

Aus der Abteilung für experimentelle Pathologie und Therapie
des W. G. Kerckhoff-Institutes der Max Planck-Gesellschaft, Bad-Nauheim.

Über die Steigerungen des Energiestoffwechsels und der Muskelinnervation bei geistiger Arbeit.

Von

H. GÖPFERT, A. BERNSMEIER und R. STUFLER.

Mit 7 Textabbildungen.

(Eingegangen am 2. August 1952.)

Überblicken wir die nicht geringe Zahl von Untersuchungen, die sich theoretisch oder experimentell mit den energetischen Prozessen bei der geistigen Tätigkeit des Menschen befaßt haben, so begegnen wir bei vielen Autoren starken Zweifeln, ob die mehrfach gemessenen Steigerungen des Energieumsatzes wirklich den Stoffwechselvorgängen im Gehirn entsprechen, oder ob sie überhaupt reell sind. Theoretisch wird von manchen Seiten angeführt, daß bei Ausschaltung aller äußeren, störenden Faktoren eine Umsatzsteigerung nicht erwartet werden kann, da geistige „Arbeit“ keine Energieform im physikalischen Sinne ist. Andere geben die Möglichkeit energetischer Prozesse bei Tätigkeit des Gehirns zu, werfen aber ein, daß das Gehirn ja eigentlich immer, sogar während des Schlafes in Aktion sei und daß somit jene Prozesse nicht an die Phasen wirklicher geistiger „Arbeit“ gekoppelt seien. Diese Ansicht führt zu spekulativen Weiterungen, wie z. B. der Vorstellung, daß die Stoffwechselvorgänge bei geistiger „Ruhe“ zerstreut (extensiv) abliefern, bei „Arbeit“ aber gerichtet (intensiv) seien und sich auf bestimmte Rindenpartien konzentrierten (v. LIEBERMANN²²). Von der Mehrzahl der Autoren wird eine eindeutige Stellungnahme nicht gegeben, man begnügt sich mit der Meinung, daß gewisse, mit der geistigen Konzentration wechselnde Stoffwechselschwankungen wohl existieren mögen, daß sie aber in Anbetracht der relativ zum gesamten Körper kleinen Gehirnmasse zu gering seien, um den Grundumsatz (GU) merklich zu erhöhen. Man bezieht sich dabei auf eine Reihe experimenteller Angaben, die keine oder nur unbedeutende Gesamtumsatz-Steigerungen behaupteten.

Die älteren Untersuchungen, auf denen diese Daten größtenteils basieren, stammen von LOEWY²³, SPECK³³ und JOHANSSON¹⁵, ferner aus den amerikanischen Laboratorien von ATWATER, WOOD u. BENEDICT² und später von BENEDICT u. CARPENTER³. Alle diese Autoren bringen Befunde, welche die Tendenz einer Umsatzsteigerung zwar erkennen lassen, deren Schwankungsbreite jedoch so groß ist, daß die Verfasser selbst sie nicht als beweisend anerkennen wollen. In Prozenten

ausgedrückt bewegen sich diese Steigerungen zwischen + 2 und + 7%. Zur Methodik muß bemerkt werden, daß diese älteren Versuche nicht unter den heute bei Stoffwechselfmessungen üblichen Bedingungen vorgenommen wurden. Bei der Anordnung im BENEDICTSchen Laboratorium z. B. saßen die Vpn. in einer Stoffwechselkammer und die geistige Leistung bestand darin, daß sie schriftliche Aufgaben lösen mußten. Zur Kontrolle wurden geistige Ruheperioden eingeschaltet, während derer die Vpn. die gleiche Anzahl von Wörtern rein mechanisch abschrieben. In einer kritischen Arbeit zählt KNIPPING¹⁷ die Nachteile des Verfahrens auf, die im wesentlichen darin bestehen, daß bei den langen Versuchen in der Respirationkammer die Muskelarbeit stets mitgemessen wird. Diese zusätzlichen muskulären Arbeitsleistungen sollten zwar durch die Kontrollversuche eliminiert werden, doch ist die Fehlerbreite bei einer solchen Methodik derartig vergrößert, daß feinere Unterschiede darin untergehen.

Bis zu einem gewissen Grade treffen die erhobenen Bedenken auch für spätere Versuche zu, wenngleich diese angeblich mehr oder weniger unter Grundumsatz-Bedingungen angestellt wurden. Hierbei kamen wohl die Umsatzerhöhungen zum Teil stärker heraus, dafür stieg aber die Diskrepanz zwischen den einzelnen Messungen kraß an, wobei charakteristisch ist, daß die einzelnen Untersucher bereits innerhalb ihrer eigenen Versuchsreihen erhebliche Unterschiede zugeben. Es hat daher nicht viel Sinn, auf die von den verschiedenen Autoren errechneten Mittelwerte prüfend einzugehen, wir können uns mit der Feststellung begnügen, daß die mitgeteilten Stoffwechselsteigerungen ungefähr den Bereich von + 1% bis + 45% umfassen (von einigen extremen Einzelwerten, z. B. bei CHLOPIN^{4, 5} abgesehen).

Daß man diesen stark voneinander abweichenden experimentellen Befunden mit starken Zweifeln entgegentrat, ist begreiflich. Andererseits führen uns diese Tatsachen auf das eigentliche Problem zurück, nämlich auf die Frage, ob die gemessenen Umsatzsteigerungen wirklich der Ausdruck energetischer Vorgänge im Gehirn sind, oder ob wir hier nur die Rückwirkungen der geistigen Anspannung auf andere Körperorgane erfassen, die naturgemäß sehr starken Schwankungen unterliegen müssen. In erster Linie denken wir dabei an die Muskulatur, die den überragenden Anteil am Gesamtstoffwechsel des Körpers hat, so daß vornehmlich zu prüfen wäre, ob und in welchem Umfange sich die Skelettmuskulatur bei geistiger Arbeit tätig mit einschaltet.

Daß eine derartige Mitwirkung stattfinden kann, steht außer Zweifel, wie ein Blick auf das Mienenspiel und die manchmal angespannte Haltung der Extremitäten lehrt. Bei starker seelischer Anteilnahme kann es sogar zu deutlich ausgeprägten Zitterbewegungen kommen. Auf Grund derartiger Eindrücke neigten diejenigen Autoren, welche diesen Fragen kritisch nachgegangen waren (GRAFE¹¹, WINTERSTEIN³⁴, G. LEHMANN²⁰) schon seit längerem dazu, einen wesentlichen Teil der Stoffwechseleffekte der Muskulatur zuzuschreiben. Von anderer Seite glaubte man allerdings, wenigstens bei Einhaltung strenger GU-Bedingungen und guter körperlich entspannter Ruhelage, den Faktor der muskulären Mitbeteiligung vernachlässigen zu können. Lediglich die erhöhte Atmungstätigkeit wurde in Rechnung gesetzt (IHLSHÖFER¹⁴, WACHHOLDER³⁶). Nach den von E. A. MÜLLER, MICHAELIS u. A. MÜLLER²⁵

bestimmten Werten der Atmungsarbeit bleiben die hierfür errechneten Beträge jedoch gegenüber den gesamten Umsatzsteigerungen bei geistiger Arbeit relativ klein, sie bedingen nur eine geringe Korrektur, wie z. B. die für einzelne Fälle berechneten Zahlenangaben WACHHOLDERS³ erkennen lassen.

Der positive Nachweis einer bei geistiger Arbeit wirklich erhöhten Muskelaktivität konnte erst gelingen, nachdem man durch die verbesserte elektrische Registriertechnik in der Lage war, sehr kleine Muskelaktionsströme (AS) darzustellen. Versuche dieser Art wurden von DAVIS⁶ unternommen, der AS in der Größenordnung von 5—20 μ V beobachtete. Auch SHAW³² registrierte vermehrte kleine AS bei bestimmten psychischen Vorstellungen, die sich allerdings unmittelbar auf die Muskelarbeit bezogen (psychische Vorstellung des Gewichthebens).

Vor kurzem beschrieben wir eine hochempfindliche Verstärkeranordnung, welche die sehr geringen Potentiale von der ruhenden Muskulatur des Menschen noch abzuleiten gestattet (GÖPFERT⁹). Mit dieser Anordnung ist es möglich, sehr feine Änderungen der tonischen Muskelinnervation zu erfassen, wie wir am Beispiel einer leichten Kälteeinwirkung auf die Haut demonstrieren konnten (GÖPFERT u. STUFLEK¹⁰). Es stand zu erwarten, daß die Auswirkung geistiger Anspannung auf die Muskulatur mit dieser Registriertechnik gut darzustellen war. Über solche Versuche, die jeweils mit Messungen des Energiestoffwechsels kombiniert wurden, soll im folgenden berichtet werden.

Versuchsmethodik.

Um bezüglich der geistigen Leistung einigermaßen gleichartige Versuchsbedingungen zu schaffen, mußten die Aufgaben so gewählt werden, daß sie von allen Vpn. unabhängig von Intelligenz und geistiger Ausbildung in ungefähr der gleichen Weise gelöst werden konnten. Dieser Forderung schien uns am besten das fortgesetzte Addieren einstelliger Zahlen nach Art des Rechentestes von KRAEPELIN¹⁸ und OEHN²⁷ zu entsprechen, wobei also neben der Perzeption eine bestimmte abgrenzbare Assoziations- und Gedächtnisleistung verlangt wird. Vom Versuchsleiter wurden die zu addierenden Zahlen nach einer Tabelle, die bei jedem Versuch wechselte, in schnellem Tempo diktiert, wobei die Vp. nach jeder Minute das Resultat aufschreiben mußte. Sprechen durfte die Vp. während des Versuches nicht, was ja auch wegen der gleichzeitig durchgeführten Stoffwechsellmessung unmöglich war. Abgesehen von der nur jede Minute einmal erfolgenden unbedeutenden Schreibbewegung einer zwei- oder dreistelligen Zahl war also jede körperliche Bewegung ausgeschlossen. Alle Versuche dauerten jeweils 5 min, zwischen mehreren Versuchen wurden stets längere Pausen eingeschaltet.

Alle Messungen erfolgten unter strengen GU-Bedingungen. Der Ruhenüchternwert jeder Vp. wurde vor den Versuchen durch eine Doppelbestimmung ermittelt. Desgleichen wurde auch die normale „Restaktivität“ durch Registrierung der AS im Ruhezustand festgelegt, die Ableitung erfolgte dabei im allgemeinen von 3 verschiedenen Muskeln (meist vom Arm, Oberschenkel und Unterschenkel). Um auch feine mechanische Spannungsänderungen oder unmerkliche kleine Bewegungen der Muskeln sichtbar zu machen, wurden neben die Elektroden empfindliche piezo-

elektrische Druckkapseln aufgesetzt. Elektrische und mechanische Vorgänge wurden gleichzeitig mit Doppelstrahl-Oszillograph registriert. Über die spezielle Versuchstechnik beim Betrieb der hochempfindlichen Verstärker (Verstärkung $5 \cdot 10^6$ -fach) sowie über die Vorsichtsmaßnahmen bei gleichzeitiger GU-Messung haben wir in vorangegangenen Arbeiten (GÖFFERT⁹, GÖFFERT u. STUFLE¹⁰) berichtet.

Die Vpn. lagen in einem verstellbaren dreiteiligen Liegestuhl, der in der von G. LEHMANN²¹ geforderten Weise so eingestellt werden konnte, daß die Muskulatur bei leicht angewinkelten Gelenken möglichst entspannt war. Es stellten sich 12 Vpn. zur Verfügung, deren körperliche und psychische Eigenschaften unten noch im einzelnen charakterisiert werden. Die Mehrzahl von ihnen bestand aus Mitarbeitern des Institutes und war an Stoffwechselfmessungen gewöhnt. Die Versuche fanden im Hochsommer (Juli/August) statt, so daß die Ruhenüchternwerte relativ niedrig lagen.

Ergebnisse.

Wie zu erwarten war, boten die Aufnahmen der tonischen Muskelinnervation bei den einzelnen Versuchspersonen durchaus verschiedenartige und vor allem zeitlich wechselnde Bilder. Sehen wir aber zunächst

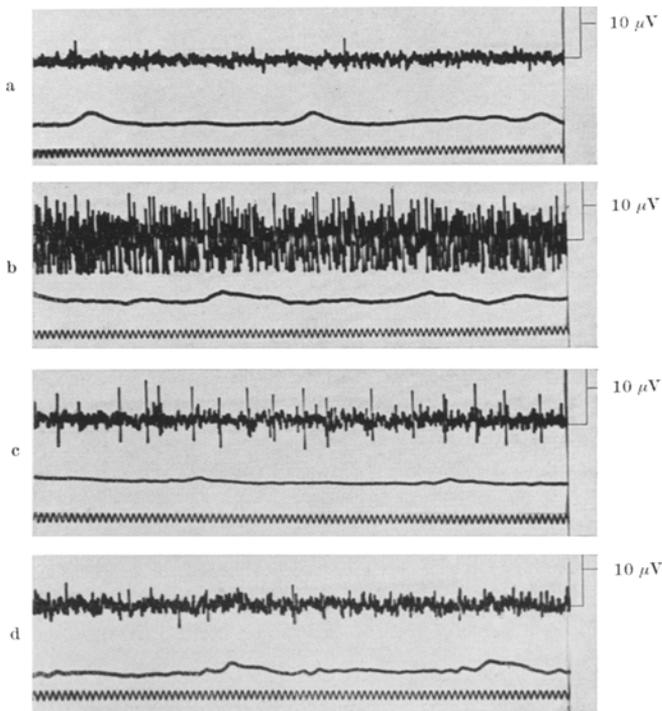


Abb. 1. Muskel-AS vom ruhenden, entspannten Unterarm vor, während und nach geistiger Arbeit (Rechentest). In jedem Bilde: Oben: AS-Registrierung, Ordinatenzeichnung $10 \mu\text{V}$. Mitte: Mechanogramm (die periodischen Wellen geben den durch den Muskel fortgeleiteten Pulsschlag wieder). Unten: Zeiteichung 50 Hz. Bild a: Ruheaufnahme bei geistiger Entspannung. Bild b: AS während des Rechnens. Bild c: AS unmittelbar nach Ende der Rechenaufgabe. Bild d: AS eine Minute nach Ende der Aufgabe. Versuch vom 22. 8. 50 Vp. T. (Erregbarer Typ).

von den hier noch zu erörternden Einzelheiten ab, so können wir die allgemeine Feststellung treffen, daß zum mindesten bei dieser Art von geistigen Leistungen eine muskuläre Reaktion die Regel ist. Ohne Ausnahme konnten wir bei allen untersuchten Versuchspersonen eine Vermehrung und Vergrößerung der Muskel-AS registrieren, die in jedem Falle auch von deutlichen Erhöhungen des Energieumsatzes begleitet waren.

Einen Eindruck von der Intensität der Tonussteigerung soll die Abb. 1 vermitteln, welche bei schneller Registrierung die einzelnen AS erkennen läßt. Die Aufnahmeserie stammt von einer erregbaren, stark affektiv reagierenden Versuchsperson. Hier blieben die während des Versuches abgeleiteten Potentiale (Abb. 1 b) fast die ganze Zeit in unverminderter Stärke bestehen, von kurzen Unterbrechungen abgesehen.

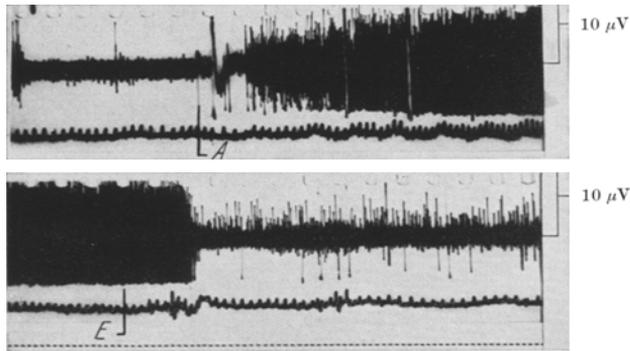


Abb. 2. Analoger Versuch der gleichen Vp. wie Abb. 1, bei langsamer Registriergeschwindigkeit. Zeiteichung (unten): 2 Hz. Signal *A* Beginn, *E* Ende des Rechnens (gleiche Bezeichnung auch bei den folgenden Aufnahmen).

Auch nach Ende der Rechenaufgabe klingt die nervös-muskuläre Erregung nicht sogleich ab (Abb. 1 c und d), die Versuchsperson brauchte eine merkliche Zeit (mehrere Minuten), bis der ursprüngliche Entspannungszustand wieder erreicht war. An einem analogen Fall, jetzt mit langsamer Registriergeschwindigkeit aufgenommen, läßt sich die prompte Reaktion, die dauernd erhöhte Spannung während des Versuches und die deutliche Nachwirkung im Zusammenhang demonstrieren (Abb. 2). Die AS wurden in diesen Fällen von den Extensoren des Unterarmes abgeleitet, die nach unseren Erfahrungen bei diesen Versuchen am stärksten reagieren.

Bei weniger erregbaren Versuchspersonen, z. B. bei allen Personen mit phlegmatischem Temperament, erreichten die Potentiale nicht diese Höhe, zum mindesten nicht während der ganzen Versuchsdauer. Meist setzte der Beginn auch nicht in abrupter Form ein, vielmehr wuchsen die AS erst allmählich zu voller Größe an, recht häufig sogar erst nach

einer deutlich ausgeprägten Latenzzeit (Abb. 3). Dieses Verhalten prägte sich auch deutlich in der Leistung aus: die Additionen erfolgten bei diesen Versuchspersonen in der ersten Minute deutlich verzögert, die Personen mußten sich erst „einlaufen“, wie man sich ausdrückte. Im weiteren Verlauf des Versuches blieben die Potentiale auch nicht auf gleicher Höhe, sondern sie waren häufigen Schwankungen unterworfen, meist in einer plötzlich abfallenden, dann allmählich wieder ansteigenden Form. Abb. 3 c veranschaulicht dieses Verhalten und bringt gleichzeitig das

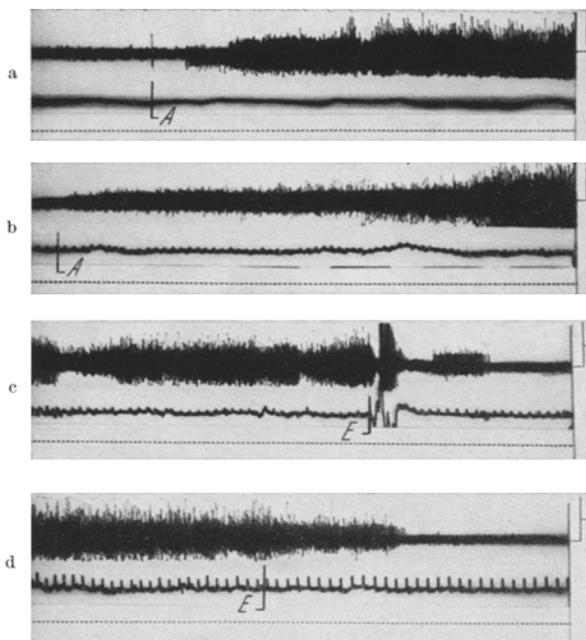


Abb. 3. Anfangsphase (Bild a und b) und Endphase (Bild c und d) der Rechenarbeit, bei verschiedenen Vpn. (ruhigere Typen). Eichung und Signale wie in Abb. 2. Bild a und c: Versuch 16. 8. 50, Vp. He. Bild b und d: Versuch 25. 8. 50, Vp. Ha.

Ende des Versuches, welcher nicht selten von der Versuchsperson mit einer leichten Streckbewegung quittiert wurde (in Abb. 3 c im Mechanogramm und AS-Bild durch hohe Ausschläge sichtbar). Danach pflegte bei diesen Typen rasch wieder völlige Entspannung einzutreten, die AS fielen nicht immer plötzlich, aber doch innerhalb weniger Sekunden, zu völlig normalen Ruhewerten ab (Abb. 3 d).

Nach allem, was wir bisher über die Erscheinungsformen der tonischen Innervation wissen, müssen wir annehmen, daß die Schwankungen der registrierten AS durch abwechselnd an- und abgeschaltete motorische Einheiten ausgelöst werden. In günstig gelagerten Fällen,

wenn wir nämlich die Potentiale nur relativ weniger, dicht an der Oberfläche gelegener Muskelfasern abgreifen, läßt sich das „Anspringen“ neuer Fasereinheiten gut verfolgen. Die Abb. 4a und b bringen Belege für dieses stufenförmige Anwachsen der arbeitenden Fasern. In Abb. 4b

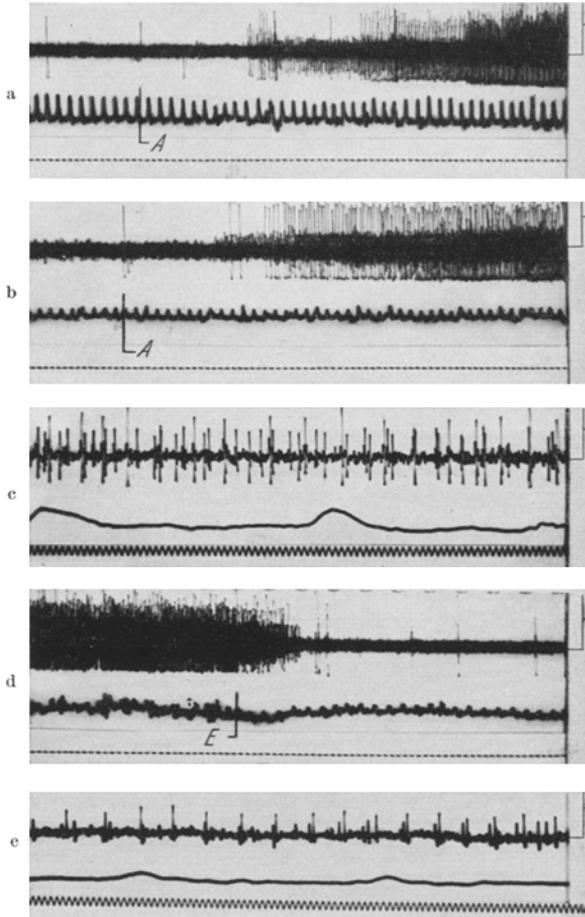


Abb. 4. Stufenförmiges Anwachsen der AS bei rhythmischen Einzelpotentialen. Bild a, b, d langsam (wie Abb. 2), Bild c und e schneller (wie Abb. 1) registriert. Bild a: Versuchsbeginn (A) bei Vp. R., 12. 8. 50. Bild b: Versuchsbeginn (A) bei Vp. Wi., 25. 8. 50. Bild c: Ausschnitt während des Rechnens, Vp. R. Bild d: Ende des Versuches (E), Vp. R. Bild e: 4 min nach Versuchsende, Vp. S., 4. 8. 50.

erkennt man zudem die zunehmende Frequenz der zuerst nur als hohes Einzelpotential sich kennzeichnenden Fasereinheit. Löst man im späteren Verlauf des Versuches die dicht aufeinander folgenden AS durch schnellere Registrierung auf, so lassen sich die rhythmischen Serien

einzelner Fasergruppen z. T. einander zuordnen (Abb. 4c). Auch bei Beendigung des Versuches ist der analoge Vorgang manchmal deutlich zu verfolgen, so sieht man z. B. in Abb. 4d, wie vom Augenblick des Endsignals an die AS-Serien stufenförmig abgebaut werden. Einzelne Folgen halten sich gelegentlich noch minutenlang (Abb. 4e).

Wie schon angedeutet, war die Ausprägung des gesteigerten Innervationstonus bei geistiger Arbeit am deutlichsten in den Armen, vor

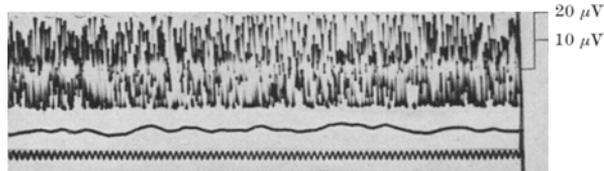


Abb. 5. Muskel-AS, abgeleitet vom Unterschenkel während der Rechenarbeit. Eichungen wie Abb. 1. Vp. D., 17. 8. 50

allen in den Unterarmen, was durch die besondere Rolle diese Muskeln in Hinsicht auf die geistige Tätigkeit des Menschen nicht schwer zu erklären ist. Aber auch die übrige Körpermuskulatur beteiligte sich an der Anspannung, zumal bei erregbaren Personen mit hohem Willen zur Leistung (vgl. Abb. 5). Mehrfach beobachteten wir an den unteren Extremitäten eine Art von unregelmäßiger Periodenbildung,

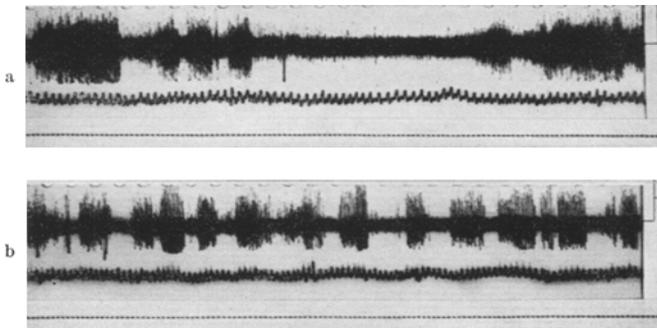


Abb. 6. Periodische Gruppenbildung während der geistigen Arbeit. Registrierung und Eichung wie Abb. 2. Bild a: Vp. Be. (li. Unterschenkel), 14. 8. 50. Bild b: Vp. Wi. (re. Oberschenkel), 25. 8. 50.

meist in der schon beschriebenen langsam ansteigenden und rasch wieder abfallenden Form (Abb. 6a), gelegentlich aber auch in scharf abgesetzten, unregelmäßig sich wiederholenden Gruppen (Abb. 6b). Im übrigen bieten die AS der übrigen Körpermuskulatur nichts Besonderes, die individuellen Unterschiede sind analog den oben beschriebenen.

Wurden die Versuchspersonen durch äußere Geschehnisse geistig abgelenkt, so fiel mit der geistigen Leistung auch die Muskelinnervation

sofort auf niedrigere Werte ab. Eine derartige Versuchsstörung wurde in Abb. 7a registriert. Im Zeitpunkt *A* begann die „Störung“, ein Gespräch zweier am Versuch nicht beteiligten Personen, dem die Versuchsperson mit wachsendem Interesse folgte. Bei *B* machte die Versuchsperson eine leichte Kopfwendung (im Mechanogramm als fortgeleitete Bewegung sichtbar) und die Addition wurde eine kurze Zeit unterbrochen.

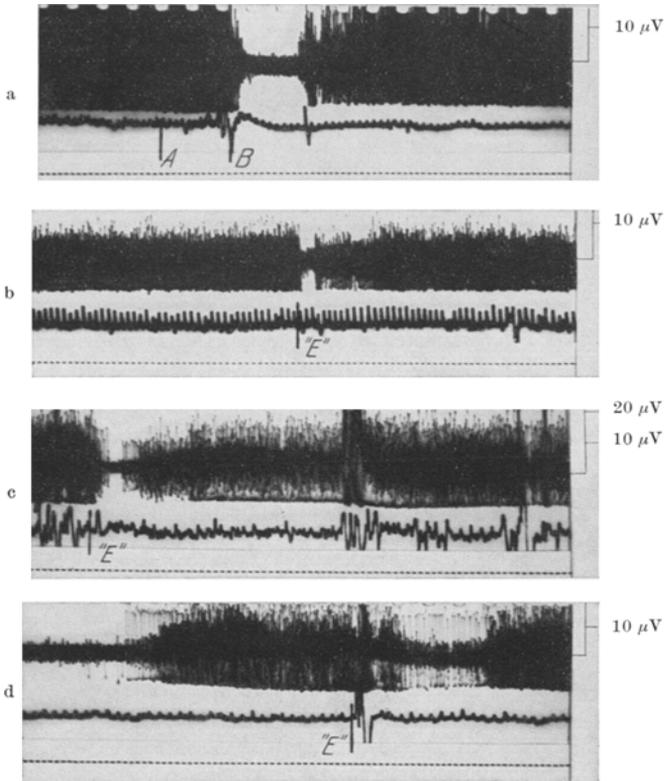


Abb. 7. Äußere Ablenkung während der Rechenarbeit. AS vom li. Unterarm. Bild a: Störung durch ablenkendes Gespräch, bei *A* beginnend, bei *B* leichte Kopfwendung. Vp. T., 22. 8. 50. Bild b: Aufforderung zur Entspannung bei „*E*“, Vp. D., 4. 8. 50. Bild c: Das gleiche bei sensibler Vp. M., 15. 8. 50. Bild d: Analoger Entspannungsversuch bei rhythmischen AS. Vp. Wi., 25. 8. 50.

Um zu prüfen, ob solche Wirkungen auf die Muskelspannung mit Regelmäßigkeit auszulösen sind und ob sich vielleicht ein anhaltendes Nachlassen des Muskeltonus erreichen läßt, wenn man die Versuchsperson wiederholt zur Entspannung (etwa in der Art des Erschlaffungs-trainings) auffordert, schalteten wir in einer Versuchsreihe absichtlich derartige Ablenkungen ein. Da die Aufforderung zur Entspannung im Versuch nur durch kurze Zurufe erfolgen konnte, war die Versuchsperson

jeweils vor dem Versuch über die Bedeutung unterrichtet worden, sie war also gewissermaßen psychisch vorbereitet, unterlag keiner Schreckreaktion und wußte, daß die Aufgabe möglichst ohne Unterbrechung fortzusetzen war. In der Tat reagierten die meisten Versuchspersonen auf diese Zurufe recht gut, die fortlaufende Folge der Muskel-AS brach jäh ab, doch nur für Sekunden (Abb. 7 b). Sofern die geistige Arbeit dabei ohne längere Unterbrechung fortgesetzt wurde, sofern sich also die Versuchsperson durch den Zwischenruf nicht „aus dem Konzept“ bringen ließ, stiegen auch die AS in sehr kurzer Zeit wieder auf die alten Werte an. Nur sehr erregbare Personen reagierten u. U. mit längeren Veränderungen (Abb. 7 c), dabei aber auch gleichzeitig mit deutlichem Nachlassen der geistigen Leistung. Als Kennzeichen der allgemeinen Labilität markierten sich während des Versuches manchmal feine tremorähnliche Bewegungen (siehe das Mechanogramm der Abb. 7 c), diese waren zwar durch äußere Beobachtung nicht wahrzunehmen, mit der empfindlichen Meßtechnik aber deutlich zu verfolgen.

Bleiben bei der Registrierung, wie wir es oben für eine Reihe von Fällen beschrieben, die zusammengehörigen AS-Serien als stufenförmig zu- und abgeschaltete Reihen erkennbar, so wird der Einfluß des „Störungseffektes“ auf die Aktivität einzelner Fasereinheiten besonders deutlich. Abb. 7 d bringt den Anfang eines solchen Versuches, in dessen Verlauf beim Signal E die Aufforderung an die Versuchsperson erging, die Muskeln entspannt zu halten. Nach kurzer, zuckender Bewegung (siehe Mechanogramm!) leistet die Versuchsperson der Aufforderung Folge, sie denkt einige Augenblicke an die erschlaffende Muskulatur, und die Additionsleistung geht zurück. Gleichzeitig läßt die Muskelaktivität objektiv nach, man erkennt im Bilde, wie nacheinander die Faser-AS verschwinden, nur einige wenige Fasereinheiten bleiben tätig. Auch hier ist der Effekt nur flüchtig; bei der ernsthaft fortgesetzten Rechenarbeit steigen die AS, jetzt weiterhin in abgesetzten Stufen erkennbar, bald wieder auf die vorherige Größe an.

Die Messungen des Energieumsatzes ergaben in allen unseren Fällen eine eindeutige Steigerung während der geistigen Arbeit. Der Steigerung folgte nach Lösung der Aufgabe ein promptes Absinken der Stoffwechselwerte, wobei die Ausgangswerte zwar nicht sofort, aber nach mehr oder weniger langer Verzögerung wieder erreicht wurden. Einen Überblick über die Meßergebnisse soll die Tab. I vermitteln, in der gleichzeitig eine kurze Charakterisierung der einzelnen Versuchspersonen gegeben wird. Ein Zusammenhang zwischen Umsatzsteigerung und körperlicher oder psychischer Konstitution kann aus den Daten kaum erschlossen werden, wengleich auffällt, daß die Resultate der 1. und 2. Versuchsreihe bei den meisten Versuchspersonen weniger differieren als ihre Abweichung vom gesamten Mittelwert. Es wäre dies immerhin

Tabelle 1. *GU-Werte und prozentuale Umsatzsteigerung bei geistiger Arbeit, nebst Angaben über die Konstitution der Vpn.*

(GU in Prozent des Sollwertes, Umsatzsteigerung in Prozent des Ist-GU, je 2 Meßreihen: I und II.)

Nr.	Vp.	G.	Alter	GU	Umsatzsteigerung		Konstitution	
					I	II	körperlich	psychisch
1	Br.	♂	28 J.	-15,0	+27,8	+18,1	mittelgroß, athletisch	sprunghaft, geschwätzig
2	G.	♂	40 „	-13,4	+15,1	+15,9	schlank, kräftig	lebendig, anregbar
3	Be.	♂	33 „	- 8,3	+24,3	+15,1	mittelgroß, normal kon- figuriert	heiter, konsequent
4	Wi.	♂	26 „	- 6,4	+11,1	+ 7,1	langhiedrig, muskulös	flott, viel- geschäftig
5	Ha.	♂	27 „	- 6,2	+12,4	+ 5,2	asthenisch, mager	zäh, energisch
6	M.	♂	29 „	- 6,2	+26,0	+17,0	muskulös	schwankend, sensibel
7	He.	♀	42 „	- 5,2	+ 8,6	+12,9	mittelklein, pyknisch	ruhig, gutmütig
8	Tr.	♀	24 „	- 2,5	+25,6	+16,8	corpulent	heiter, gemütvoll
9	R.	♂	33 „	- 1,9	+10,5	—	schlank, norm. Musk.	praktisch, verhalten
10	T.	♂	29 „	- 0,5	+23,1	+21,9	klein, typ. Pykniker	viel- beweglich
11	S.	♀	28 „	0	+11,0	—	mager, groß	fahrig, sensibel
12	D.	♀	22 „	+ 4,5	+23,0	+16,3	schlank, proportio- niert	anregbar, innerl. leicht aufgeregt.

ein Zeichen dafür, daß die Intensität der Stoffwechselreaktion für einzelne Versuchspersonen eine charakteristische Höhe erreicht.

Eine Abhängigkeit vom Wert des Ruhenüchternumsatzes, wie sie WACHHOLDER³⁶ auf Grund seiner Messungen vermutete, bestand in unseren Fällen sicher nicht. Die Tab. I wurde zur besseren Veranschaulichung dieser Verhältnisse nach steigenden GU-Istwerten angelegt. Es ist ohne graphische Darstellung mit einem Blick zu sehen, daß die Umsatzwerte bei geistiger Arbeit unabhängig vom GU streuen.

Die mittlere Umsatzsteigerung für die von uns gestellte Aufgabe errechnet sich, nach unseren sämtlichen Meßergebnissen statistisch aus-

gewertet, zu +16,6%. Die mittlere Abweichung dieses Mittelwertes liegt bei $\pm 1,4\%$, woraus nach Prüfung mit dem $t = \text{Test}$ folgt, daß die errechnete Steigerung von 16,6% signifikant ist.

Besprechung.

I. Zum Problem des Gehirnstoffwechsels bei geistiger Arbeit.

Die Tatsache der gleichzeitig einsetzenden Steigerung von Umsatz und Muskelfaser-Aktivität könnte dazu verleiten, die Stoffwechselschwankungen voll und ganz auf muskuläre Vorgänge zu beziehen und damit die strittige Frage einer Beteiligung des Gehirnstoffwechsels bei geistiger Arbeit wieder ad acta zu legen. Eine derartige Vereinfachung wäre jedoch durchaus einseitig und keineswegs statthaft. Sicher ist wohl, daß die gesteigerte Muskelaktivität zusätzliche Energie verbraucht, daß also ein *Teil* der Umsatzerhöhung auf diese Rechnung zu setzen ist. Leider sind wir bis jetzt noch nicht in der Lage, aus den AS-Registrierungen exakte quantitative Schlüsse auf die Zahl der tätigen Muskelfasern zu ziehen. Von SCHAEFER²⁹ wurde zwar kürzlich eine abschätzende Kalkulation über den Energieverbrauch bei reflektorischer Innervation eines bestimmten Prozentsatzes aller Muskelfasern angestellt. Da uns im Versuch am Menschen die Zahl der Fasern aber nicht bekannt ist, müssen wir zunächst noch auf eine genauere Berechnung von dieser Seite aus verzichten.

Man kann aber das Problem auch von der anderen Seite her angreifen und prüfen, ob die möglichen Stoffwechselschwankungen der im Vergleich zum Körper kleinen Gehirnmasse überhaupt die Größenordnung erreichen kann, welche durch die gemessenen Gesamtumsatzsteigerungen von 10—30% und mehr gegeben sind. Würde man allein die anatomischen Größenverhältnisse als Maßstab ansehen, so könnte man versucht sein, den Beitrag der grauen Hirnsubstanz zum Gesamtstoffwechsel gering zu erachten, da ihre Masse nur knapp $\frac{1}{2}\%$ der Körpermasse beträgt. Eine solche Rechnung wäre jedoch physiologisch falsch angesetzt. Alle quantitativen Vergleiche des Organstoffwechsels müssen ausgehen von dem lokalen Ruhebedarf, und dieser stellt beim Gehirn, wie wir schon seit den Untersuchungen WINTERSTEINS³⁴ u. a. wissen, eine erstaunlich hohe Quote des Gesamtumsatzes dar. Mit den auf verschiedenen Wegen ermittelten Zahlen für den Sauerstoffverbrauch des Gehirns sind wir heute in der Lage, einigermaßen verlässliche Berechnungen anzustellen, wenn auch die Daten der einzelnen Autoren je nach der Meßmethode um einiges differieren.

Die aus neueren Arbeiten stammenden Werte für den O_2 -Verbrauch des Gehirns liegen etwa zwischen 2 und $7 \text{ cm}^3 O_2/\text{min}$, bezogen auf 100 g Hirnsubstanz. Dieser Bereich läßt sich noch einengen, wenn wir die Versuche unter Narkosewirkung unberücksichtigt lassen, da jede Narkose

den Gehirnstoffwechsel erheblich erniedrigt (NOELL u. SCHNEIDER²⁶). Für den nichtnarkotisierten Warmblüter nähern sich die gefundenen Resultate weitgehend an: GEIGER u. MAGNES⁷ finden bei der Katze 3—5 cm³/min, SCHMIDT, KETY u. PENNOS³¹ beim Rhesusaffen 2,5 bis 4,5 cm³/min und KETY u. SCHMIDT¹⁶ in einer Untersuchung am Menschen mit dem Lachgasverfahren einen Mittelwert von 3,3 cm³/min, immer auf 100 g Gehirnmasse bezogen. OPITZ²⁸ hat die bis dahin bekannten Daten benutzt, um weitere quantitative Rückschlüsse auf die O₂-Versorgung des Gehirnes zu ziehen. Nach seiner Berechnung, der er das Atmungsverhältnis 5:1 von grauer zu weißer Substanz zugrunde legt, verbrauchen 100 g der grauen Substanz etwas über 7 cm³/min. Da OPITZ von der Basis 5 cm³/min für das graue Hirn (Maximalwert bei GEIGER u. MAGNES) ausging, liegen seine Berechnungen vielleicht ein wenig zu hoch, worauf er selber bereits hinwies. Nehmen wir den Durchschnittswert von 3,5 cm³/min, der allen obigen Angaben am besten gerecht wird, als wahrscheinlich an, so ergibt sich als Normalverbrauch für die graue Substanz, auf die es in unserem Zusammenhang ankommt, die Menge von rund 5 cm³ O₂/min/100 g Masse.

Veranschlagen wir nunmehr die graue Substanz eines mittelschweren Menschen (60 kg) auf 300 g, so wäre ihr Ruhebedarf $3 \times 5 = 15$ cm³ O₂/min. Damit würde die aktive Hirnsubstanz in Ruhe ungefähr 7% des vom Körper aufgenommenen Sauerstoffs verzehren, wenn wir den GU auf 1500 Kal/Tag bemessen. Die relative Höhe dieser Werte wird anschaulich, wenn man sich vergegenwärtigt, daß der Verbrauch im ruhenden Skelettmuskel nur etwa 0,5 cm³/min auf 100 g beträgt.

Bei diesem enorm hohen O₂-Bedarf müssen wir an sich mit der Möglichkeit rechnen, daß Steigerungen des lokalen Umsatzes bei Messung des Gesamtstoffwechsels merklich mit in Erscheinung treten. Stiege beispielsweise in der grauen Substanz der Umsatz auf das 3fache, so würde das im Zuge der obigen Rechnung einen Mehrverbrauch von $2 \times 7 = 14\%$ des GU bedeuten. Dieser Wert läge somit im Bereich der von uns und anderen Autoren tatsächlich gemessenen Zahlen. Ist es nach unserer Kenntnis vom lokalen Gehirnstoffwechsel nun möglich bzw. wahrscheinlich, daß dieser bei Aktivität um ein mehrfaches steigt?

Experimentell hat man sich um die Beantwortung dieser Frage mehrfach bemüht, doch reichen die vorliegenden Ergebnisse für eine abschließende Beurteilung nicht aus. Tierversuche können naturgemäß nur mit Vorbehalt verwertet werden. Am isolierten ZNS hat man versucht, das Gehirn durch künstliche Reize (direkte elektrische oder reflektorische Reizung) zu erregen, aber nur bei direkter totaler Reizung (WINTERSTEIN u. HIRSCHBERG³⁵) oder nach Strychninvergiftung (LEDEBUR¹⁹) war eine stärkere Stoffwechselsteigerung festzustellen. GEIGER u. MAGNES, welche Katzen im Wach- und Schlafzustand untersuchten,

fanden im Wachzustand mit Spontanbewegungen einen Mehrverbrauch von etwa $1 \text{ cm}^3 \text{ O}_2/\text{min}$ für 100 g Gehirn gegenüber dem Schlafzustand, was einer lokalen Umsatzsteigerung auf das $1\frac{1}{3}$ fache entspräche. Ähnliche Werte geben SCHMIDT, KETY u. PENNES³¹ für Rhesusaffen an, die höchste von diesen Autoren gemessene Steigerung erreichte $6,5 \text{ cm}^3 \text{ O}_2/\text{min}$ auf 100 g Gehirn, sie erfolgte aber bereits unter abnormen Bedingungen (Cardiazolschock mit heftigen Muskelkrämpfen!). Also selbst unter diesen extremen Verhältnissen mit höchster Anspannung der Muskulatur steigt der lokale Umsatz im Gehirn noch nicht auf das Doppelte. Eine Steigerung auf das Dreifache, wie wir sie oben hypothetisch in Ansatz brachten, ist somit bei einem ruhig liegenden Menschen sehr unwahrscheinlich, will man nicht annehmen, daß ganz außergewöhnliche energetische Prozesse durch den Denkprozeß ausgelöst werden, die sich bisher unserer Nachprüfung entziehen. Die wenigen direkten Messungen des Gehirnstoffwechsels am Menschen lassen jedenfalls keine größeren Schwankungen erkennen, der lokale Umsatz erwies sich als unabhängig von körperlichen Veränderungen (SCHEINBERG u. STEAD³⁰), und auch psychische Belastungen in Form von Angstzuständen veränderten den Gehirnstoffwechsel nicht.

Es hat somit nicht den Anschein, als ob das Gehirn im Rahmen seiner normalen Tätigkeit Energieumsatz-Schwankungen vollführt, die ein Mehrfaches des „Ruhewertes“ betragen. Durch unsere Versuche ist die tonische Muskelinnervation als wesentlicher Anteil beim Energiestoffwechsel hervorgetreten, womit nicht ausgeschlossen, ja sogar wahrscheinlich ist, daß andere Organsysteme sich noch beteiligen. Wenn auch die quantitativen Verhältnisse bis jetzt noch unsicher sind, so dürfte doch klargemacht sein, daß der vermehrte Energieverbrauch bei geistiger Arbeit den ganzen Körper betrifft, und nicht isolierte Vorgänge im Gehirn.

II. Die Bedeutung affektiv-emotionaler Komponenten und der Willensanspannung.

Beim Vergleich unserer Meßergebnisse mit den sehr unterschiedlichen Angaben in der Literatur ist die relative Einheitlichkeit unserer Versuche auffallend. Wir glauben, daß wir dieses einheitliche Ergebnis der speziellen psychologischen Versuchsmethodik verdanken. Die gestellten Aufgaben waren keine höheren geistigen Leistungen, zum mindesten nicht im schöpferischen Sinne. Trotzdem bedeuteten sie für die Versuchsperson eine Anstrengung, für die meisten sogar eine recht unangenehme Form der Anstrengung. Andererseits wollte sich keine Versuchsperson der Blamage aussetzen, die einfachen Additionen nicht richtig ausführen zu können, so daß von vornherein ein Wille zur geforderten Leistung geweckt war. Diese emotionalen und willensmäßigen Komponenten dürften bei allen Versuchspersonen in ähnlicher Weise mitgewirkt haben,

unabhängig vom geistigen Niveau. Wir möchten annehmen, daß gerade diesen begleitenden psychischen Faktoren eine wesentliche Bedeutung bei der Erhöhung der tonischen Muskelinnervation zukommt.

Es erscheint uns angebracht, hier ganz allgemein auf die starke Beteiligung der Affekte bei Untersuchungen geistiger Leistungen hinzuweisen. Seit langem ist bekannt, daß seelische Erregungen Fieber erzeugen können, wie man den Darstellungen von ALLERS¹ und von HEYER¹² entnehmen kann. Den bei starker seelischer und geistiger Anspannung ansteigenden O₂-Verbrauch verfolgte HITCHCOCK¹³ an Examenskandidaten während einer mehrmonatigen Prüfungszeit. Dabei sah er dauernde GU-Erhöhungen, auch an Tagen ohne besondere geistige Leistungen; erst nach guter Beendigung der Prüfung kehrten die Stoffwechselwerte schlagartig zur Norm zurück. Analoge Umsatzsteigerungen verzeichneten MITTELSHED u. NOWAKOWSKAYA²⁴ bei Personen, die mit schwierigen Vorträgen öffentlich auftreten mußten und sich dieserhalb in psychischer Spannung befanden.

Aus dem alltäglichen Leben ist uns überdies geläufig, daß seelische Spannungen zu gesteigerter „Nervosität“ und zu Stoffwechselstörungen führen können. In einer früheren Mitteilung (GÖPFERT⁸) wurde über Stoffwechseluntersuchungen an solchen „nervösen“ Menschen berichtet, welche häufig wegen Verdacht auf Hyperthyreose eingewiesen werden. Die Steigerungen des GU lagen bei diesen Menschen im Bereich von 10—25%, also in der gleichen Größenordnung wie die Umsatzerhöhungen unserer geistigen Testversuche. Interessant ist, daß die an sich sehr unsteten und wechselnden Bilder des reflektorischen Muskeltonus der „Nervösen“ oft in ähnlicher Form auftreten wie sie in Abb. 6a wiedergegeben sind: ein allmähliches Anwachsen der AS bis zu einem Höhepunkt und anschließendem raschen Abfall. Vielleicht sind solche Formen so zu interpretieren, daß die Patienten oder Versuchspersonen sich in bestimmte Erregungen hineinsteigern, die dann plötzlich abklingen, wenn die Gedanken auf einen anderen Gegenstand überspringen.

Wir sind uns bewußt, daß wir mit unseren Versuchen nur einen schmalen Bereich der psychischen Aktivität erfaßt haben und daß wir bei der Deutung individueller Reaktionen erst in den Anfängen stehen. In großen Zügen haben wir die Gründe für die Unterschiedlichkeit der experimentellen Befunde überblickt. Weitere Erkenntnisse erscheinen uns möglich durch Anwendung spezieller psychologischer Testverfahren, über die in anderem Rahmen berichtet wird.

Zusammenfassung.

Von 12 Vpn. wurden in wiederholten Versuchen bestimmte geistige Leistungen (nach Art des KRAEPELINSchen Rechentestes) verlangt, wobei gleichzeitig der Energieumsatz und die tonische Muskelinnervation

gemessen wurden. Körperlich lagen die Vpn. entspannt unter Grundumsatzbedingungen; der Umsatz wurde vor, während und nach dem geistigen Arbeitsversuch gemessen. Die tonische Muskelinnervation wurde durch fortlaufende Registrierung der AS mit besonders empfindlicher Verstärkeranordnung (n. GÖPFERT⁹) an verschiedenen Muskelpartien des Körpers verfolgt, wobei sich die deutlichsten Schwankungen an den Unterarmen zeigten.

Bei allen Vpn. stieg der Gesamtstoffwechsel während der geistigen Arbeit wesentlich an, im Durchschnitt um 16,6%. Gemäß der statistischen Prüfung betrug die mittlere Abweichung dieses Mittelwertes 1,4%, die Steigerung ist also signifikant.

In allen Fällen nahmen auch die reflektorisch-tonischen Muskel-AS während der geistigen Tätigkeit an Zahl und Höhe erheblich zu. Das Ausmaß dieser Reaktion war offensichtlich abhängig von der Erregbarkeit und vom Leistungswillen jeder Vp., weniger vom geistigen Niveau. Sehr erregbare Vpn. antworteten sofort bei Beginn der Aufgabe mit schnell aufschießenden AS; phlegmatische Temperamente reagierten erst nach gewisser Latenzzeit, wobei aber auch die geistigen Leistungen verzögert waren. Die Potentiale blieben während der Prüfzeit meist nicht auf gleicher Höhe, häufige starke Schwankungen waren die Regel, auch Unterbrechungen und unregelmäßige Periodenbildungen wurden gesehen. Auf äußere Störungen oder Aufforderungen trat bei einer Reihe von Vpn. eine vorübergehende Entspannung ein, die aber bei Fortsetzung der Aufgabe nur kurze Zeit anhielt.

Aus den Versuchen geht hervor, daß die bei geistiger Arbeit auftretenden Umsatzerhöhungen zu einem wesentlichen Anteil auf begleitenden Steigerungen der Muskelinnervation beruhen. Auf den Gehirnstoffwechsel selbst kann nur ein kleinerer Anteil entfallen, wie eine überschlagende Berechnung an Hand der bisher bekannten experimentellen Daten lehrt. Auf die Mitbeteiligung affektiv-emotionaler Faktoren wird hingewiesen, wobei kurz die Ähnlichkeit der Tonusbilder bei seelischen Spannungszuständen anderer Art angedeutet wird.

Literatur.

- ¹ ALLERS, R.: Z. Neur. 19, 209 u. 321 (1920). — ² ATWATER, W. O., WOOD and F. G. BENEDICT: US. Dep. of Agriculture Bull. 44, (1897). — ³ BENEDICT, F. G., and T. M. CARPENTER: US. Dep. of Agriculture Bull. 508 (1909) u. Carnegie Publ. N. 261 (1918). — ⁴ CHLOPIN u. OKUNESKY: Arch. f. Hyg. 91, 317 (1922). — ⁵ CHLOPIN, JAKUWENKO u. WOLSCHINSKY: Arch. f. Hyg. 98, 158 (1927). — ⁶ DAVIS, R.: J. exper. Psychol. 53, 141 (1938). — ⁷ GEIGER, A., u. J. MAGNES: Amer. J. Physiol. 149, 517 (1947). — ⁸ GÖPFERT, H.: Verh. d. Ges. inn. Med. 26, 237 (1951). — ⁹ GÖPFERT, H.: Pflügers Arch. 256, 142 (1952). — ¹⁰ GÖPFERT, H., u. R. STUF-
LER: Pflügers Arch. 256, 161 (1952). — ¹¹ GRAFE, E.: Bethe-Bergmann Hdbch. V, p. 199ff. — ¹² HEYER, G. K.: Das körperlich-seelische Zusammenwirken in den Lebensvorgängen, München 1925. — ¹³ HETCHEOCK, F. A.: Amer. J. Physiol. 90, 390

(1929). — ¹⁴ IHLSHÖFER, H.: Arch. f. Hyg. **94**, 317 (1924). — ¹⁵ JOHANSSON: Scand. Arch. Physiol. **8**, 85 (1898). — ¹⁶ KETY, S. S., u. C. F. SCHMIDT: Fed. Proc. II **5**, 55 (1946). — ¹⁷ KNIPPING, H. W.: Z. Biol. **77**, 165 (1922). — ¹⁸ KRAEPELIN, E.: Psychol. Arb. **1**, 1 (1896). — ¹⁹ LEDEBUR, J. v.: Pfügers Arch. **517**, 235 (1927). — ²⁰ LEHMANN, G.: Oppenh. Hdb. Biochem. Erg. Bd. **5**, 783 u. 868 (1934). — ²¹ LEHMANN, G.: Arb. Physiol. **11**, 253 (1941). — ²² v. LIEBERMANN, L.: Biochem. Z. **173**, 180 (1927). — ²³ LOEWY, A.: Berl. klin. Wschr. **28**, 434 (1891). — ²⁴ MITTELSHED, A., u. E. NOVOKOWSKAYA: Arch. biol. Nauk. **42**, Nr. 3, 119. — ²⁵ MÜLLER, E. A., H. MICHAELIS u. A. MÜLLER: Arb. Physiol. **12**, 192 (1942). — ²⁶ NOELL, W., u. M. SCHNEIDER: Pfügers Arch. **520**, 35 (1948). — ²⁷ OEHRN, A.: Psychol. Arb. **1**, 99 (1896). — ²⁸ OPITZ, E.: Naturwissensch. **35**, 80 (1948). — ²⁹ SCHAEFER, H.: Ärztl. Forschung **3**, 185 (1949). — ³⁰ SCHEINBERG, P., u. E. A. STEAD: J. Clin. Invest. **28**, 1163 (1949). — ³¹ SCHMIDT, C. F., S. S. KETY u. H. H. PENNES: Amer. J. Physiol. **143**, 33 (1945). — ³² SHAW, W. A.: Arch. of Psychol. **547**, 1 (1940). — ³³ SPECK, C.: Physiologie des menschlichen Atmens, Leipzig 1902. — ³⁴ WINTERSTEIN, H.: Bethe-Bergmanns Hdb. IX, p. 515. — ³⁵ WINTERSTEIN, H., u. H. HIRSCHBERG: Pfügers Arch. **216**, 271 (1927). — ³⁶ WACHHOLDER, K.: Z. inn. Med. (Leipzig), **1**, Heft 5/6 (1946) und Verh. d. Ges. inn. Med. **55**, 336 (1949).

Dozent Dr. Dr. HERBERT GÖPFERT,
 Physiologisches Institut der Universität Heidelberg, Akademiestr. 3.