung), bei denen die Antagonisten in immer zunehmender Stärke tätig wurden, geht

hervor, daß eine solche gesteigerte Gegeneinanderwirkung, mit der dadurch bedingten größeren Spannung der Gesamtmuskulatur, an sich keine Überschätzungstendenz mit sich bringt. Noch überzeugender führt der Vergleich zwischen den schnelleren passiven und schnelleren aktiven Bewegungen zu demselben Ergebnis; denn bei möglichster Erschlaffung der Muskulatur waren die Überschätzungen ebenso häufig und subjektiv auffallend als bei kräftiger Tätigkeit der antagonistischen Muskelgruppen (92 % bei aktiven und 94 % bei passiven Bewegungen).

Wenn wir uns nun fragen, welche Faktoren bei den schnelleren Bewegungen für die Überschätzung bestimmend sein können, so kommt erstens die größere Geschwindigkeit selbst in Betracht und zweitens die am Ende der Bewegung größere lebendige Kraft des Armes, welche beim Anhalten der Bewegung überwunden werden muß.

Die gesteigerte Geschwindigkeit des Armes bei Vergleichsbewegungen könnte dadurch wirksam sein, daß auch die beiden Gelenkflächen mit größerer Geschwindigkeit aneinander vorübergleiten, und daß die Faltenbildung in den Gelenkkapseln sich schneller vollzieht. Dabei müssen an den Gelenkflächen pro Zeiteinheit mehr sensible Endorgane in Erregung versetzt werden als bei langsameren Bewegungen. Die Endorgane der Gelenkkapseln würden bei der Faltenbildung einer schnelleren Deformation unterliegen; für diese Endorgane wäre also das Reizgefälle steiler als bei langsamen Bewegungen. Diese Differenzen in den zeitlichen Verhältnissen der physiologischen Erregung könnten die Ursache für die Überschätzung bilden.

Was die größere lebendige Kraft anbelangt, welche der Arm am Ende schnellerer Bewegung besitzt, so wäre wohl daran zu denken, daß beim Anhalten der Bewegung durch eine Art Stoßwirkung eine plötzliche Zunahme der gegenseitigen Drucke der Gelenkflächen sich ausbildet. Dabei könnte durch eine Art Irradiation eine Reizung nicht direkt erregter sensibler Endorgane bedingt sein, und zwar kämen hierfür gerade die Endorgane in Frage, welche direkt gereizt worden wären, wenn die Bewegung noch direkt weiter gegangen wäre. Dadurch würde zentral der Eindruck entstehen müssen, daß die Bewegung faktisch weiter gegangen sei und es resultiert eine Überschätzung der durchlaufenen Strecke.

Der letztere dieser beiden Erklärungsversuche ist logisch der

vollkommenere, da es leicht ersichtlich ist, wie die genannte Irradiation, wenn sie als vorhanden angenommen werden darf, eine Überschätzung verursachen könnte. Dafs aber die gröfsere Geschwindigkeit an und für sich die Überschätzung bewirken kann, ist nicht ohne weiteres einleuchtend, da wir vorläufig keinen genügenden Grund besitzen anzunehmen, dafs im allgemeinen ein zeitlich schnelleres Aufeinanderfolgen von Reizen derartige Überschätzungen herbeiführt.

Man würde zunächst aus den angeführten Hypothesen folgern, dafs bei Verlangsamung der Bewegung eine Tendenz zur Unterschätzung vorhanden sein müfste. Wenn nun meine oben angeführten Kontrollversuche (s. S. 438) mit langsameren Bewegungen eine solche nicht ergeben haben, so könnte man darin einen Widerspruch gegen die oben angeführte Hypothese erblicken; indessen mit Unrecht, denn man mufs verlangen, dafs der Geschwindigkeitsunterschied einen gewissen Betrag, der die Schwelle bildet, übersteigt und die Resultate meiner Kontrollversuche besagen nur, dafs diese Schwelle nicht passiert wurde. Auch kann man nicht von vornherein annehmen, dafs ein Geschwindigkeitsunterschied den umgekehrten Erfolg haben mufs, wenn die schnellere Bewegung zuerst ausgeführt wird, denn hierbei ist eine Umstimmung der sensiblen Endorgane durch den voraufgehenden stärkeren Reiz nach Analogie anderer Sinnesgebiete sehr wohl möglich.

Aber auch gegen die Annahme, dafs die Zunahme der Triebkraft bzw. der schnellere Ablauf der Reize in den Gelenkflächen das ausschliesslich wirksame Moment abgebe, läfst sich z. B. einwenden, dafs diese Annahme ebensogut zuträfe, wenn man den Ort der Auslösung für die Raumschätzung und für die Bewegungsempfindungen überhaupt nicht in den Gelenken, sondern in den Muskeln und Sehnen sucht. Ganz abgesehen aber von der schon erwähnten Tatsache, dafs sich eine Überschätzung schneller ausgeführter Bewegungen ebensowohl bei passiven als bei aktiven Bewegungen herausstellte, kann man hier antworten, dafs man seit den Untersuchungen GOLDSCHIEDERS¹ immer mehr zu der Anschauung gekommen ist, dafs die Bewegungs- und kinästhetischen Empfindungen von den Gelenken ausgelöst

¹ GOLDSCHIEDER: Gesammelte Abhandlungen. Leipzig, 1898. Bd. II S. 97—202.

werden. Ich erinnere hier zunächst an die Versuche GOLDSCHIEDERS selbst, bei denen durch Anästhetisierung des Gelenkes vermittels faradischer Ströme eine erhebliche Beeinträchtigung der Bewegungssensibilität erzielt wurde. Diese kam dagegen kaum zum Vorschein, wenn nur die das Gelenk bedeckenden Teile durch Faradisierung geschädigt wurden. Auch schlossen sich hier die Versuche GOLDSCHIEDERS an, in welchen eine Isolierung der Gelenkfunktionen auf indirektem Wege erstrebt wurde. Es wurden die Bewegungsschwellen für verschiedene Glieder aufgesucht, wenn diese sich in ungewöhnlicher Lage befanden, die Muskeln und Sehnen also in verschiedene Spannungszustände gesetzt wurden. GOLDSCHIEDER fand auch hierbei keine Herabsetzung der Bewegungsempfindlichkeit und glaubte dadurch eine Bestätigung seiner obigen direkt gewonnenen Resultate sehen zu müssen.

Ganz neuerdings hat NAGEL,¹ wenn er auch nicht mit GOLDSCHIEDER in allen Punkten übereinstimmt, doch die Meinung ausgesprochen, daß für die Vermittlung der Bewegungsempfindung die Gelenksensationen bei weitem die wichtigsten sind.

An die auf indirektem Wege erzielten Ergebnisse GOLDSCHIEDERS reihen sich sowohl die oben zitierten Untersuchungen von BLOCH, KRAMER und MOSKIEWICZ und FALK, welche sämtlich die Belanglosigkeit des Widerstandes für die Bewegungssensibilität feststellten, als auch die von mir hier angeführten Versuche an, bei denen ich fast vollkommen gleiche Präzision der Schätzung fand bei passiven, bei normal aktiven, und bei schwer durch Widerstände behinderten aktiven Bewegungen. Auch die verschiedenen Spannungs- bzw. Koordinationszustände, welche die Änderung der Armlage mit sich bringt, waren innerhalb gewisser Grenzen für die Schätzungspräzision ohne Belang.

Daß die Veränderung der Muskelzustände ohne erhebliche Bedeutung ist, ergibt sich auch aus der Tatsache, daß zwischen passiven und aktiven Bewegungen größerer Geschwindigkeit kein Unterschied in dem Sinne gefunden wurde, daß die Prozentzahl der Überschätzungen bei beiden Arten von Bewegungen verschieden ausgefallen wäre. Diese waren vielmehr gleich, obwohl im einen Falle alle Muskeln erschlafft waren, im anderen aber

¹ l. c. S. 761.

alle Streck- und Beugemuskeln sich in heftiger Erregung befanden.

Wenn man dann den eingebetteten Endorganen der Muskeln überhaupt die Vermittlung der Bewegungswahrnehmung zuschreiben will, so müßte man ihnen ganz eigenartige Eigenschaften im Vergleich zu den übrigen Sinnesorganen insofern beimessen, als lokale Änderungen in den Nachbargeweben keinen Einfluss auf sie ausüben. Jedenfalls dürften Druck und Formveränderungen in der Umgebung nur sehr bedingt als adäquate Reize in Frage kommen.

Es ist wohl anzunehmen, daß die Zustände in den Gelenkflächen und -bändern sich nicht in dem Maße ändern wie in den weichen Gebilden der Umgebung. Jedenfalls dürfte zwischen den einzelnen Gelenkteilen bei weitem nicht wie bei den Muskeln und Sehnen eine derartige Änderung des Gesamtzustandes erzeugt werden, wenn sich die Widerstände, die Lage des Gliedes und das Beteiligungsverhältnis von Streck- und Beugemuskeln in ausgiebigstem Maße bei den einzelnen Bewegungen ändert. Bei den Gelenken dürfte der maßgebende Faktor mit Bezug auf die Änderung des Eigenzustandes wohl in der Richtung und in der Größe der ausgeführten Bewegung zu suchen sein, bei den Muskeln aber kommen alle möglichen Form- und Spannungsänderungen in Betracht. Richtung und Exkursion einer Bewegung als Konstante für die Gelenksensibilität bleiben aber vollkommen ungeändert, wenn Armlage, Muskelspannung usw. sich beliebig ändern; oder, wenn man so sagen darf, es bleibt das Verhältnis der auszuführenden Bewegung zu ihrer Projektion ins Gelenk unbeeinflusst, und tatsächlich blieb auch in meinen Versuchen die Präzision der Bewegungsschätzung gleich. Diese Versuche bilden also ein nicht unwichtiges Beweismaterial für die Auffassung, daß die Gelenksensibilität das Maßgebende für die Raumschätzung ist. Zu derselben Auffassung führen die oben erwähnten Versuche anderer Autoren. Auch die Hypothese, durch welche ich die Tendenz zur Überschätzung schnellerer Bewegungen zu erklären suchte, bildet keine Ausnahme, sondern ordnet sich den Annahmen über den Sitz der Bewegungsempfindlichkeit vollkommen ein.

Natürlich kann der Betrag der Gelenkexkursionen nur dann als bestimmend für das Urteil beim Vergleich von Bewegungen angesehen werden, wenn die Bewegungen immer im

gleichen Gelenk, in demselben Betrage und zwischen denselben Teilen der Gelenkflächen ablaufen. Unter anderen Umständen trifft dies nicht zu, wie MÜNSTERBERG z. B. in folgendem Versuch gezeigt hat: Wenn man mit ausgestrecktem Arm eine bestimmte Strecke durch Bewegungen im Schultergelenk durchmisst und diese Strecke zu reproduzieren sucht, wenn der Arm im Ellbogengelenk um einen bestimmten Betrag gekrümmt ist, so stehen die Ergebnisse nicht in gleicher Beziehung zu der Winkelgröße der Gelenkdrehung. Gerade im Hinblick auf solche Versuche scheint mir die Bedeutung vieler früherer Angaben, soweit die physiologischen Bedingungen der Experimente kompliziert lagen, von sehr problematischem Wert. Wenn sich ganz andere Gelenke, andere Gliedmaßen, und diese noch dazu in weit verschiedenen Lagen, an den zu vergleichenden Bewegungen beteiligen, so ist die experimentelle Sachlage überhaupt nicht mehr zu übersehen und mit Bezug auf die Ergebnisse kann man alles mögliche vermuten.

Wenn ich also jetzt die Ergebnisse meiner Versuche und ihre theoretische Bedeutung noch einmal zusammenfassend vorführe, so möchte ich zuerst ganz kurz die Bedingungen rekapitulieren, unter denen die Versuche stattfanden. Es handelte sich um bogenförmige Bewegungen des gebeugten Unterarmes unter möglichst ausschließlicher Benutzung des Ellenbogengelenkes. Die Bewegungen betrafen annähernd immer dieselben Flächenanteile der Gelenkflächen, hatten dieselbe Richtung, und wurden innerhalb objektiv festgelegter Grenzen ausgeführt. Wurden diese Bedingungen innegehalten, so ergab sich, daß die Präzision der Raumschätzung des Vorderarmes sich von der Lage (innerhalb gewisser Grenzen) und von den Widerständen bzw. der Muskelspannung, welche von voller Passivität bis zu schwerer Belastung der Streck- oder Beugemuskeln variieren konnte, als unabhängig herausgestellt hat, dagegen hat sich gezeigt, daß eine Steigerung der Bewegungsgeschwindigkeit eine erhebliche Überschätzung der durchlaufenen Strecke ausnahmslos mit sich brachte, einerlei ob die schnelleren Bewegungen aktiv oder passiv ausgeführt wurden.

Die Bedeutung dieser Tatsachen kann man darin sehen, erstens daß die Lagewahrnehmung für die

Raumschätzung einer Bewegungsgröße höchstens eine sehr eingeschränkte Rolle spielt, zweitens daß mit Rücksicht auf den fehlenden Einfluß verschiedener Muskelspannung der Hauptsitz für die Auslösung der Bewegungsempfindung in den Gelenken zu suchen ist, drittens, daß die Überschätzung schnellerer Bewegung auf eine von der gesteigerten Triebkraft des Gliedes abhängende Irradiation der Erregung innerhalb der Gelenkflächen, bzw. auf ein schnelleres Aufeinanderfolgen der Reize im Gelenk zurückzuführen ist.

Bedauerlich ist, daß die Versuche nur an einer Versuchsperson ausgeführt werden konnten, aber ich glaube, der Wert der Ergebnisse wird dadurch gehoben, daß die Untersuchung eben deshalb um so gründlicher und nach verschiedenen Richtungen einigermaßen vollständig durchgeführt werden konnte.

Zum Schluß möchte ich Herrn Prof. NAGEL und Herrn Dr. PIPER meinen aufrichtigsten Dank aussprechen, dem ersteren sowohl für den Vorschlag, diese Untersuchung zu unternehmen, wie für manchen anregenden Rat bei der Ausführung derselben, und dem letzteren für die mühsame Arbeit, meine deutsche Ausdrucksweise zu korrigieren und zu präzisieren.

(Eingegangen am 20. Mai 1905.)
