

Einige energetische Probleme während des menschlichen Wachstums

WALTHER BURMEISTER

Universitäts-Kinderklinik, Homburg

ABSTRACT: Some energetic problems during human growth. The energetics of growth are best correlated with the development of the cell mass. The relationship between transformation of total energy and cell mass during the embryonal and infantile period is constant and corresponds to the value of hard-working people. The high rate of infant metabolism appears to be unaffected since the caloric turnover remains equally distributed throughout the day. This fixed energy distribution is typical for the infant, whereas the adult is capable of a remarkable additional turnover of energy. This situation loosens up with the development of static function whereas the period of relatively intensive cell mass build-up stops simultaneously.

EINLEITUNG

Unter dem Wachstumsvorgang verstehen wir die Heranbildung der endgültigen Körperform. Dieser Prozeß ist mit einer Veränderung der Körpergrößen verbunden. Bei einer biologischen Betrachtung ergibt sich die Frage nach derjenigen somatischen Größe, welche die biologische Aktivität des Organismus am besten repräsentiert, denn ein solches Substrat muß zur Beurteilung des Stoffwechsels während des Wachstums das günstigste Bezugssystem darstellen. Es ist nicht leicht, einen derartigen Standard auszumachen, zumal noch gefordert werden muß, daß diese Größe während des Wachstums ihre Eigenschaften nicht verändert.

ERGEBNISSE

Daß qualitative Veränderungen von Körpergrößen recht erheblich sein können, ist an den folgenden zwei Beispielen zu erkennen: So ist die Körperhöhe des Säuglings ganz anders zusammengesetzt als jene des Erwachsenen. Der Kopf macht zum Beispiel $\frac{1}{4}$ der Körperhöhe aus, beim Erwachsenen dagegen nur $\frac{1}{8}$ (Abb. 1). Entsprechende Unterschiede finden sich in den anderen Körperabschnitten, die in die Körperlänge eingehen. Da man aber annehmen darf, daß Kopf, Rumpf und Beine eine unterschiedliche metabolische Aktivität aufweisen, ist die Körperhöhe als Bezugsgröße zu Stoffwechselstudien ungeeignet.

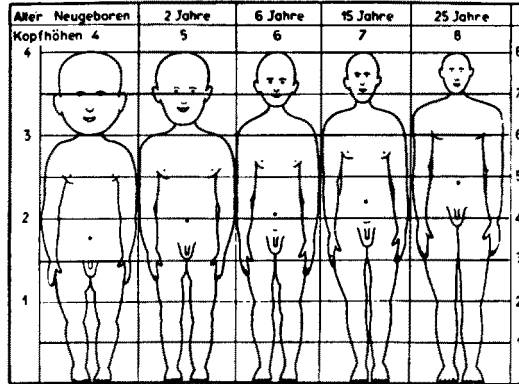


Abb. 1: Änderung der Körperproportionen während des Wachstums. (Nach STRATZ, 1903)

Mit dem Körpergewicht ist es nicht viel anders, weil sich die Zusammensetzung des Organismus während des Wachstums verändert. Der Extrazellularraum macht beim Neugeborenen 37%, beim Erwachsenen aber nur 17% des Gewichtes (Abb. 2) aus. Dagegen betragen die Werte für intrazelluläre Flüssigkeit 35 und 45%, während sich die festen Substanzen komplementär zu den beiden genannten Größen verhalten. Es ist ohne weiteres einzusehen, daß dieser Wandel der Körperzusammensetzung sich

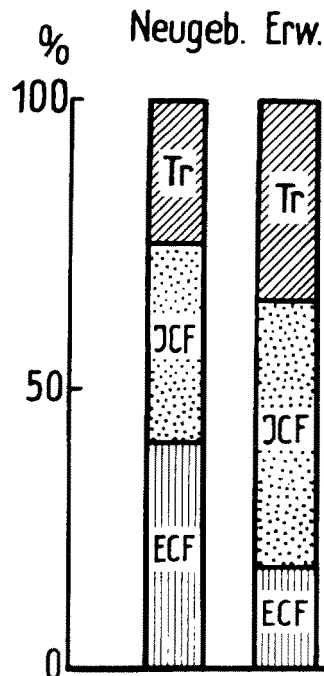


Abb. 2: Vergleich der Körperzusammensetzung von Neugeborenem und Erwachsenenem. Tr = Trockensubstanz, ICF = intrazelluläre Flüssigkeit, ECF = extrazelluläre Flüssigkeit

auf die metabolische Aktivität der Körpermasse auswirkt. Infolgedessen reicht das Gewicht in seiner einfachen Form nicht für unsere Wachstumsbetrachtung aus.

Dennoch kann man von dem Gewicht ausgehen, wenn es gelingt, diese Veränderung der Körperzusammensetzung gesetzmäßig zu erfassen. Dazu wurden von mir einige Formeln auf Grund von Thiosulfatraumbestimmungen nach FRIIS-HANSEN (1954) bei Frühgeborenen, Neugeborenen, Säuglingen und Kindern entwickelt. Der Thiosulfatraum soll dem Extrazellularraum gleichgesetzt werden. Kürzen wir das Gewicht (kg) mit W , den Extrazellularraum (Liter) mit ECF ab, dann ergibt sich:

$$ECF = 0,48 W^{0,76} \quad (1)$$

d. h. der Extrazellularraum geht weitgehend mit der KLEIBER-Potenz parallel.

Es ist aber nicht sehr zweckmäßig, eine Größe auf die andere zu beziehen, wenn diese in der ersteren enthalten ist, wie in unserer Formel. Besser korreliert man ECF mit dem übrigen Anteil des Gewichts, also mit der Differenz $W - ECF$. Dann habe ich die folgende Formel erhalten:

$$ECF = 0,74 (W - ECF)^{0,686} \quad (2)$$

d. h. der Extrazellularraum ist ein dimensionsgerechtes Oberflächenäquivalent dieser Differenz $W - ECF$. Nun ergibt sich die Frage nach der Bedeutung dieses Ausdrucks $W - ECF$. In Termen der Körperzusammensetzung ausgedrückt, enthält sie die intrazelluläre Flüssigkeit und die festen Substanzen einschließlich dem Körperfette.

Unter Berücksichtigung der in Abbildung 2 gezeigten Werte der Körperzusammensetzung muß man zu dem Ergebnis kommen, daß der Anteil von intrazellulärer Flüssigkeit an der Differenz $W - ECF$ während des Wachstums konstant ist. Um den beständigen Anteil intrazellulärer Flüssigkeit an $W - ECF$ zu interpretieren, vergegenwärtige man sich, daß nach MCCANCE u. a. die intrazelluläre Flüssigkeit einen beständigen Anteil der Zellmasse, also der Gesamtheit aller Körperzellen ausmacht. Daraus ist zu schließen, daß die besagte Differenz $W - ECF$ der Zellmasse direkt proportional ist, also ein Zellmassenäquivalent darstellt. Demzufolge bedeutet Formel (2) nichts anderes, als daß ECF dimensionsgerecht der Zellmassenoberfläche proportional ist. Um die Zellmasse aus dem Gewicht zu berechnen, geht man am besten von der Formel (1) aus, deren rechter Ausdruck ebenfalls ein Oberflächenäquivalent der Zellmasse darstellt. Nach Potenzieren mit 1,5, also mit der reziproken Zahl von $\frac{2}{3}$ erhält man unter Berücksichtigung eines Wassergehalts der Zellmasse von 67 %:

$$ZM = 0,42 W^{1,11} \quad (3)$$

so daß wir unser Ziel erreichen, unter Normalgewichtsbedingungen die Zellmasse aus dem Körpergewicht zu berechnen. Der Nutzen ist zweifacher Art: einmal sind wir zu einer qualitativ konstanten Wachstumsgröße gekommen und zum anderen ist die Zellmasse das nächstliegende Substrat der Stoffwechselaktivität.

Es ist einfach, mit der Zellmassenformel zu einer Zellmassenwachstumskurve zu gelangen. Man errechnet sie einfach aus der Wachstumskurve des Gewichtes (MEREDITH 1950). Aus Abbildung 3 ist zu erkennen, daß Zellmassen- und Gewichtskurve große Ähnlichkeit aufweisen, wie nach Formel (3) zu erwarten ist. Auf Abbildung 4, welche die gleichen Kurven in einem anderen Maßstab wiedergibt, wird jedoch sichtbar, daß deutliche Unterschiede in den Verdopplungs- und Verdreifungszeiten des Geburts-

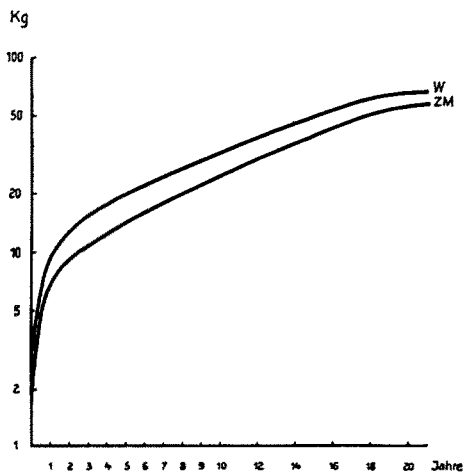


Abb. 3: Vergleich des relativen Wachstums von Gewicht und Zellmasse. (Nach BURMEISTER, 1961/62)

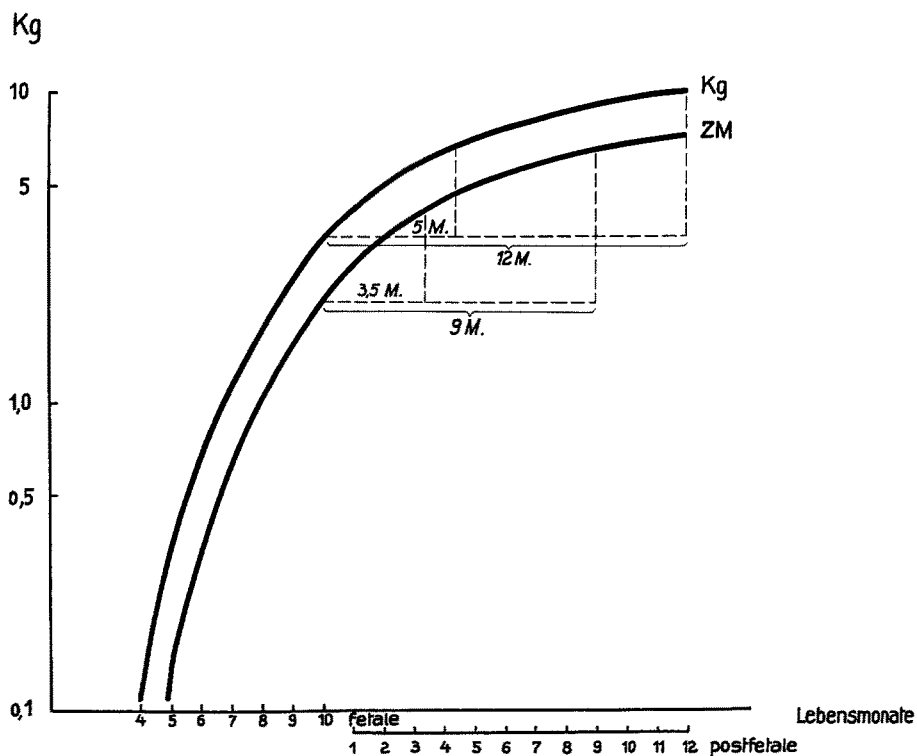


Abb. 4: Die gleichen Kurven wie Abbildung 3 in anderem Maßstab. Vergleich der Verdopp-
lungs- und Verdreifachungszeit von Gewicht und Zellmasse. (Nach BURMEISTER, 1961/62)

gewichtes bzw. der Geburtszellmasse vorhanden sind. Die Zellmassenbildung geht also schneller vor sich als die Entwicklung des Gewichtes. Das ist ohne weiteres zu verstehen, weil nach Abbildung 2 die Zellmassenkonzentration im Körper ansteigt.

Nun ergibt sich die Frage nach der Repräsentation der Stoffwechselaktivität. Hier gilt ähnliches wie bei den somatischen Körpergrößen: ihre physiologische Bedeutung kann sich im Verlaufe des Wachstums erheblich verändern. Der Grundumsatz macht z. B. während der Fetalperiode 100%, im Säuglingsalter 90%, beim Erwachsenen

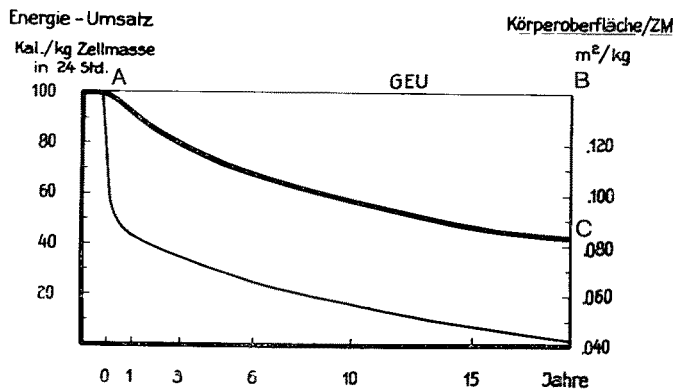


Abb. 5: Vergleich der Beziehungen Energieumsatz/Zellmasse und Körperoberfläche/Zellmasse. AB: Gesamtenergieumsatz/Zellmasse; AC: Grundumsatz/Zellmasse. Soweit AC mit der Beziehung Körperoberfläche/Zellmasse parallel verläuft, wird der Grundumsatz durch die Körperoberfläche bestimmt. GEU: Gesamtenergieumsatz

jedoch nur noch, je nach Lebensweise 40–50% des Gesamtenergieumsatzes aus (Abb. 5). Ein Vergleich des Grundumsatzes von Säugling und Erwachsenen würde also in Wirklichkeit eine Gegenüberstellung von 90% des Gesamtenergieumsatzes des Säuglings mit etwa 50% des Gesamtenergieumsatzes des Erwachsenen bedeuten, was sicher nicht sinnvoll ist.

Trotzdem können wir auf Grund von Grundumsatzwerten zu gewissen Schlußfolgerungen kommen. KARLBERG (1952) berechnete die Regression zwischen Gewicht und Grundumsatzwerten bei Säuglingen aus Werten einiger amerikanischer Autoren. Er fand als Gewichtspotenz $W^{1,09}$. Daher liegt der Schluß nahe, daß im Säuglingsalter der Grundumsatz durch die Zellmasse bestimmt wird und, weil hier der Grundumsatz noch weitgehend mit dem Gesamtenergieumsatz gleichzusetzen ist, daß beim Säugling der Gesamtenergieumsatz durch die Zellmasse weitgehend bestimmt wird. Diese Beziehung läßt sich auf Grund der Formel KARLBERGS und der Formel (3) leicht in Zahlen ausdrücken: der Säugling setzt pro Kilo Zellmasse täglich rund 100 Kalorien um.

Was bedeutet nun diese Leistung von 100 Kalorien pro 1 kg ZM? Am besten vergleichen wir sie mit dem entsprechenden Erwachsenenwert. Ein erwachsener Mann verfügt gemäß Formel 3 über 43 kg Zellmasse. Sein Gesamtenergieumsatz müßte also 4300 Kalorien betragen, wenn er die Leistung eines Säuglings vollbringen möchte. Das ist aber der Wert von Schwerarbeitern.

Obwohl der lebhafteste Säuglingsstoffwechsel bekannt ist, erscheint diese Konsequenz

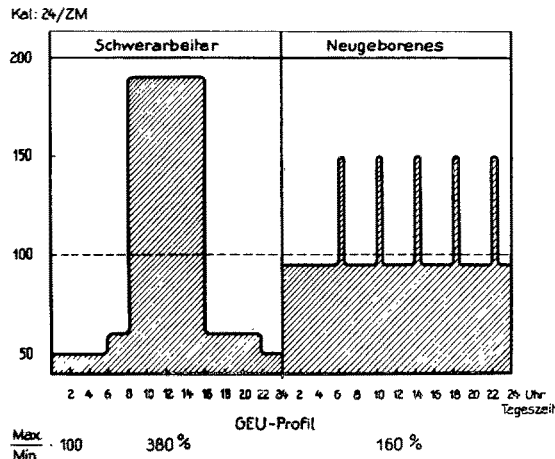


Abb. 6: Vergleich des Energieprofils von erwachsenem Schwerarbeiter und jungem Säugling (eigene Schätzung)

zuerst verblüffend, denn schwere Arbeit geht mit dem sogenannten Anstrengungssyndrom einher, das aus beschleunigtem Herzschlag, gesteigerter Atemtätigkeit, Schwitzen usw. besteht. Eine derartige Anstrengung beobachten wir aber kaum beim Säugling. Die Erklärung hierfür ist einfach; der Säugling arbeitet gleichmäßig Tag und Nacht, wie auf Abbildung 6 zu erkennen ist. Die kleinen Spitzen bedeuten die Perioden des Trinkens und Schreiens, denn mehr Leistungszuwachs tritt nicht auf, so daß das Energieplateau gleichmäßig in der Höhe von 100 Kalorien liegt. Beim Schwerarbeiter drängt sich der Leistungszuwachs auf einen wesentlich kleineren Intervall zusammen, so daß das Energiegefälle zwischen Ruhe und Arbeit erheblich steiler wird, und gerade durch diesen Unterschied zwischen Ruhe und Arbeit wird die Anstrengung des Schwerarbeiters so evident. Trotzdem gibt es auch beim Säugling Hinweise auf ein latentes Anstrengungssyndrom: z. B. die relativ hohe Herzfrequenz von 100–120 Schlägen pro Minute, die erhöhte Atemfrequenz, und schließlich spricht für die erhöhten Ansprüche an den Kreislauf ein relativ hohes Herzgewicht.

Nach Abschluß der infantilen Wachstumsperiode verläuft der Grundumsatz nicht mehr der Zellmasse proportional, sondern er steigt weniger an, wie die Abbildung 7 zeigt. Die Erklärung ist einfach; der Grundumsatz macht einen immer geringeren Anteil des Energieumsatzes aus; er folgt jetzt dem Äquivalent der Zellmassenoberfläche, also praktisch dem Oberflächengesetz.

Diese Beziehung ist auf Abbildung 5 in dem Parallelismus der zellmassenbezogenen Oberflächen- und Grundumsatzkurven zu erkennen. In der infantilen Periode jedoch wären höhere Grundumsatzwerte zu erwarten, wenn diese Beziehung dann noch fortbestände. Offenbar ist die Wärmeabgabe pro Einheit Oberfläche des Säuglings infolge seiner besonderen Lebensweise wesentlich geringer als jene des Erwachsenen.

Ein zweites ist noch aus Abbildung 5 zu entnehmen. Wenn wir entsprechend der anfänglichen Überlegung während des Wachstums eine direkte Beziehung zwischen Gesamtenergie-Umsatz und Zellmasse (Linie AB) und eine solche zwischen Grund-

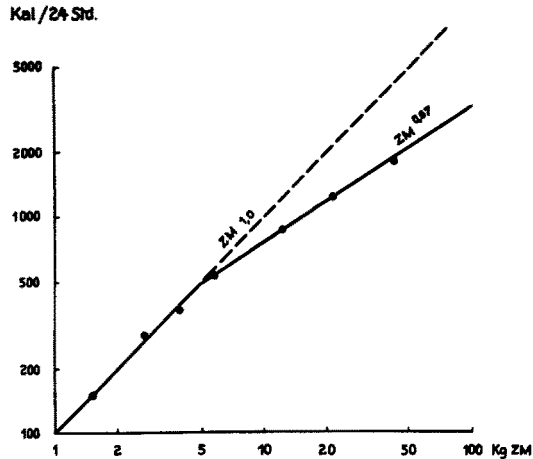


Abb. 7: Beziehung zwischen Grundumsatz und Zellmasse während des Wachstums.
(Nach BURMEISTER, 1961/62)

umsatz und Körperoberfläche (entsprechend Linie AC) annehmen, muß die Fläche ABC die körperliche Leistungsfähigkeit, also den möglichen Leistungszuwachs darstellen. Seine zum Grundumsatz komplementäre Entwicklung führt zu dem Schluß, daß der Mensch seine körperliche Leistungsfähigkeit der Verschiebung des Oberflächenvolumenverhältnisses während der Körpermassenbildung zugunsten des Volumens verdankt.

ZUSAMMENFASSUNG

1. Entscheidend für eine Betrachtung der Energetik ist die Wahl einer zweckmäßigen somatischen Bezugsgröße. Die Zellmasse scheint besonders geeignet. Ihre Berechnung aus dem Körpergewicht auf der Basis von Thiosulfat-Raumbestimmungen an Frühgeborenen, Säuglingen und Kindern wird hergeleitet.
2. Der globale Stoffwechsel wird am besten durch den Gesamtenergieumsatz repräsentiert, und Berechnungen ergeben, daß der Säugling etwa 100 Kal. pro kg ZM und Tag umsetzt, was der Leistung eines Schwerarbeiters entspricht.
3. Die im Verlaufe des Wachstums sich entwickelnde körperliche Leistungsfähigkeit entsteht offenbar durch die Verschiebung des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses zugunsten der letzteren Größe.

ZITIERTE LITERATUR

- BURMEISTER, W., 1961/62. Der Extrazellular-(Thiosulfat)Raum im menschlichen Organismus während des Wachstums. *Ann. Univ. Sarav.* 9, 167.
- FRIIS-HANSEN, B., 1954. The extracellular fluid volume in infants and children. *Acta paediat.*, Stockh. 43, 444.

- KARLBERG, P., 1952. Determination of standard energy metabolism in normal infants. *Acta paediat.*, Stockh. **41**, Suppl. 89.
- MCCANCE, R. A. & WIDDOWSON, E. M., 1951. A method of breaking down the body weights of living persons into terms of extra cellular fluid, cell mass and fat and some applications of it to physiology and medicine. *Proc. roy. Soc. (B)* **138**, 115–130.
- MEREDITH, H. V., 1950. Zitiert nach: STUART, H. C. & STEVENSON, S. S.: Physical growth and development. In: MITCHELL-NELSON, Textbook of pediatrics, W. B. Saunders Co., Philadelphia, 1658 pp.
- STRATZ, C. H., 1903. Der Körper des Kindes. Enke, Stuttgart, 250 pp.

Diskussion im Anschluß an den Vortrag BURMEISTER

KRÜGER: Daß die Energetik des Säuglings von der des heranwachsenden Menschen abweicht, steht in Übereinstimmung mit den Wachstumsuntersuchungen. Die Parameter für das Wachstum gelten nur von einem Jahr ab. Vor dieser Zeit sind mathematisch andere Parameter wirksam.

VON BERTALANFFY: To the growth theorist, it is gratifying to see that calculation with balance values is fruitful even in processes of such complexity as those discussed by Dr. BURMEISTER. Breaks in growth curves which occur simultaneously in various physiological functions are well known, for example in the rat, where they take place at around 100 g body weight, i. e. in the prepubertal stage (VON BERTALANFFY 1961, Fig. 23, p. 218, in: W. W. NOWINSKI, Fundamental Aspects of Normal and Malignant Growth. Elsevier Publishing Co., New York).

BURMEISTER: Man kann auch approximativ die Zellmasse bestimmen. Ich bekomme dann einen Faktor $w^{1,2}$.

LOCKER: Die Untersuchungen Herrn BURMEISTERS sind deswegen so bedeutungsvoll, weil sie innere Gründe für verschiedene, phasenartige Größenabhängigkeit des Stoffwechsels während des Wachstums anführen. Damit ist ein erfolgversprechender Beitrag zum Ursachenproblem der Stoffwechselallometrie vom Gesichtspunkt des Gesamtorganismus geleistet. Dieser Beitrag begegnet dem Bestreben, die Stoffwechselallometrie sozusagen von unten, von Enzymen, Zellen, Geweben und Organen her, aufzuklären, welche beiden Richtungen wohl eines Tages zu einem befriedigenden Ergebnis führen werden.