

Zur bilateralen sensorischen Konvergenz beim Menschen: Die Wahrnehmung der Gleichzeitigkeit von rechts- und linksseitigen somatosensiblen und visuellen Reizen bei Gesunden und bei Kranken mit Großhirnläsionen

BASTIAN CONRAD

Abteilung für Neurologie der Universität Ulm (Prof. H. KORNHUBER) und
Neurologische Klinik mit Abteilung für Neurophysiologie der Universität Freiburg
(Prof. R. JUNG)

Eingegangen am 7. Juli 1968

Bilateral Sensory Convergence in Man:

The Perception of Simultaneity of Right- and Left-Sided Somato-Sensory and Visual Stimuli in Normals and Patients with Hemispheric Lesions

Summary. With electrical stimuli of the skin on the right and left index finger tips in 38 healthy right-handed subjects, the minimum interval (= limit) for perception of nonsimultaneity was about 10 msec, regardless of which hand was stimulated first. The smallest standard deviation of this nonsimultaneity limit was found in subjects with the best symmetry of the right and left limits.

Similar results were found for perception of simultaneity with visual stimuli in the right visual field of the right eye and left visual field of the left eye.

Bilateral asymmetrical stimulation of the skin (index finger versus contralateral index toe or upper arm versus contralateral lower arm) showed a clear shift of the right and left limits of subjective simultaneity with respect to the objective point of simultaneity i.e. the distal point had to be stimulated earlier than the proximal point to perceive simultaneity. This can be used as a subjective method for measuring sensory nerve conduction velocity.

Electrical stimuli of the skin on the index and middle finger tips of the same hand showed a significantly narrower range of subjective simultaneity (minimum interval for nonsimultaneity 6 msec) than bilateral stimuli. There is no difference between experiments on the right and left hand.

In patients with somesthetic defects due to central or peripheral lesions the range of subjective simultaneity for bilateral somatosensory stimuli was widened. However, there is no shift of the right and left limits of simultaneity when the strength of stimuli is adjusted to be subjectively equal on both sides.

It is concluded that for exact perception of simultaneity of bilaterally applied stimuli a pathway via the cerebral hemisphere and the corpus callosum is necessary. However, there is no cerebral dominance for perception of simultaneity.

Key-Words: Bilateral Sensory Convergence — Simultaneity Perception — Cerebral Hemispheres — Man — Hemispheric Lesions.

Zusammenfassung. Mit elektrischen Hautreizen gleicher Empfindungsstärke an beiden Zeigefingern wurde bei 38 gesunden Rechtshändern im absteigenden Grenzverfahren das Grenzwertintervall für Wahrnehmung von Ungleichzeitigkeit bei 10 msec

Durchschnitt) gefunden, unabhängig davon, welche Hand zuerst gereizt wurde. Die kleinste Standardabweichung des Grenzwertintervalls für Ungleichzeitigkeit fand sich bei Versuchspersonen mit der besten Symmetrie der rechten und linken Grenze. Ähnliches fand sich für Gleichzeitigkeitswahrnehmung von visuellen Reizen im rechten Gesichtsfeld des rechten Auges und linken Gesichtsfeld des linken Auges.

Bilateral asymmetrische Hautreize (Zeigefinger/kontralateraler Großzeh, Oberarm/kontralateraler Unterarm) zeigten dagegen eine deutliche Verschiebung der rechten und linken Grenzwertintervalle für Ungleichzeitigkeit gegen den objektiven Simultanpunkt. Daraus ergibt sich eine subjektive Methode zur Messung der sensiblen Nervenleitgeschwindigkeit.

Bei elektrischen Hautreizen am Zeige- und Mittelfinger derselben Hand ist der subjektive Gleichzeitigkeitsbereich signifikant enger (Grenzwertintervall im Durchschnitt 6 msec) als bei bilateralen Reizen. Rechte und linke Hand geben gleich gute Resultate.

Bei cerebralen wie bei peripheren Sensibilitätsstörungen ist der subjektive Gleichzeitigkeitsbereich für bilaterale somatosensible Reize verbreitert. Hingegen besteht keine Verschiebung der rechten und linken Grenze des Gleichzeitigkeitsbereichs, wenn die Reizstärke an beiden Händen subjektiv gleich ist.

Es wird geschlossen, daß für genaue Gleichzeitigkeitswahrnehmung bilateraler Reize eine Leitung über die Großhirnhemisphäre und den Balken erforderlich ist. Dagegen findet sich kein Anhalt für eine Hemisphärendominanz in der Gleichzeitigkeitswahrnehmung.

Schlüsselwörter: Bilaterale Sinneskonvergenz der Großhirnhemisphären — Gleichzeitigkeitswahrnehmung, sensibel und visuell — Großhirnläsionen — Mensch.

Konvergenz verschiedener Sinnesafferenzen wurde zunächst an den Neuronen der *Formatio reticularis* des Hirnstammes festgestellt. Diese Sinneskonvergenz dient wahrscheinlich der Regelung von Bewegungen und der Regulation von Wachheit und Aufmerksamkeit, hat aber offenbar wenig mit der Wahrnehmung zu tun. Erst die Feststellung multisensorischer Konvergenz an der Großhirnrinde (BUSER u. IMBERT, 1961 [2]; KORNHUBER u. Mitarb., 1961/63 [9,11,12]) bei Katzen warf die Frage auf, ob nicht eine solche multisensorische Konvergenz u. a. für die zeitliche Koordination von Sinnesmeldungen bedeutsam sein könnte (KORNHUBER, 1965 [10]). Sinneseindrücke, die in das Gehirn gelangen, kommen uns in einer zeitlichen Ordnung zum Bewußtsein. Jeder kennt solche Phänomene aus der täglichen Erfahrung der Wahrnehmung. Ob wir akustische Signale hören, ob wir Objekte sich bewegen sehen oder ob wir Tastempfindungen verspüren, immer ist uns die *zeitliche Beziehung der Sinneseindrücke* zueinander bewußt.

Das Bewußtsein von *Simultaneität* oder *Sukzession* zweier sensorischer Reize hat eine Konvergenz von Sinnesmeldungen zur Voraussetzung. Es fragt sich, wo und wie diese vor sich geht und ob es (z.B. bei Ausfall bestimmter Hirngebiete) zu einer Störung der zeitlichen Einordnung kommen kann.

Insbesondere EFRON [5] hat sich über die Lokalisation dieser Konvergenz Gedanken gemacht. Er stellte fest, daß rechtshändige Vpn. zwei am

Körper symmetrisch gesetzte Reize dann als gleichzeitig empfanden, wenn der linke Reiz dem rechten um durchschnittlich 3,2 msec vorausging. Seine Hypothese: der linke Reiz muß bei Rechtshändern, um mit dem rechten Reiz verglichen zu werden, zur dominanten linken Hirnhälfte kreuzen, bei Linkshändern umgekehrt (Abb. 1).

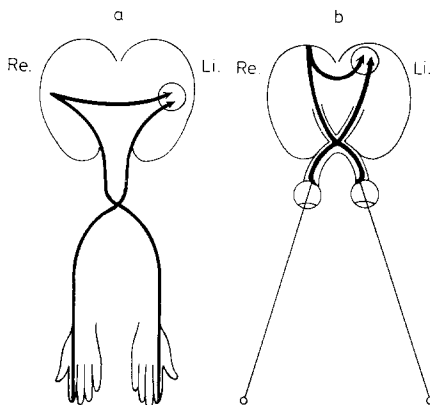


Abb. 1 a und b. *Efrons Hypothese für Gleichzeitigkeitswahrnehmung*: Die Konvergenz zweier am Körper symmetrisch gesetzter (a) taktiler und (b) visueller Reize findet in der dominanten Hemisphäre statt

Da bisher Störungen der subjektiven zeitlichen Zuordnung verschiedener sensorischer Ereignisse bei Hirnverletzten nicht bekannt sind, war es Ziel dieser Arbeit, die Wahrnehmung der Gleichzeitigkeit von rechts- und linksseitigen taktilen und visuellen Reizen bei einseitig Großhirnverletzten zu untersuchen. Dazu wurden Kontrollversuche an Normalpersonen angestellt. Diese führten überraschenderweise zur Widerlegung der Annahmen von EFRON. Eine vorläufige Mitteilung unserer Ergebnisse erfolgte 1967 [4].

Methodik und Untersuchungsgut

Als Sinnesreize wurden elektrische Hautreize und Lichtblitze von 1 msec Dauer gewählt. Die Hautreize wurden als Rechteckreize am re. und li. Zeigefinger dargeboten. Hierzu wurden jeweils zwei runde Silber-Silberchlorid-Klebeelektroden von 8 mm \varnothing in einem Abstand von 1 cm von Rand zu Rand der Elektroden an der palmaren Seite des Endgliedes der Zeigefinger angeklebt. In Kontrollversuchen wurden Reize 1. am Zeigefinger und Mittelfinger derselben Hand, 2. an der Innenseite des Handgelenks und am kontralateralen Oberarm (Unterrand des Deltamuskels) sowie 3. an der Dorsalseite des großen Zehes und dem Mittelfingerendglied der kontralateralen Hand gegeben.

Dabei wurde versucht, die Reizspannung auf den doppelten Schwellenwert einzustellen. Dies gelang nicht in allen Fällen, da die Schmerzschwelle dann manchmal schon überschritten war. Großer Wert wurde darauf gelegt, die beiden zu vergleichenden Reize von der Vp. nach Intensität und Qualität genauestens abzugleichen.

Die Lichtreize waren klickfreie Elektronenlichtblitze von 1 msec Dauer. Beide Lichter blitzten aus einer runden Öffnung (8 mm \varnothing), die mit Milchglas verdeckt war. Die beiden Lichtöffnungen lagen 22 cm auseinander. Der Kopf wurde auf einem Stativ fixiert. Die Augen hatten von einer durch die beiden Lichtöffnungen gedachten Linie einen Abstand von 23 cm. Der Blick war geradeaus gerichtet. Die beiden Lichtquellen waren durch eine Wand derart voneinander getrennt, daß jedes Auge nur die ihm zugehörige Lichtquelle sah. Die Lichtreize wurden also jedem Auge im temporalen Gesichtsfeld in 26° Abstand vom Fixierpunkt geboten (Abb.1b). Das Zeitintervall zwischen den elektrischen Schocks oder den Lichtblitzen wurde mit einem Tönnies-Reizgerät kontrolliert. Der re. Reiz wurde dem li. zunächst um 100 msec vorausgeschickt. Das Zeitintervall wurde schrittweise um anfangs 10 msec (bis zu einem Intervall von 30 msec), dann um 5 msec verkleinert, bis die Vp. ihren Simultanpunkt erreicht hatte. Dieser Vorgang wurde je zehnmal abwechselnd von re. und li. wiederholt.

Die Empfindung, daß re. und li. Reiz gleichzeitig sind, beginnt schon vor der tatsächlichen Gleichzeitigkeit. Der zeitliche Bereich, innerhalb dessen bei Annäherung von größeren Intervallen her beide Reize als gleichzeitig empfunden werden, wird *Gleichzeitigkeitsbereich* genannt. Der Mittelpunkt des Gleichzeitigkeitsbereiches wird wie folgt bestimmt: das Zeitintervall R gibt die Zeit an, die den subjektiven Simultanpunkt noch vom objektiven bei Vorausgehen des re. Reizes trennt. R wird als negative Zahl in msec angegeben. Das Zeitintervall L gibt die Zeit an, die den subjektiven Simultanpunkt noch vom objektiven bei Vorgabe des li. Reizes trennt. L wird als positive Zahl in msec angegeben. $\frac{L+R}{2}$ ist der *Mittelpunkt des Gleichzeitigkeitsbereiches*, bestimmt aus zwei Serien von 10 re.- und 10 li.-seitigen Versuchen. Die Größe des Mittelwertes gibt an, wie weit der Mittelpunkt des Gleichzeitigkeitsbereiches vom objektiven Simultanpunkt abweicht. Ist $\frac{L+R}{2}$ positiv, so bedeutet das, daß die Vp. die Grenze ihres Gleichzeitigkeitsbereiches bei Vorausgehen des li. Reizes im Durchschnitt eher erreicht als bei Vorgabe des re. Reizes und umgekehrt.

Die Vp. durfte bei dieser schrittweisen Annäherung jedes Zeitintervall, das pro Sekunde einmal dargeboten wurde, beliebig oft auf seine Simultaneität prüfen, bevor das nächstkleinere Zeitintervall angeboten wurde. Allen Versuchen ging eine Übung voraus.

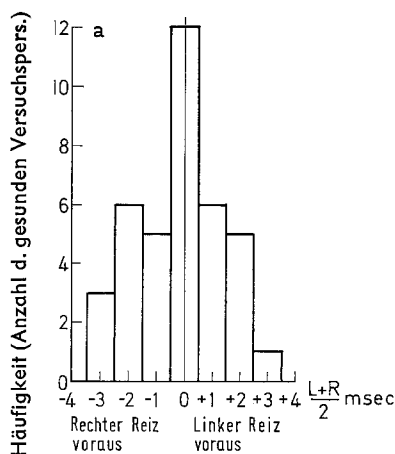
Es wurden 43 gesunde Personen untersucht. Alle Vpn. waren Rechtshänder nach den Kriterien von HECEAN und HUMPHREY [7,8] (zur Problematik der Händigkeit s. Diskussion). Von den 43 Vpn. lagen 1 mit dem Mittelpunkt und 4 mit den Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches so weit außerhalb des übrigen Kollektives, daß sie nach dreimaliger Anwendung von Chauvenets Kriterium ausgeschlossen wurden. In die endgültige statistische Auswertung wurden also 38 Vpn. einbezogen. Die schlechten Ergebnisse der 5 ausgeschlossenen Vpn. sind durch Unaufmerksamkeit oder mangelnde Konzentration zu erklären.

Ergebnisse

A. Gesunde

1. Bei Wahrnehmung der Gleichzeitigkeit elektrischer somatosensibler Reize am rechten und linken Zeigefinger im absteigenden Grenzverfahren mit Annäherung von außen an den Gleichzeitigkeitsbereich bei 38 gesunden Vpn. streuten die Mittelpunkte des subjektiven Gleich-

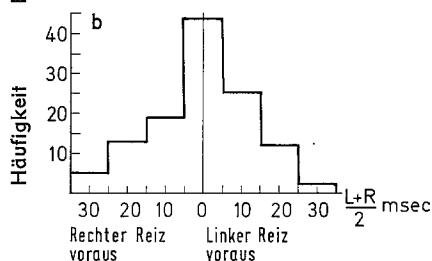
zeitigkeitsbereiches normalverteilt um Null, der Mittelwert aller erhaltenen Mittelpunkte lag bei 0,31 msec (Abb. 2a). Diese Abweichung vom objektiven Simultanpunkt ist hochgradig insignifikant ($p = 0,78$). Die Mitte des subjektiven Gleichzeitigkeitsbereiches ist also identisch mit dem objektiven Simultanpunkt beider Reize.



38 Vpn.

Mittelwerte aus 20 Messungen

$\bar{x} = 0,31$ msec re. voraus
(insignifikant)



6 Vpn. je 20 Messungen

$\bar{x} = 0,54$ msec li. voraus
(insignifikant)

Abb. 2a und b. *Abweichungen der subjektiven Gleichzeitigkeit vom objektiven Simultanpunkt bei somatosensiblen (a) und visuellen (b) Reizen.* a Häufigkeitsverteilung der Mittelpunktsabweichungen des subjektiven Gleichzeitigkeitsbereiches vom objektiven Simultanpunkt $\left(\frac{L+R}{2}\right)$ für somatosensible Reize am re. und li. Zeigefinger

bei 38 gesunden Vpn. im absteigenden Grenzverfahren in Klassen der Breite 1 msec zusammengefaßt. Für jede Vp. ist der Mittelwert aus 20 Messungen eingesetzt (10 mit li. und 10 mit re. vorausgehendem Reiz). Links von Null (—) Gleichzeitigkeitsempfindung bei re., rechts von Null (+) bei li. vorausgehendem Reiz. b Häufigkeitsverteilung von 120 Mittelpunkten des im absteigenden Grenzverfahren gemessenen subjektiven Gleichzeitigkeitsbereiches bei visuellen Reizen im re. und li. Sehfeld von 6 gesunden Vpn. Die Darstellung entspricht Abb. 2a (für somatosensible Reize), jedoch mit dem Unterschied, daß dort die Durchschnitte aus 20 Messungen eingetragen wurden, hier die Einzelmeßwerte selbst

Auch die Gleichzeitigkeitswahrnehmung von visuellen Reizen im temporalen Gesichtsfeld beider Augen zeigt eine symmetrische Anordnung

der Mittelpunkte des subjektiven Gleichzeitigkeitsbereiches um den objektiven Simultanpunkt (Abb. 2b). Der Mittelpunkt des visuellen Gleichzeitigkeitsbereiches weicht mit 0,54 msec ebenfalls nicht signifikant ($p = 0,90$) vom objektiven Simultanpunkt ab. Bei visuellen Reizen ist der subjektive Gleichzeitigkeitsbereich breiter als bei elektrischen Hautreizen, und die Standardabweichungen sind größer.

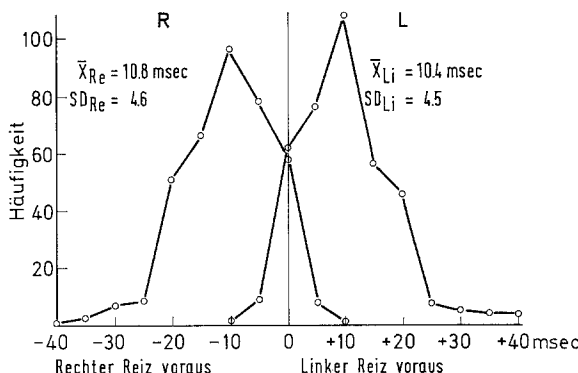


Abb. 3. Häufigkeitsverteilung der 760 Einzelwerte der Außengrenzen des subjektiven Gleichzeitigkeitsbereiches von somatosensiblen Reizen am re. und li. Zeigefinger mit je 10 Messungen bei re. (R) und li. (L) Reizvorausgabe bei 38 gesunden Vpn. Bei Annäherung in Schritten von 5 msec beginnt der Gleichzeitigkeitsbereich am häufigsten 10 msec vor dem objektiven Simultanpunkt

Betrachtet man bei somatosensiblen Reizen die rechtsseitige und linksseitige Annäherung zum Simultanpunkt getrennt, so zeigt sich in ähnlicher Weise eine symmetrische Anordnung beider Außengrenzen um den Nullpunkt (Abb. 3). Die Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches bei Annäherung von rechts und links haben ihre größte Häufigkeit bei 10,8 und 10,4 msec mit zugehöriger Standardabweichung von 4,6 und 4,5 msec. Das bedeutet, daß die Grenze des zeitlichen Auflösungsvermögens zweier elektrischer somatosensibler Reize (der angegebenen Parameter) am linken und rechten Zeigefinger im Durchschnitt bei 10 msec liegt. Die Größe dieses Wertes ist von der Reizintensität abhängig.

Es besteht weiterhin eine Relation zwischen der Größe des Mittelwertes des Gleichzeitigkeitsbereiches $\left(\frac{L+R}{2}\right)$ und der zugehörigen Standardabweichung: je weiter der Mittelpunkt des subjektiven Gleichzeitigkeitsbereiches vom objektiven Simultanpunkt abweicht, desto größer ist die zugehörige Standardabweichung des Grenzwertes, desto variabler also die Angaben einer Versuchsperson (Abb. 4). Der Regressionskoeffizient (d.h. der Tangens des Neigungswinkels der Regressionsgeraden)

beträgt $b = 1,08$ bei einer Standardabweichung SD_b von 0,20. Die Neigung der Regressionsgeraden gegen die $\frac{L+R}{2}$ Achse ist damit signifikant von Null verschieden ($p < 0,001$) (Abb. 4).

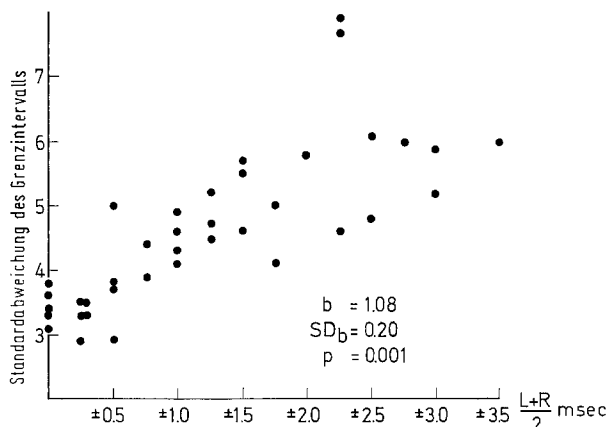


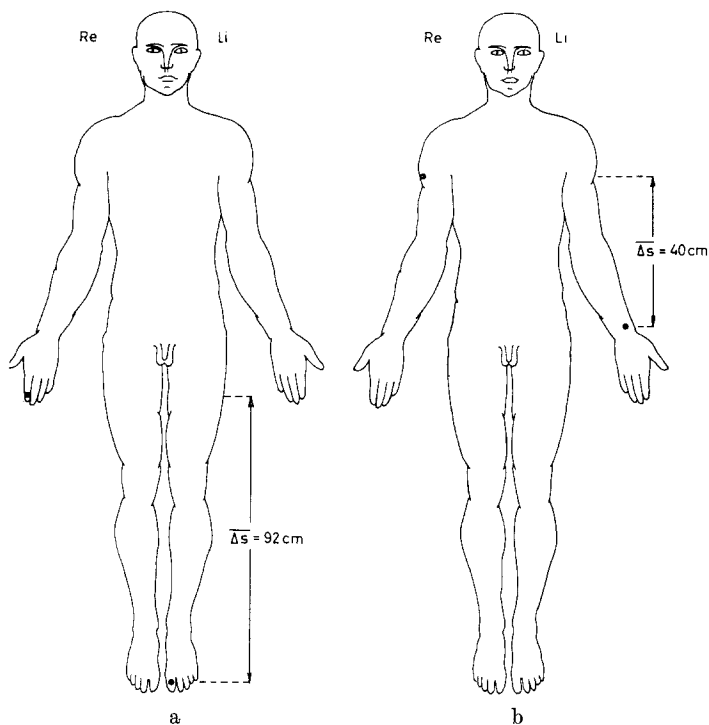
Abb. 4. Beziehung der Abweichungen der Mittelpunkte des subjektiven Gleichzeitkeitsbereiches vom objektiven Simultanpunkt $\left(\frac{L+R}{2}\right)$ bei somatosensibler Reizung am re. und li. Zeigefinger zur zugehörigen Standardabweichung bei 38 gesunden Vpn.: Je größer die Abweichung von der objektiven Gleichzeitigkeit, desto variabler sind die Angaben einer Versuchsperson

2. Um die Genauigkeit der Methode zu prüfen, machten wir *Kontrollversuche* mit bilateral asymmetrischen Reizen (Abb. 5): a) einen Oberarm-Unterarm-Versuch und b) einen Zeigefinger-Großzehen-Versuch.

a) *Oberarm-Unterarm-Versuch.* Bei Wahrnehmung der Gleichzeitigkeit somatosensibler Reize am rechten Oberarm und linken Unterarm bei sieben gesunden Versuchspersonen entsprach die durchschnittliche Wegverlängerung von 40 cm für den linken Unterarmreiz einem durchschnittlichen Zeitintervall von 3,85 msec, die der Unterarmreiz vorausgegeben werden muß, um mit dem kontralateralen Oberarmreiz als gleichzeitig empfunden zu werden. Die sich aus diesem Versuch ergebende scheinbare Reizleitungsgeschwindigkeit in den Nerven des Armes liegt durchschnittlich bei 110 m/sec.

b) *Zeigefinger-Großzehen-Versuch.* Bei Wahrnehmung der Gleichzeitigkeit somatosensibler Reize am rechten Zeigefinger und an der linken Großzehe entsprach im Durchschnitt der Wegverlängerung für den Großzehenreiz um 92 cm ein Zeitintervall von 14,5 msec, die der Großzehenreiz vorausgegeben werden muß, um mit dem kontralateralen Fingerreiz

als gleichzeitig empfunden zu werden. Daraus ergibt sich eine Reizleitungsgeschwindigkeit von 66 m/sec, die in guter Übereinstimmung mit objektiven Messungen von BUCHTHAL u. ROSENFALK [3] steht.



$$\bar{x} \frac{R+L}{2} = 14,5 \pm 2,57 \text{ msec li. voraus}$$

$N = 3$ Vpn. je 20 Messungen

$$\bar{v} = 66 \text{ m/sec}$$

$$\bar{x} \frac{R+L}{2} = 3,85 \pm 0,46 \text{ msec li. voraus}$$

$N = 7$ Vpn. je 20 Messungen

$$\bar{v}_{\text{scheinbar}} = 110 \text{ m/sec}$$

$$\bar{v}_{\text{axill.}} = 48,5 \text{ m/sec wenn } \bar{v}_{\text{cut. antebr. rad.}} = 66 \text{ m/sec}$$

Abb. 5 a und b. Gleichzeitigkeitswahrnehmung bilateral asymmetrischer Hautreize:

Der Durchschnitt der Mittelpunkte des Gleichzeitigkeitsbereiches $\left(\bar{x} \frac{L+R}{2}\right)$ für Wahrnehmung der Gleichzeitigkeit somatosensibler Reize (a) am re. Zeigefinger und li. Großzeh und (b) am re. Oberarm und li. Unterarm. Der li. Reiz muß durchschnittlich um (a) 14,5 bzw. (b) 3,85 msec vorausgegeben werden, um mit dem kontralateralen Reiz als gleichzeitig empfunden zu werden

3. Eine weitere Versuchsreihe versuchte die Frage zu klären, ob die rechte Hemisphäre Gleichzeitigkeit ebenso gut wahrnimmt wie die linke.

a) Der Vergleich der Gleichzeitigkeitswahrnehmung somatosensibler Reize am linken Zeige- und Mittelfinger mit den Ergebnissen am rechten Zeige- und Mittelfinger bei fünf Versuchspersonen zeigt, daß die Außen-

grenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches an der linken Hand im Durchschnitt 5,6 msec, an der rechten Hand 5,5 msec betragen. Die zugehörigen Standardabweichungen liegen bei 2,6 und 2,4 msec. Diese Unterschiede sind höchst insignifikant.

b) Der Vergleich von unilateraler Wahrnehmung der Gleichzeitigkeit somatosensibler Reize an Zeige- und Mittelfinger einer Hand mit bilateralen Versuchen an *beiden* Händen zeigt erstens eine signifikant kleinere Standardabweichung bei unilateraler Wahrnehmung (2,5 gegen 4,6) und zweitens signifikant engere Außengrenzen des subjektiven Gleichzeitigkeitsbereiches (5,7 gegen 10,6 msec) als im bilateralen Versuch.

B. Nervenkrankte

An 19 Patienten mit Erkrankungen des Nervensystems wurden mit somatosensiblen Reizen am rechten und linken Zeigefinger die Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereichs bestimmt (wie unter A 1). Die untersuchte Gruppe bestand aus 14 *einseitigen Großhirnläsionen*, 2 beidseitigen Großhirnläsionen, ferner 2 peripheren Nervenschäden und einer Multiplen Sklerose.

1. Vergleicht man das Kollektiv der Patienten in seiner Gesamtheit mit der Gruppe der Gesunden, so fällt auf, daß die Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches bei den Kranken höher liegen als bei den Normalpersonen: der Durchschnitt der rechts- bzw. linksseitigen Außengrenzen aller Patienten beträgt $R = 39,8$ und $L = 40,1$ msec. Das Durchschnittsalter der Normalpersonen betrug 26 Jahre, das der Patienten 45 Jahre.

2. Der Mittelpunkt des Gleichzeitigkeitsbereiches der Kranken weicht bei subjektiver Gleichheit der Reizstärken am rechten und linken Finger nicht signifikant vom objektiven Simultanpunkt ab, d.h. es ergibt sich keine einseitige Verschiebung des Gleichzeitigkeitsbereiches.

3. Cerebral geschädigte Patienten *mit* Sensibilitätsstörungen haben durchweg eine starke Verbreiterung der Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches, von den zentralen Läsionen *ohne* Sensibilitätsstörungen dagegen nur 2 von 8 Patienten signifikant abweichende erweiterte Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches. Die weiten Außengrenzen bei diesen 2 Kranken sind wahrscheinlich durch eine erhebliche psychische Verlangsamung zu erklären.

4. Da die Patienten mit zentraler Sensibilitätsstörung psychisch durchweg verlangsamt waren, könnte die Verbreiterung der Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches in diesen Fällen vielleicht ebenfalls durch psychische Alteration erklärt werden. Daß jedoch nicht ausschließlich psychische Alteration der Grund stark verbreiteter Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches für somatosensible Reize ist,

zeigt der Fall des Kranken Me. (Abb. 6): der Kranke Me., dessen nicht dominante rechte Großhirnhemisphäre wegen eines ausgedehnten Glioms größtenteils entfernt worden war, und der außer einer Hemiplegie und einer Hemianopsie links eine hochgradige Störung von Berührungs- und Schmerzempfindung sowie des Lagesinns links mit thalamischer Hyperpathie hatte, zeigte bei Prüfung der bilateralen Gleichzeitigkeitswahrnehmung (an beiden Zeigefingern) eine Verbreiterung der Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches auf 90–100 msec. Prüfte man dagegen bei demselben Kranken die Gleichzeitigkeitswahrnehmung seiner intakten dominanten Großhirnhemisphäre, indem man Reize an Zeige- und Mittelfinger der ipsilateral zur Hirnläsion gelegenen Hand auf ihre Gleichzeitigkeit beurteilen ließ, so zeigte sich, daß dann die Wahrnehmung intakt war: der Patient war fähig, bis zu einem Zeitintervall von 10–20 msec Ungleichzeitigkeit wahrzunehmen.

5. Patienten mit rein peripheren Sensibilitätsstörungen zeigten eine Verbreiterung des Gleichzeitigkeitsbereiches auf durchschnittlich 46 msec. Das durchschnittliche Lebensalter dieser Kranken betrug 45 Jahre.

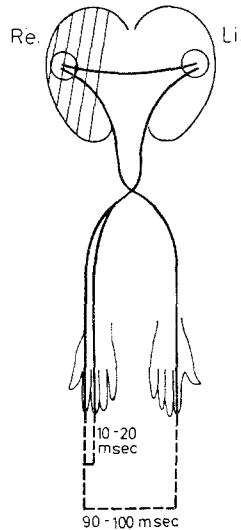


Abb. 6. Patient Me. mit fast völliger Entfernung der re. Hemisphäre wegen eines Glioms: Die Außengrenzen des subjektiven Gleichzeitigkeitsbereiches im bilateralen Zeitvergleich 90 bis 100 msec, im unilateralen (ipsilateral zur Hirnläsion) 10–20 msec

Besprechung der Ergebnisse

Die Wirkung *schwacher elektrischer Hautreize*, die vorwiegend Berührungs- und Druckqualitäten auslösen, ähnelt adäquaten Reizen. Der elektrische Hautreiz hat den Vorteil von Kürze, Synchronisierung und Trägheitslosigkeit. Die allgemeine Schwierigkeit der subjektiven Gleichzeitigkeitsbestimmung von Reizen beider Körperseiten ist offenbar darin begründet, daß Verzögerungen bei der Übertragung der Erregung zum Großhirn eine Streuung des zeitlichen Auftretens der Erregung im Großhirn bedingen, und starke Reize schneller übertragen werden als schwache. Die Abweichungen sind vornehmlich eine Funktion der Intensität des Reizes: ungleiche Stärke und ungleiche subjektive Qualität der Reize sind Fehlermöglichkeiten. Es wurde großer Wert darauf gelegt, diese Fehler auszuschalten. In Vorversuchen wurde die Reizqualität durch

Verschiebung der Lokalisationspunkte der Reize abgeglichen. Sorgfalt wurde darauf verwendet, subjektiv gleiche Intensität der Reize einzustellen.

EFRONS [5] Schluß, die Gleichzeitigkeitswahrnehmung finde in der *dominanten* Großhirnhemisphäre statt, machte es notwendig, unsere ausschließlich rechtshändigen Versuchspersonen auf ihre Rechtshändigkeit (als einziges nachprüfbares Kriterium für Hemisphärendominanz) zu prüfen.

Es wurde der Fragebogen zur Erfassung der Händigkeit von HUMPHREY [8] in der Modifikation von HECAEN u. AJUAGUERRA [7] angewandt. Für die schwierige Diagnostik der Händigkeit sei auf die Arbeit von BENTON [1] hingewiesen. Das nicht seltene Phänomen der gekreuzten Asymmetrie (Untersuchungen über Beinigkeit von LANDGRAF u. STEINBACH [13]) läßt auch bei Rechtshändern die Möglichkeit einer partiellen Dominanz der rechten Hemisphäre zu. Es wurde deshalb die Prüfung der Beinigkeit in den Fragebogen einbezogen.

Zu den Ergebnissen an Gesunden. Die Mittelwerte der Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches streuen normalverteilt um Null. Der Durchschnitt der Mittelpunkte des subjektiven Gleichzeitigkeitsbereiches weicht bei somatosensiblen Reizen am rechten und linken Zeigefinger sowie bei visuellen Reizen im temporalen Sehfeld beider Augen nicht signifikant vom objektiven Simultanpunkt ab. Es liegt kein Anhalt für eine „asymmetry of function“ im Sinne von EFRON [5] vor.

Versuchspersonen, die dem objektiven Simultanpunkt am nächsten kommen, sind zugleich diejenigen, die am genauesten wahrnehmen. Sie haben die kleinste Standardabweichung. Auch dies spricht dafür, daß der subjektive Mittelwert des Gleichzeitigkeitsbereiches nicht signifikant vom objektiven Simultanpunkt abweicht.

Die größere Standardabweichung bei visuellen Reizen kann durch die adäquate Reizung bedingt sein, die mit Summationsprozessen und größerer Latenz in der Retina verbunden ist.

Die Ergebnisse des Oberarm-Unterarmversuches zeigen an, daß eine Wegverlängerung des linken Reizes gegenüber dem rechten von durchschnittlich 40 cm einer mittleren Abweichung des Mittelwertes des Gleichzeitigkeitsbereiches von 3,8 msec entspricht. Der Wert von 3,8 msec liegt in der Größenordnung, die EFRON [5] für seine Versuchspersonen ohne jegliche Leitungsverlängerung erhielt (3,3 msec). Aus unserem Ergebnis ist zu folgern, daß ein Vorseilen eines Reizes um 3,8 msec von normalen Versuchspersonen deutlich wahrgenommen wird. Der Unterschied der Ergebnisse EFRONS von unseren ist also nicht durch Ungenauigkeit der Methode bedingt. Im Zeigefinger-Großzehenversuch bestand eine durchschnittliche Differenz der Weglängen von 92 cm, die die somatischen

Reize bis zum Gehirn zurückzulegen haben, was eine durchschnittliche Abweichung des Mittelpunktes des Gleichzeitigkeitsbereiches (vom objektiven Simultanpunkt) von 14 msec zur Folge hatte. Dies bestätigt das im Oberarm-Unterarm-Experiment gefundene Ergebnis.

Die im Zeigefinger-Großzehenversuch errechnete Leitungsgeschwindigkeit von 66 m/sec steht in guter Übereinstimmung mit objektiven Messungen von BUCHTHAL u. ROSENFALK [3]. Dagegen ergibt sich im Oberarm-Unterarmversuch eine zu rasche scheinbare Leitungsgeschwindigkeit von 110 m/sec, die freilich ganz vernünftig ist, wenn man annimmt, daß die Nerven von proximalen Abschnitten langsamer leiten. Nimmt man für den distalen Punkt 66 m/sec an, so ergibt sich für den proximalen 49 m/sec.

Die Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches und die zugehörige Standardabweichung bei Reizen an Zeige- und Mittelfinger der *rechten* Hand weichen nicht signifikant von den entsprechenden Werten der *linken* Hand ab. Man muß annehmen, daß *beide* Großhirnhemisphären die Gleich- bzw. Ungleichzeitigkeit somatosensibler Reize der zugehörigen Hand *gleich* gut wahrnehmen.

Die Gleichzeitigkeitsbestimmung von somatosensiblen Reizen an Zeige- und Mittelfinger derselben Hand zeigt zweierlei: einmal ist die Standardabweichung bei einhändiger Simultanpunktbestimmung um etwa die Hälfte kleiner als bei beidhändiger. Dies mag darauf zurückzuführen sein, daß hierfür nur eine Großhirnhemisphäre notwendig und der neurale Verschaltungsprozeß daher weniger kompliziert ist. Zum andern sind die Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches im unilateralen Zeitvergleich mit durchschnittlich 5,7 msec signifikant enger als beim bilateralen Zeitvergleich (10,6 msec).

Die Ergebnisse EFRONS für den Mittelpunkt des Gleichzeitigkeitsbereiches bei somatosensiblen Reizen des rechten und linken Zeigefingers bei Gesunden weichen viel weiter als die unserer gesunden Versuchspersonen von objektivem Simultanpunkt ab: EFRON [5] fand im Durchschnitt bei 11 Rechtshändern eine Abweichung von 3,32 msec bei einer Standardabweichung von 3,39. Unser Durchschnitt von 38 Rechtshändern lag bei 0,31 msec Abweichung vom objektiven Simultanpunkt (Standardabweichung 4,6). Diese Ergebnisse sind voneinander signifikant verschieden ($p = 0,03$). Eine schlüssige Erklärung für diese Diskrepanz wissen wir nicht.

Man kann gegenwärtig nur vermuten, daß die Ursachen in der von EFRON getroffenen speziellen Auswahl der Versuchspersonen und in der Abgleichung der Reizstärken an beiden Körperseiten liegen.

Unsere Ergebnisse an Gesunden geben keinen Anhalt für EFRONS Hypothese, daß die Wahrnehmung der Gleich- oder Ungleichzeitigkeit

rechts- und linksseitiger taktiler und visueller Reize allein in der dominanten Großhirnhemisphäre stattfindet. Es fragt sich, ob die angewandte Methode genau genug ist, eine Entscheidung über den Ort der Zeitvergleichung zu finden. Nimmt man für den Weg über den Balken und für zusätzlich eine Synapse eine Zeit von wenigstens 2 msec an, so ist der Mittelwert unseres Kollektivs (0,31 msec) 1,69 msec von diesem hypothetischen Wert verschieden. Dieser Unterschied bei der gefundenen Standardabweichung von 4,6 msec und 38 Versuchspersonen ist signifikant ($p = 0,005$).

Überblickt man Untersuchungen über Hemisphärendominanz (BENTON [1]; HECAEN [7]; WEINSTEIN [15]; ZANGWILL [16]; u. a.), so findet man auch darin keine Stütze für EFRONS spezielle Hypothese. Zwar ist die zentrale Repräsentation sensorischer Funktionen rechts nicht einfach ein Spiegelbild der linken (SEMMEs et al. [14]), doch ist die Gleichzeitigkeitswahrnehmung in ihrer Beziehung zur Hemisphärendominanz bisher bei Hirnverletzten nicht untersucht.

Zu den Ergebnissen an Kranken. Die Außengrenzen des Gleichzeitigkeitsbereiches sind sowohl bei cerebraler als auch bei peripher bedingten Sensibilitätsstörungen verbreitert. Dagegen ist, wenn die Reizstärke subjektiv symmetrisch ist, keine Verschiebung des Mittelpunktes des Gleichzeitigkeitsbereiches festzustellen. Die zeitliche Vorgabe des zur Hirnläsion kontralateralen Reizes bzw. zu peripheren Läsionen ipsilateralen Reizes, deren Notwendigkeit man vermuten könnte, ist vielleicht deshalb nicht erforderlich, weil die Reizstärke auf dieser Seite erhöht wird, um die Reize subjektiv symmetrisch zu machen. Die beiden wichtigsten Ursachen, die zu einer Verbreiterung des Gleichzeitigkeitsbereiches führen, sind a) die bei cerebralen Läsionen oft vorhandene Konzentrationsschwäche und b) eine (zentrale oder periphere) Sensibilitätsstörung.

Daß eine cerebrale Sensibilitätsstörung allein zur Verbreiterung des Gleichzeitigkeitsbereiches führen kann, zeigt der Fall Me. Er spricht dafür, daß für die normale exakte Gleichzeitigkeitswahrnehmung von rechts- und linksseitigen somatosensiblen Reizen Bahnen benötigt werden, die über die kontralaterale Großhirnhemisphäre und den Balken führen. Bei Ausfall dieses raschen lemniscalen Weges über die kontralaterale Großhirnhemisphäre und den Balken kann der Zeitvergleich offenbar noch mit Hilfe einer ipsilateralen Bahn zur Großhirnrinde vollzogen werden. Da diese aber offenbar langsamer und zeitlich ungenauer leitet, wird der Gleichzeitigkeitsbereich breiter. Die Ergebnisse an Großhirnläsionen, besonders der Fall Me., sagen nichts darüber, ob die Zeitvergleichung normalerweise nur in einer oder in beiden Großhirnhemisphären vorgenommen wird. Doch sprechen die Befunde an Gesunden gegen eine Lokalisation der Gleichzeitigkeitsfeststellung ausschließlich in einer, etwa der dominanten Hemisphäre. Da die Ergebnisse an Großhirnläsionen sehr

wahrscheinlich machen, daß eine Leitung über die jeweils kontralaterale Hemisphäre und den Balken für die normale, genaue Gleichzeitigkeitsbestimmung gebraucht wird und andererseits die Versuche an Gesunden eine HemisphärenDominanz für die Gleichzeitigkeitswahrnehmung ausschließen, bleiben, soweit wir sehen, nur 2 Schlüsse übrig: 1. bei alternierend vorausgehenden Reizen mißt alternierend die rechte und linke Hemisphäre die Gleichzeitigkeit, je nachdem für welche die zeitlichen Verhältnisse (Refraktärperiode usw.) günstiger sind. Oder 2. es sind beide Großhirnhemisphären in ähnlichem Ausmaß an der Gleichzeitigkeitsbestimmung beteiligt.

Herrn Professor KORNHUBER danke ich für zahlreiche Anregungen.

Literatur

1. BENTON, A. L.: Clinical symptomatology in right and left hemisphere lesions. In: *Interhemispheric relations and cerebral dominance*, pp. 233—264. V. B. MOUNTCASTLE, ed. Baltimore: John Hopkins Press 1962.
2. BUSER, P., and M. IMBERT: Sensory projections to the motor cortex in cats: a microelectrode study. In (W. ROSENBLITH, ed.): *Sensory communication*, p. 607, M.I.T. Press. New York-London: J. Wiley & Sons 1961.
3. BUCHTHAL, F., and A. ROSENFALCK: Evoked action potentials and conduction velocity in human sensory nerves. *Brain Res.* **3** (1966), Special Issue.
4. CONRAD, B., u. H. H. KORNHUBER: Zur bilateralen sensorischen Integration beim Menschen: Die Wahrnehmung der Gleichzeitigkeit von rechts- und linksseitigen somatosensiblen und visuellen Reizen bei Gesunden und bei Kranken mit Großhirnläsionen. *Pflügers Arch. ges. Physiol.* **294**, 60 (1967).
5. EFRON, R.: The effect of handedness on the perception of simultaneity and temporal order. *Brain* **86**, 261 (1963).
6. — The effect of stimulus intensity on the perception of simultaneity in right- and left-handed subjects. *Brain* **86**, 285 (1963).
7. HECAEN, H., and J. D. AJURIAGUERRA: *Lefthandedness, manual superiority and cerebral dominance*. New York-London: Grune & Stratton 1964.
8. HUMPHREY, M. E.: *Brit. J. educ. psychol.* **21**, 214 (1951); zit. nach HECAEN u. AJURIAGUERRA.
9. KORNHUBER, H. H.: Zur Bedeutung multisensorischer Integration im Nervensystem. *Dtsch. Z. Nervenheilk.* **187**, 478—484 (1965).
10. —, u. J. C. ASCHOFF: Somatisch-vestibuläre Konvergenz und Interaktion an Neuronen des motorischen und des somatosensiblen Cortex der Katze. *Pflügers Arch. ges. Physiol.* **278**, 72 (1963).
11. — — Somatisch-vestibuläre Integration an Neuronen des motorischen Cortex. *Naturwissenschaften* **3**, 62—63 (1964).
12. —, and J. S. DA FONSECA: Convergence of vestibular, visual and auditory afferents at single neurons of the cats cortex. 5. Intern. Congress of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, *Excerpta med. Int. Congr. Ser.* **37/11**, 14 (1961).
13. LANDGRAF, F. K., u. M. STEINBACH: Beitrag zum Rechts-Links-Problem unter besonderer Berücksichtigung des prävalierten Beines. *Sportarzt* **12**, 267 (1963).

14. SEMMES, J., S. WEINSTEIN, L. GHENT, and H.-L. TEUBER: Somatosensory changes after penetrating brain wounds in man. Cambridge: Harvard Univ. Press 1960.
15. WEINSTEIN, S.: Differences in effects of brain wounds implicating right or left hemispheres. Differential effects on certain intellectual and complex perceptual functions. In: Interhemispheric relations and cerebral dominance, pp. 159—177. V. B. MOUNTCASTLE, ed. Baltimore: John Hopkins Press 1962.
16. ZANGWILL, O. L.: Cerebral dominance and its relations to psychological functions. Vol. I, p. 31. Edinburgh-London: Oliver & Boyd 1960.

Dr. B. CONRAD
Abteilung für Neurologie
der Universität Ulm
7959 Dietenbronn