

Permanente rhythmische Mikrobewegungen des Warmblüter-Organismus („Mikrovibration“)

Von H. ROHRACHER, Wien

Der Körper des Menschen wird während des ganzen Lebens ununterbrochen von mikroskopisch kleinen rhythmischen Impulsen erschüttert. Die Größe dieser Erschütterungen liegt im Ruhezustand beim erwachsenen Menschen zwischen 0,5 und 3 μ , ihr Rythmus zwischen 7 und 13 pro Sekunde. Es bereitet keine Schwierigkeiten, diese Mikrobewegungen, die ich im Jahre 1943 zum ersten Male feststellte und als „Mikrovibration“ (oder „Körperschwingung“) bezeichnete, durch Anlegen eines Impulsaufnehmers in elektrische Spannungsschwankungen zu übertragen und graphisch zu registrieren. Jede Art von Bewegungs- oder Schwingungsaufnehmern ist dazu geeignet. In den bisherigen Untersuchungen wurden piezoelektrische Aufnehmer (z.B. Schallplatten-Pick-ups), elektrodynamische Systeme (z.B. Philips Erschütterungsaufnehmer PR 9260) sowie kapazitive und photoelektrische Methoden verwendet. Zur Verstärkung und Registrierung sind alle Kardiographen und Elektroenzephalographen benützbar. Direkte mikroskopische Registrierungen der Mikrovibration ohne elektrische Zwischenglieder mit Hilfe einer am Körper aufgeklebten beleuchteten Spaltblende wurden von A. MARKO [11] durchgeführt.

Die Registrierung der Mikrovibration ergibt Bilder von ununterbrochenen Serien größerer und kleinerer Schwingungen, die in unregelmäßiger Folge wechseln. Lange Serien von regelmäßigen Schwingungen mit gleichbleibender Amplitude sind selten; meist treten schon im Laufe einer Sekunde Schwingungen von sehr verschiedener Größe auf. Auch ihre Form bleibt nicht gleich; neben reinen oder angenäherten Sinusformen findet man nicht selten auch Verzerrungen und Überlagerungen. Fig. 1 zeigt Beispiele von vier Personen. Wird die Mikrovibration in der Nähe von Arterien abgenommen, so zeigt das Schwingungsbild oft eine klare Gliederung im Pulsrhythmus, wodurch die Auswertung der Kurve erschwert oder überhaupt unmöglich gemacht werden kann. Als Standard-Abnahmestelle wurde aus praktischen Gründen in den meisten Untersuchungen die Dorsalseite des linken Unterarms gewählt, weil sie leicht zugänglich ist und weil die Entspannung des Unterarms der sitzenden Versuchsperson im allgemeinen keine Schwierigkeiten bereitet.

Nach den bisherigen Registrierungen — an mehr als 900 Personen — steht es außer Zweifel, daß die Mikrovibration von der Geburt bis zum Tode (genauer: bis einige Zeit nach dem Tode) immer und ununterbrochen vorhanden ist; sie setzt auch nicht eine Zehntel Sekunde aus. Auch im Zustand möglicher Muskelentspannung, im tiefen Schlaf und in der Narkose bleibt die Mikrovibration ununterbrochen bestehen; es vermindert sich lediglich ihre Amplitude (Fig. 2 und 3). Der Tod führt nicht sofort zum Aufhören der Mikrovibration; in Versuchen mit Meerschweinchen blieb sie — auch nach Durchtrennung der medulla

oblongata oder nach Exstirpation des Herzens — mit abnehmender Amplitude und zunehmenden Leerphasen noch 50 bis 70 Minuten erhalten.

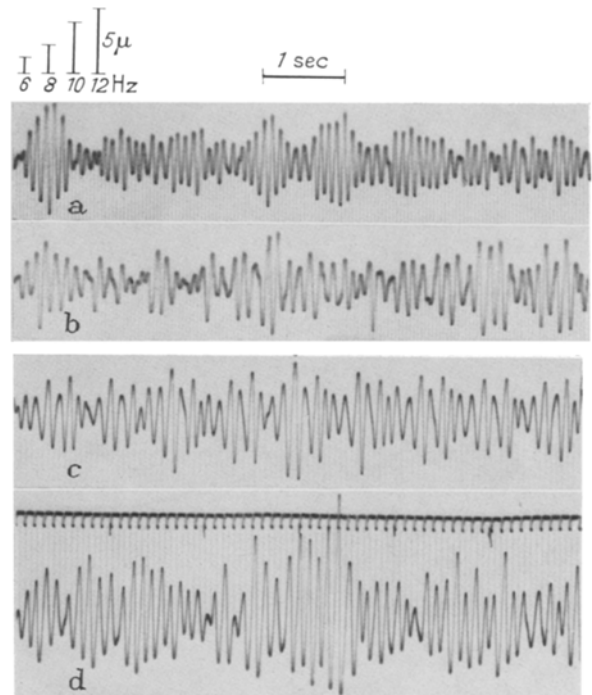


Fig. 1. Mikrovibration von vier Personen, abgenommen vom dorsalen Unterarm bei möglicher Entspannung. a und b mit Philips-Erschütterungsaufnehmer, c und d mit einem Kristall-Pick-up

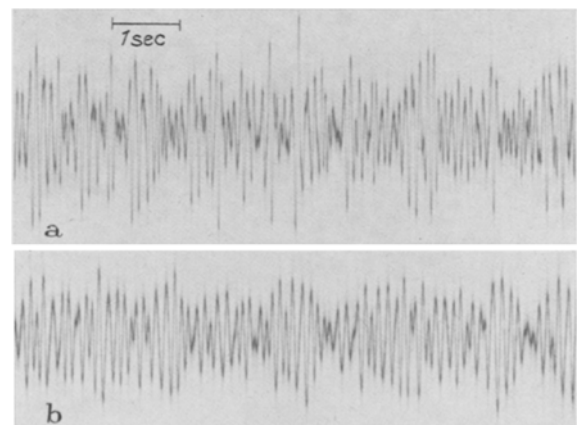


Fig. 2. Mikrovibration im Schlaf. a Wachzustand; b Schlaf

Merkmale der Mikrovibration

Frequenz. Die Frequenz der Mikrovibration (im folgenden mit „MV“ abgekürzt) liegt nach Auszählungen an Registrierungen von 312 Personen zwischen 7 und 13 Hz mit einer sehr starken Häufung (etwa 80%) zwischen 8 und 12 Hz (Fig. 4). Die auffällige Frequenzgleichheit mit den Alpha-Wellen des Gehirns konnte bisher nicht aufgeklärt werden. Die MV-Frequenz ist

nicht an allen Körperstellen gleich; große Muskeln scheinen nach den bisher durchgeführten Messungen niedrigere Frequenzen aufzuweisen als Körperregionen mit kleinen Muskeln. Höhere Frequenzen (13 bis 17 Hz) treten beim gesunden Menschen manchmal als vorübergehende Einstreuungen auf; ständig vorhanden sind sie unter pathologischen Verhältnissen (z.B. bei

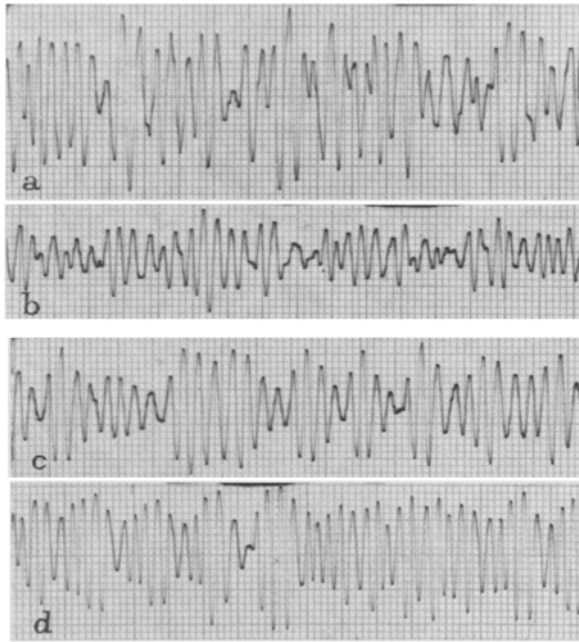


Fig. 3. Mikrovibration in Narkose. *a* Wachzustand; *b* Narkose (Pentothal und Lysthenon); *c* Wachzustand; *d* Narkose (Pentothal und Lachgas)

Fieber und Hyperthyreosen). Unmittelbar nach der Geburt und auch noch einen Tag nachher liegt die MV-Frequenz bei 5 bis 9 Hz. Bei großen Säugetieren (Hund, Rind, Elefant) findet man im allgemeinen dieselben Frequenzen wie beim Menschen; bei sehr kleinen Säugern (z.B. Mäusen) und bei Vögeln ist die Frequenz höher (16 bis 34 Hz). Umfassende Untersuchungen

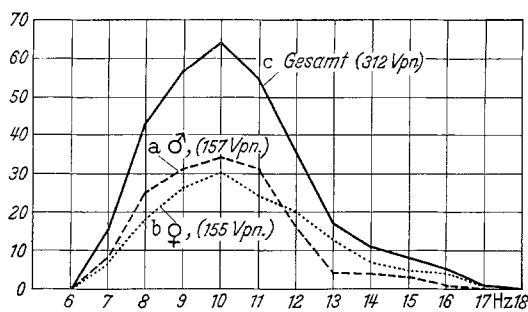


Fig. 4. Frequenzverteilung der Mikrovibration bei 312 Personen

über Beziehungen zwischen MV-Frequenz und Körpergröße liegen noch nicht vor. Über Frequenzänderungen bei Temperaturwechsel wird später berichtet.

Amplitude. Die MV-Amplitude schwankt in weiten Grenzen. Messungen mit einem Philips-Gerät, das die Umrechnung der Amplituden in Mikron ermöglicht, ergaben bei bequem sitzenden Versuchspersonen am dorsalen Unterarm 0,5 bis 3 μ , manchmal weniger. Die direkte mikroskopische Messung führte zu etwas niedrigeren Werten. Bei willkürlicher Muskelspannung steigt die MV-Amplitude bis zum Zehnfachen des Entspannt-Wertes, manchmal noch weiter. Schon zwischen Stehen und Sitzen bestehen signifikante Ampli-

tudendifferenzen (bei 7 Personen im Mittel 5,4 zu 3,1 μ , an der Schulter gemessen). Bei Hypotonie liegt die MV-Amplitude unter dem Durchschnitt, bei Hypertonie darüber; bei Polyarthrit ist sie auf der kranken Seite größer als auf der gesunden [18].

Wirkung psychischer Faktoren. Psychische Spannung und Erregung bewirkt Vergrößerung der MV-Amplitude (untersucht mit Testaufgaben, Ankündigung eines elektrischen Schlages, Schreckreizen). Die Größe der Amplitudenzunahme ist individuell sehr verschieden (zwischen 30 und 60% des Entspanntwertes). Plötzliches Einsetzen von Lärm (Starten eines Benzinmotors) führt bei den meisten Menschen ebenfalls zu einer Amplitudensteigerung.

Körperliche Anstrengung. Unmittelbar nach anstrengender körperlicher Arbeit (z.B. nach 15 min Tretarbeit am Fahrrad-Ergometer) ist die Amplitude stark erhöht (bei 33 Personen am M. brachioradialis im Durchschnitt um 65,4%, am M. quadriceps um 49,8% gegenüber der Amplitude vor der Arbeit); sie geht nur langsam auf den Normalwert zurück (in etwa 10 min) [6]. Schon die bloße Vorstellung von Bewegungen (Faustballen, Aufspringen) genügt, um die MV-Amplitude beträchtlich zu erhöhen (in 282 Versuchen im Durchschnitt um 69,6% des Entspanntwertes) [10].

Pharmakologische Ergebnisse. Muskelrelaxantia vermindern die MV-Amplitude bis auf ein Drittel des Normalwertes; dies gilt für Lysthenon [13c] sowie für Meprobamat und Carisoprodol [8]. Zahlreiche Pharmaka wurden in Japan unter der Leitung von SUGANO auf ihre MV-Wirkung untersucht, wobei sich unter anderem ergab: Curare reduziert die Mikrovibration bis auf ein Minimum, zentralnervöse Stimulantia (Micoren, Metrazol u. a.) erhöhen die MV-Amplitude, zentralnervöse Sedativa (Pentothal, Urethan u. a.) vermindern sie sehr beträchtlich (mit Ausnahme von Morphium). Vegetativ wirksame Pharmaka (Acetylcholin, Atropin, Ergotamin u. a.) führen zu uneinheitlichen Effekten; Ganglienblocker (Nikotin, Procain u. a.) reduzieren die MV-Amplitude [16].

Ursache der Mikrovibration

Auf Grund der oben berichteten Resultate ist nicht daran zu zweifeln, daß die Mikrovibration durch Muskelkontraktionen entsteht. Jede willkürliche oder unwillkürliche und ebenso jede pharmakologische Änderung der Muskelspannung führt zu Änderungen der MV-Amplitude. Ein direkter Beweis für die muskuläre Entstehung der Mikrovibration wurde von SUGANO im Tierversuch erbracht; er konnte zeigen, daß nach Unterbrechung der motorischen Innervation die Mikrovibration in der betroffenen Extremität nahezu verschwindet [16]. Auch die Frequenz der Mikrovibration spricht für ihre muskuläre Entstehung; die Aktionsströme menschlicher Muskeln liegen im gleichen Bereich wie die MV-Frequenz (die Aktionsstrom-Frequenz beträgt nach DENNY-BROWN [3] 5 bis 10 Hz, nach LINDSLEY [9] 5 bis 11 Hz, nach GUALTIEROTTI und MILLA [7] 6 bis 14 Hz).

Aus der Feststellung, daß die Mikrovibration durch Muskelkontraktionen entsteht, ergibt sich die zwingende Folgerung, daß solche Kontraktionen ununterbrochen stattfinden; denn die Mikrovibration setzt nie aus. Die MV-Registrierung erweist sich somit als feinere und verlässlichere Methode zur Untersuchung

der Muskelaktivität als die Aktionsstrom-Registrierung, die bei entspannter Muskulatur und im Schlaf keine Resultate ergibt („Im entspannten normalen Muskel läßt sich keine elektrische Aktivität nachweisen“ [2, S. 11]; „Im tiefen Schlaf lassen sich von den Skelettmuskeln keine Aktionspotentiale ableiten; sie sind in Ruhe“ [12, S. 473]). Die Annahme, daß es in unserer Muskulatur jemals einen „Ruhezustand“ gebe, ist durch die MV-Registrierungen widerlegt; ununterbrochen finden Kontraktionen statt, und nicht einmal im Schlaf oder in der Narkose besteht auch nur für Bruchteile einer Sekunde wirkliche „Ruhe“ in unserer Muskulatur.

Genauere Vorstellungen über die Art der ständigen Kontraktionen, die der Mikrovibration zugrunde liegen, lassen sich aus bekannten physiologischen Tatsachen ableiten. Es kann sich dabei nicht um eine dauernde schwache Kontraktion der Gesamtmuskulatur handeln (diese Annahme würde dem „Alles-oder-Nichts“-Gesetz widersprechen, nach welchem die Muskelfaser nur zu maximaler Kontraktion fähig ist), sondern um alternierende Kontraktionen einzelner, ständig wechselnder Muskelfasern; d.h., es finden ununterbrochen Kontraktionen statt, doch ist an ihnen jeweils nur eine relativ kleine, in ihrer Verteilung über die Gesamtmuskulatur ständig wechselnde Anzahl von Muskelfasern beteiligt. Die außerordentlich kleinen Muskelbewegungen, die durch diese permanente, über den ganzen Körper verteilte Muskelaktivität entstehen, übertragen sich auf die Knochen und auf die übrigen, nicht-muskulären Teile des Körpers, so daß daraus eine dauernde Mikrobewegung des ganzen Körpers resultiert — eben die Mikrovibration. Im Interesse einer klaren Begriffsbildung ist es zweckmäßig, die beiden Vorgänge genau zu unterscheiden: Mikrovibration ist die ununterbrochene Mikrobewegung des ganzen Körpers im Rhythmus von 7 bis 13 Hz; ihre Ursache besteht in dauernden, über die gesamte Muskulatur wechselnd verteilten Einzelkontraktionen, die man, um einen kürzeren Ausdruck zur Verfügung zu haben, am besten als „permanente alternierende Muskelaktivität“ bezeichnet.

Die permanente alternierende Muskelaktivität ist nicht direkt nachweisbar, sondern eine — allerdings zwingende — Folgerung aus der Tatsache der Mikrovibration. Ein direkter Nachweis dieser Aktivität ließe sich wahrscheinlich durch Versuche erreichen, bei denen an Stelle der breitflächigen, etwa 0,5 cm² großen Abnehmer zur Registrierung der Mikrovibration nadelförmige Pick-ups verwendet werden. In einigen Experimenten mit solchen Pick-ups zeigten sich nur sehr kleine kontinuierliche Schwingungen, die von Zeit zu Zeit von sehr großen Einzelzuckungen unterbrochen waren. Es ist wahrscheinlich, daß in diesen Fällen mit der spitzen Nadel des Pick-up die Kontraktionsbewegungen einer einzelnen Muskeleinheit erfaßt wurden, während mit der größeren Aufnahmefläche immer die Kontraktionen vieler motorischer Einheiten und dazu noch die Mitbewegungen ihrer Umgebung erfaßt werden.

Über die Art oder die Richtung der Mikrovibrations-Bewegungen läßt sich nichts Genaues sagen. Versuche, eine bevorzugte Richtung zu finden, blieben trotz vieler Bemühungen erfolglos; man findet Mikrobewegungen nach jeder Richtung. Dieses Resultat war zu erwarten; wenn in den einzelnen Muskeln mit

ihren verschiedenen Bewegungsrichtungen gleichzeitig Kontraktionen stattfinden und die daran beteiligten Muskelfasern von Augenblick zu Augenblick wechseln, so kann daraus nur eine ungeordnete und ungerichtete Bewegung des ganzen Körpers entstehen, in der lediglich der Bewegungsrhythmus einigermaßen erhalten bleibt. Man wird daher den tatsächlichen Verhältnissen wahrscheinlich am nächsten kommen, wenn man die Mikrovibration als ununterbrochene Schüttelbewegung, als permanente „Mikro-Erschütterung“ des ganzen Körpers auffaßt (man könnte sie geradezu als einen „bio-seismischen“ Vorgang bezeichnen). Es ist naheliegend, in diesem Zusammenhang an die verschiedenen Formen des makroskopischen Tremors zu denken, der den Körper, wenn er sehr intensiv auftritt, ebenfalls in Schüttelbewegungen versetzt. Es besteht kein grundsätzlicher Einwand gegen die Auffassung, daß die Mikrovibration einen ununterbrochenen, bisher unbekanntem „Mikro-Tremor“ darstelle; in einigen japanischen Untersuchungen wird an Stelle des Namens „Mikrovibration“ die Bezeichnung „minor tremor“ verwendet. Zur Vermeidung begrifflicher Unklarheiten ist es jedoch zweckmäßiger, den Ausdruck „Mikrovibration“ beizubehalten, weil zwischen ihr und dem makroskopischen Tremor wesentliche Unterschiede bestehen. Tremor tritt beim gesunden Menschen immer nur vorübergehend als Reaktion auf bestimmte Reizsituationen (Erregung, Kälte) auf, während die Mikrovibration ununterbrochen vorhanden ist (sie ist keine Reaktion, sondern eine biologische Aktion des Organismus); der makroskopische Tremor (auch der pathologische z.B. bei Parkinsonscher Erkrankung) verschwindet im Schlaf und in der Narkose, während die Mikrovibration in beiden Fällen kontinuierlich bestehen bleibt. Dazu kommen Unterschiede in Amplitude und Frequenz: die Amplitude des Tremors ist etwa tausendmal größer als diejenige der Mikrovibration, und die Frequenz des Tremors bleibt in engen Grenzen gleich, während sie bei der Mikrovibration einer Regulation unterliegt (darüber wird unten berichtet). Aus diesen Gründen empfiehlt es sich, Mikrovibration und Tremor begrifflich genau zu unterscheiden.

Mikrovibration und Konstanz der Körpertemperatur

Mikrovibrationsuntersuchungen an verschiedenen Tierarten führten zu einem überraschenden Resultat: die Mikrovibration besteht nur bei warmblütigen Lebewesen; bei Kaltblütern ergeben die Registrierungen — auch bei erhöhter Verstärkung — gerade, schwingungsfreie Striche. Es wurde eine große Zahl von Tieren untersucht: Mäuse, Meerschweinchen, Kaninchen, Hunde, Schafe, Schweine, Rinder, Elefanten und ein Nilpferd sowie verschiedene Vogelarten als Vertreter der homoiothermen Gruppe, Schnecken, Frösche, Kröten, Land- und Riesenschildkröten, Schlangen, Alligatoren, Karpfen sowie einige große Insekten als Vertreter der poikilothermen Tiere. Während bei den Warmblütern die Mikrovibration in gleicher Weise wie beim Menschen immer vorhanden war, fehlte sie bei den Kaltblütern vollkommen.

Bei den Zwischenformen zwischen Warm- und Kaltblütern — den Winterschläfern — zeigten sich während des Winterschlafes zwischen langen vibrationsfreien Strecken nur vereinzelte, sehr kleine Mikro-

schwingungen von 6 Hz; nach Aufwecken durch Erwärmung war die Mikrovibration mit normalen Amplituden und etwas höherer Frequenz (6,5 Hz) kontinuierlich vorhanden (Fig. 5).

Diese Feststellungen berechtigen zu der Annahme, daß zwischen Mikrovibration und Temperaturkonstanz der Warmblüter Zusammenhänge bestehen. Die Tatsache, daß der Warmblüter-Organismus seine Körpertemperatur unabhängig von der Außentemperatur mit hoher Präzision konstant zu halten vermag, konnte bisher nur teilweise aufgeklärt werden. Man unterscheidet dabei zwei Faktoren: die sog. „physikalische Wärmeregulation“, die durch Verengung und Erweiterung der Blutgefäße und durch die Schweißsekretion dafür sorgt, daß die Wärmeabgabe der jeweiligen Außentemperatur angepaßt wird, und die „chemische Wärmeregulation“, die alle Stoffwechsel-



Fig. 5. Mikrovibration im Winterschlaf (Siebenschläfer). *a* im Winterschlaf; *b* nach Aufwachen durch Erwärmung.

prozesse umfaßt, aus denen Wärme entsteht. Solche Prozesse müssen ständig stattfinden, weil ständig neue Wärme gebildet werden muß, um die Verluste durch die abgegebene Wärme im richtigen Ausmaß auszugleichen. Hier liegen die offenen Probleme der Temperaturkonstanz: auf welche Weise erzeugt der Organismus — und zwar auch der ruhende oder schlafende Organismus — ununterbrochen so viel Wärme, daß die Körpertemperatur nie absinkt, und auf welche Weise erfolgt die Feinregulierung dieser Wärmeproduktion, so daß der biologisch richtige Wert bis auf Zehntelgrade genau konstant gehalten wird. Da es einerseits „unzweifelhaft ist, daß Stoffwechselveränderungen in der Skelettmuskulatur beim Zustandekommen der chemischen Wärmeregulation die Hauptrolle spielen“ ([1], S. 425), andererseits aber bei entspannter Muskulatur und im Schlaf keine Muskelaktionsströme registrierbar sind, entstand die Frage, „ob es in den Muskeln eine chemische Regulation ohne Aktion gibt“ ([5], S. 427).

Diese Frage ist durch die obigen Ausführungen beantwortet: die Muskulatur des Warmblüters ist ununterbrochen in Aktion; es finden in ihr ständig — auch in Ruhe, im Schlaf und in der Narkose — alternierende Kontraktionen statt. Eine einfache Berechnung ergibt, daß diese permanente alternierende Muskelaktivität ausreicht, um die zur Konstanthaltung der Körpertemperatur nötige Wärme zu erzeugen (dazu sind in Ruhe etwa 1700 Kalorien pro Tag notwendig): 1 g Muskulatur produziert bei 10 Zuckungen pro Sekunde 0,03 kleine Kalorien, so daß zur Erzeugung von 1700 großen Kalorien pro Tag 655 g

Muskulatur ständig in Aktion sein müssen, das ist 2,46% der Muskeln eines 70 kg schweren Menschen, dessen Muskulatur mit etwa 26,6 kg anzunehmen ist. Es genügt also, daß sich 2,5% der Gesamtmuskulatur in permanenter alternierender Kontraktion befinden, um die zur Konstanthaltung der Körpertemperatur notwendige Wärme zu erzeugen. Wie groß der Anteil der jeweils kontrahierten Muskelfasern beim ruhenden Menschen tatsächlich ist, läßt sich empirisch nicht entscheiden; da aber immer genügend Wärme produziert wird, ist anzunehmen, daß das Minimalausmaß von 2,5% nie unterschritten wird.

Damit der biologisch richtige Wert der Körpertemperatur genau eingehalten wird, muß die Wärmeproduktion in feinen Abstufungen genau reguliert werden. Die Mikrovibrations-Registrierungen lassen es wahrscheinlich erscheinen, daß bei dieser Feinregulierung ein Faktor eine Rolle spielt, der bisher nicht in Betracht gezogen wurde: die Frequenz der alternierenden Muskelkontraktionen. Ein erster Hinweis in dieser Richtung ergab sich aus Untersuchungen an fiebernden Patienten: bei zehn Kranken mit Fieber zwischen 38 und 39,7° betrug die Durchschnittsfrequenz der Mikrovibration 12,1 (bei den beiden Höchstfiebernden 14 und 14,2 Hz). Die Vermutung, daß zwischen MV-Frequenz und Höhe der Körpertemperatur ein Zusammenhang bestehe, wurde durch MV-Registrierungen an Vögeln bestätigt, deren Temperatur bekanntlich höher ist als bei den Säugern (zwischen 40 und 42°); die Durchschnittsfrequenz der untersuchten Vögel (Drossel, Huhn, Rabe, Krähe, Gans) lag zwischen 13 und 30 Hz (mit einer Häufung zwischen 16 und 22 Hz). Die Möglichkeit, daß der Kontraktionsfrequenz der permanenten Muskelaktivität eine Regelfunktion zukomme, konnte nur durch MV-Registrierungen bei wechselnder Temperatur geprüft werden. Bei zehn Personen, die im Einzelversuch abwechselnd in Räume von +4 und +25° C gebracht wurden, zeigte sich, daß die MV-Frequenz in der Kälte um durchschnittlich 1 Hz höher war als in der Wärme [17]. Einer Frequenzsteigerung der Muskelaktivität um 1 Hz entspricht bei einer Beteiligung von 2,5% der Muskulatur eine Erhöhung der Wärmeproduktion um 7074 kleine Kalorien pro Stunde. Frequenzänderungen der permanenten alternierenden Muskelaktivität sind daher eine sehr wirksame Maßnahme zur raschen und exakten Anpassung der Wärmebildung an den jeweiligen Bedarf und somit auch zur genauen Einhaltung des biologisch zweckmäßigen Temperaturniveaus im Organismus. Im Vergleich zu dieser Feinregulation, die schon bei relativ geringen Änderungen der Außentemperatur einsetzt, ist das makroskopische Kältezittern bei starker Abkühlung als grobe Notstandsmaßnahme des Organismus zu betrachten. Es ist anzunehmen, daß bei der Frequenzregulation der Wärmeproduktion das motorische Gamma-System, das beim Warmblüter rund $\frac{1}{3}$ der motorischen Fasern umfaßt und dessen Aktivierung graduiertbare Kontraktionen ermöglichen soll, eine entscheidende Rolle spielt.

Überraschend war in den Versuchen mit Temperaturwechsel, daß die MV-Amplitude in der Kälte um etwa 1,5 μ kleiner war als in der Wärme. Ebenso überraschend war die Feststellung, daß bei künstlicher Senkung der Körpertemperatur die Amplitude stieg, während sich die Frequenz verminderte [bei einem

hibernierten Patienten¹⁾ ergaben sich bei einer Körpertemperatur von 34,5° in tiefer Narkose Frequenzen von 5,3 Hz bei einer Amplitude von 30 μ ; die Mikrovibration war auch in diesem Falle ununterbrochen registrierbar]. Nahezu gleiche Verhältnisse zeigten sich bei neun Neugeborenen 20 min nach der Geburt: die MV-Frequenzen lagen zwischen 5 und 9 mit einer Häufung bei 6 Hz, die Amplituden um 30 μ . Eine befriedigende Erklärung dieser Befunde steht noch aus.

Mikrovibration und Muskeltonus

Die Frage, ob es eine „ruhende Muskulatur“ gebe, spielte nicht nur in der Theorie der Wärmebildung, sondern auch in den Diskussionen über den „Tonus“ der Muskulatur eine große Rolle. Mit dem Ausdruck „Muskeltonus“ (oder „contractiler Tonus“) bezeichnet man die dauernd vorhandene „Grundspannung“ der Muskulatur, die auch beim ruhenden oder schlafenden Menschen bestehen bleibt und erst mit dem Tod (oder durch Lähmung) in Erschlaffung übergeht. Das Fehlen von Aktionsströmen bei Entspannung und im Schlaf führte zu Zweifeln darüber, ob der Tonus auf Kontraktionen beruhe. Die MV-Registrierungen geben auf diese Frage eine eindeutige Antwort: es gibt keine „ruhende Muskulatur“, es finden vielmehr immer — auch im Schlaf und in tiefer Narkose — alternierende Kontraktionen statt. Der Muskeltonus entsteht durch die permanente alternierende Muskelaktivität. Diese Hypothese, die ich 1949 vorgeschlagen habe, wurde seither auch von anderen Autoren vertreten; so betont SCHÄFER, daß sich im Tonus die „Fasern alternierend, und zwar immer nur wenige zu gleicher Zeit, kontrahieren“ [15, S. 204], und RUDOLPH erklärt, der Tonus sei „nicht auf eine schwache kontinuierliche Verkürzung aller Muskelfasern zurückzuführen, sondern auf die Aktivität nur weniger motorischer Einheiten; nacheinander werden immer andere Einheiten aktiviert“ [14, S. 128].

Weitere Möglichkeiten biologischer MV-Funktionen

Es ist wahrscheinlich, daß nicht nur die aus der Mikrovibration abgeleitete permanente Muskelaktivität, sondern auch die Mikrovibration selbst, also die ununterbrochene rhythmische Mikrobewegung des ganzen Körpers, biologische Aufgaben zu erfüllen hat. Im Rahmen der „dynamischen Sehtheorien“, nach denen der Sehakt nicht durch einen kontinuierlichen Reizvorgang, sondern durch gesonderte aufeinander folgende Einzelreizungen zustandekommt, haben DRISCHEL und LANGE der Mikrovibration des Kopfes eine besondere Bedeutung zugeschrieben; sie fanden Phasenbeziehungen zwischen der MV-Bewegung des Kopfes und den sehr raschen Ruckbewegungen der Augen und sprechen die Vermutung aus, daß der Mikrovibration, die eine Verschiebung des Netzhautbildes um 3 bis 5 Zapfen bewirke, eine „Unterbrecherfunktion“ zur Vermeidung von „Verschmierungen“ der Einzeleindrücke zukomme (wie z. B. dem Malteserkreuz des Kinoprojektors) [4, S. 333].

Eine weitere Sinnesfunktion der Mikrovibration könnte in der Dauerreizung der Statolithen bestehen.

¹⁾ „Hibernierte Patienten“ sind Kranke, bei denen zur Durchführung großer Operationen außer tiefer Narkose mit Hilfe bestimmter Pharmaka ein „künstlicher Winterschlaf“ erzeugt wurde; beim hibernierten Patienten ist der Stoffwechsel verlangsamt und die Körpertemperatur um mehrere Grade gesenkt.

Es ist anzunehmen, daß die Endolymph-Flüssigkeit des Bogengang- und Vestibularapparates durch die Mikrovibration in ständiger Bewegung gehalten wird, so daß die dort befindlichen Rezeptoren ununterbrochen gereizt werden; die Erregungen, die dadurch dauernd erzeugt werden, können als Grundlage der Lageempfindungen (vor allem auch des ruhenden Menschen) betrachtet werden. Die Reizgrundlage für das „Körpergefühl“ — d. h. für die unklaren Empfindungen von der Oberfläche unseres Körpers — dürfte in den permanenten alternierenden Muskelkontraktionen bestehen, die zu Reizungen der Muskelsinne führen und dadurch den Körper als gegliedertes, einheitliches Gebilde bewußt werden lassen.

Auch mikromechanische Aufgaben im Stoffwechsel kann man der Mikrovibration zuschreiben. Die ständige rhythmische Erschütterung aller Gewebe könnte dazu führen, daß Sedimentbildungen in den Körperflüssigkeiten verhindert oder daß Austausch- und Filterprozesse an den Zellmembranen ununterbrochen in Gang erhalten werden (z. B. beim Blutaustausch in den Kapillaren oder bei der Harnbereitung). Die Kraft der Mikrovibration, deren Kenntnis für die Beurteilung solcher Möglichkeiten von großer Bedeutung wäre, hat sich bisher nicht genau messen lassen; orientierende Versuche mit Belastung des Armes durch Bleiplatten ergaben, daß diese Kraft hoch anzusetzen ist (eine nahezu vollkommene Unterdrückung der Mikrovibration wurde erst durch eine Belastung mit 15 kg erreicht).

Zusammenfassung

Am Körper des Menschen und der warmblütigen Tiere lassen sich ununterbrochene rhythmische Mikrobewegungen nachweisen („Mikrovibration“); ihre Frequenz liegt zwischen 7 und 13 Hz, ihre Amplitude bei entspannter Muskulatur zwischen 0,5 und 3 μ . Die Mikrovibration ist von der Geburt bis zum Tode ständig vorhanden, auch im Schlaf und in der Narkose. Als Ursache der Mikrovibration müssen auf Grund der beschriebenen experimentellen Befunde permanente alternierende Muskelkontraktionen angenommen werden. Da Mikrovibrationen nur bei Warmblütern nachweisbar sind und da sich ihre Frequenz mit der Körpertemperatur ändert, wird die Hypothese aufgestellt, daß die Körpertemperatur durch die permanenten alternierenden Kontraktionen konstant gehalten und durch Frequenzänderungen geregelt wird. Möglichkeiten weiterer biologischer Funktionen der Mikrovibration werden diskutiert.

Literatur

- [1] BYKOW, K. M.: Lehrbuch der Physiologie. Berlin: Volk und Gesundheit-Verlag 1960. — [2] BUCHTHAL, F.: Einführung in die Elektromyographie. München: Urban u. Schwarzenberg 1958. — [3] DENNY-BROWN, D.: Zit. n. H. FULTON, Physiologie des Nervensystems, S. 45f. Stuttgart: F. Enke 1952. — [4] DRISCHEL, H., u. C. LANGE: Pflügers Arch. ges. Physiol. 262, 307 (1956). — [5] DURIG, A.: Handwörterbuch d. Naturwissensch. Bd. 10, 427. Jena: G. Fischer 1935. — [6] GRÖGLER, E.: Der Einfluß der Ermüdung auf die Mikrovibration. Phil. Diss. Wien 1958. — [7] GUALTIEROTTI, T., u. E. MILLA: Pflügers Arch. ges. Physiol. 245, 424 (1942). — [8] LJENERT, G. A., u. E. GRÖGLER: Ärztliche Forschung 15, 3 (1961). — [9] LINDSLEY, O. B.: Amer. J. Physiol. 114, 90 (1933). — [10] LUHAN, W.: Die Körpervibration bei vorgestellten Bewegungen. Phil. Diss. Wien 1954. — [11] MARKO, A.: Mikroskopie 14, 102 (1959). — [12] REIN, H., u. M. SCHNEIDER: Physiologie des Menschen. 14. Aufl. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1960. — [13] ROHRACHER, H.: Anz. phil.-hist. Kl. Öst. Akad. Wiss. a) 1946,

230; b) 1952, 153; c) 1954, 1; d) 1958, 59; e) 1959, 229; f) Mechanische Mikroschwingungen des menschlichen Körpers. Wien: Urban u. Schwarzenberg 1949; g) Acta neuroveg. [Wien] 11, 187 (1955); h) Z. Biol. 111, 38 (1959). — [14] RUDOLPH, G.: Ann. Univ. Saravienensis Medizin 1956. — [15] SCHAEFER, H.: Ärztl. Forsch. 3, 185 (1949). — [16] SUGANO, H.: Kurume Med. 4, 97 (1957). — [17] SWAROFSKY, H.: Die Mikrovibration bei Affekten u. Temperaturände-

rungen. Phil. Diss. Wien 1959. — [18] WARUM, F.: Wien. med. Wschr. 108, 509 (1958).

Wien, Psychologisches Institut der Universität*)

Eingegangen am 27. September 1961

*) Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. H. ROHRACHER, Wien I, Liebiggasse 5

Berichte

Das thermische Ausdehnungsverhalten von Kieselglas als Funktion der thermischen Vorgeschichte

Von R. BRÜCKNER, Würzburg

1. Eingefrorene Strukturzustände und thermische Ausdehnung

Es gibt wohl kaum eine andere Substanz, die so mannigfache und zugleich als Werkstoff gute physikalische, chemische und thermische Eigenschaften auf sich vereinigen kann wie das einfache Oxyd SiO_2 mit seinen

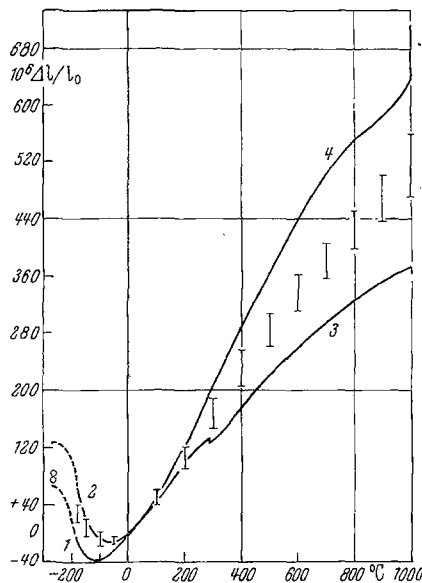


Fig. 1. Bereich der thermischen Ausdehnung von Kieselglas mit verschiedener thermischer Vorgeschichte und Vergleich mit Literaturwerten. 1: 1000° C-Probe; 2: 1720° C-Probe; 3: 1000° C-Probe; 4: 1530° C-Probe. I Bereich der bisherigen Literaturwerte. o Werte zweier Kieselglasproben bei 5° K nach [2]

zahlreichen verschiedenen Modifikationen und seiner Fähigkeit, in den Glaszustand überzugehen. Als Kieselglas hat dieses Oxyd besondere thermische Eigenschaften, die zum großen Teil auf die äußerst geringe thermische Ausdehnung über einen weiten Temperaturbereich zurückzuführen sind.

Die in der Literatur [1] bis [5] zu findenden Angaben über die thermische Ausdehnung von Kieselglas sind sehr unterschiedlich und gehen oft beträchtlich über die Fehlergrenzen der verwendeten Meßmethoden hinaus. Offenbar hat jeder Autor Proben mit tatsächlich unterschiedlichen Eigenschaftswerten vermessen. Als deren Ursache kommen vor allem in Frage: Verschiedene thermische Vorgeschichte und chemische Verunreinigungen.

Um in den eigenen Versuchen den Einfluß von chemischen Verunreinigungen soweit wie möglich auszuschalten, wurden sehr reine Kieselglasproben verwendet (Homosil, Fa. Heraeus und Proben von Osram). Die Messungen der thermischen Ausdehnung an diesen Kieselglasproben im Bereich von -180 bis 1000°C nach dem Interferenzverfahren von FIZEAU-PULFRICH und Dichtebestimmungen an im Bereich von 1000 bis 2000°C abgeschreckten dünnen Kieselglasproben zeigen eine starke Abhängigkeit von der im Temperaturgebiet von 1000 bis 2000°C vorgenommenen Wärmebehandlung. Die Proben wurden daher vor der Messung bei den Vorbehandlungstemperaturen bis zur Einstellung des zeitlich konstanten Endwertes der Dichte getempert und dann in Wasser abgeschreckt, so daß eine definierte Wärmevorgeschichte

der Proben und die bei diesen Temperaturen herrschenden Strukturzustände eingefroren wurden. Eine 1400°C -Probe ist beispielsweise im folgenden eine bei 1400°C bis zu ihrem Dichteendwert getemperte und danach in Wasser abgeschreckte Kieselglasprobe. In Fig. 1 sind die Kurven derjenigen Proben zusammengefaßt, die Extremwerte im thermischen Ausdehnungsverhalten aufweisen. Kurve 1 und 3 zeigen die Ausdehnung zweier 1000°C -Proben im Bereich von -180 bis 0°C bzw. von 0 bis 1000°C , Kurve 2 die Ausdehnung einer 1720°C -Probe im Bereich von -180 bis 0°C und Kurve 4 die einer 1530°C -Probe im Temperaturbereich von 0 bis 1000°C . Alle Ausdehnungsmessungen wurden nach dem Abschrecken entweder bei -180°C oder 0°C begonnen, um die definierte Wärmebehandlung nicht zu beeinträchtigen, was bei höheren Temperaturen (etwa ab 200°C und darüber) der Fall sein würde (s. weiter unten). Die senkrechten Striche geben den Bereich der bisher bekannt gewordenen Ausdehnungswerte an Kieselglas aus der Literatur an. Sie fallen mitten in den überstrichenen Bereich der vorgenommenen Variation in der thermischen Vorbehandlung. Die Größe der in Fig. 1 gefundenen Differenz der Extremwerte der thermischen Ausdehnung als Funktion der Wärmebehandlung (Faktor 1,6!) läßt den Schluß zu, daß die Ursache der unterschiedlichen Literaturangaben schon allein durch eine undefinierte thermische Vorgeschichte der Proben erklärt werden kann. Die üblichen chemischen Verunreinigungen dürften im Vergleich hierzu eine unbedeutende Rolle spielen. Es ist hervorzuheben, daß durch die thermische Vorbehandlung keine Änderung des (geringen) Hydroxygehaltes verursacht wurde.

Aus Fig. 1 ist bereits abzulesen, daß sich das Hochtemperaturverhalten vom Tieftemperaturverhalten unterscheidet. Die thermische Ausdehnung von Zimmertemperatur bis 1000°C hängt von der Dichte, die bei den Wärmebehandlungstemperaturen eingefroren wird, ab. Der Temperaturverlauf der Dichte (und zwar des zeitlichen Dichteendwertes) hat bei 1550°C ein Maximum; desgleichen durchläuft die Größe der thermischen Ausdehnung als Funktion der thermischen Vorgeschichte ein Maximum, das bei einer Wärmebehandlungstemperatur von ebenfalls etwa 1550°C liegt (Kurve 4, Fig. 1). Proben, die von höheren und tieferen Temperaturen als von etwa 1550°C abgeschreckt wurden, zeigen eine geringere thermische Ausdehnung. In Fig. 2 sind die Ergebnisse der Dichte- und Ausdehnungsmessungen zusammengefaßt und das spezifische Volumen als Funktion der Temperatur aufgetragen. Der rechte Ast der hyperbelförmigen Kurve stellt in erster Näherung die Gleichgewichtskurve des spezifischen Volumens der Kieselglaschmelze als Funktion der Temperatur dar (1700 bis 2000°C). Man würde erwarten, daß er für die unterkühlte Schmelze etwa linear weiter verläuft bzw. für den Fall einer Kristallisation einen Volumensprung zum (kleineren) Cristobalitivolumen zeigt, um anschließend der thermischen Ausdehnung von Cristobalit zu folgen. Sie biegt aber in der Umgebung des Cristobalitschmelzpunktes (1710°C) zu größeren Werten ab und nimmt negativen Temperaturverlauf an. Dieser letztere Kurvenast (1000 bis 1500°C) dürfte dem metastabilen Gleichgewicht der unterkühlten Kieselglasschmelze entsprechen. Daß es sich bei diesem linken Ast auch um eine Gleichgewichtskurve handelt, geht daraus hervor, daß sie von beiden Seiten erreichbar ist, sowohl von unten als auch von oben je nach thermischer Vorgeschichte. Hierfür sprechen auch die in Richtung auf diese Kurve je nach der Wärme-