

Measurement of human energy expenditure

Citation for published version (APA):

Schoffelen, P. F. M. (2017). *Measurement of human energy expenditure: biological variability and technical validity*. [Doctoral Thesis, Maastricht University]. Datawyse / Universitaire Pers Maastricht. <https://doi.org/10.26481/dis.20170914ps>

Document status and date:

Published: 01/01/2017

DOI:

[10.26481/dis.20170914ps](https://doi.org/10.26481/dis.20170914ps)

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.umlib.nl/taverne-license

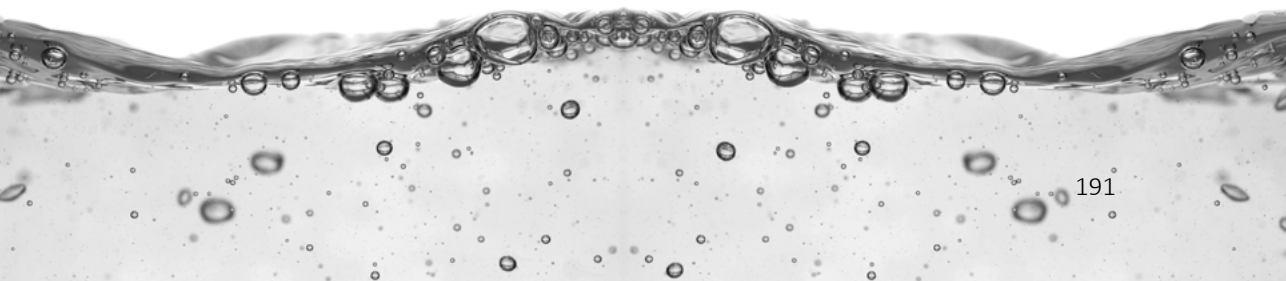
Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

repository@maastrichtuniversity.nl

providing details and we will investigate your claim.

Summary



INTRODUCTION

Energy required for human living results from combustion of food with oxygen; releasing the energy stored in the food by converting it into heat and work.

Measuring energy expenditure in the form of heat became possible in 1780 when A.L. Lavoisier and P.S. Laplace created a direct calorimeter for small animals.

Direct calorimeters for measuring heat (calories), and indirect calorimeters for measuring gas exchange i.e. oxygen uptake and carbon dioxide production were constructed. Indirect calorimeters, estimating energy expenditure by converting measured gas exchange to energy by using data on food composition and its energy content, became most frequently used. Indirect calorimeters have proliferated as basic infrastructure, providing implicitly trusted results often without proper application and validation. This effect becomes visible where biological variability for healthy subjects far exceeds technical validation results.

Indirect calorimetry remains sensitive to sources of error, ranging from ambient- and biological aspects to technical- and operator errors. The availability of specialized know-how on site should be considered a requirement.

OBJECTIVE

It was the objective of this thesis to show that biological variability and technical validity should be of similar magnitude, and that this can be achieved by following the 'capture all' (exhalation or heat) concept of the past, with modern day equipment and methods. A second objective was to emphasize that technical validation methods should be readily available on site, and these should be able to realistically mimic subject responses. A final goal was to increase awareness for some of the pitfalls in indirect calorimetry.

METHODS

Whole room indirect calorimeters were used for average daily metabolic rate (ADMR), overnight metabolic rate (OMR) and sleeping metabolic rate (SMR). Similarly, ventilated hood and face-mask calorimeters were constructed, capturing all exhalation, and were used for determining basal metabolic rate (BMR) and oxygen uptake at maximum exertion (VO_2max). A direct "suit" calorimeter was used to allow simultaneous direct- and indirect calorimetric measures as combined with a whole room indirect calorimeter. A typical "breath by breath" exercise calorimeter was also applied for comparison of "capture all" and "breath by breath" measurements of VO_2max .

Technical validity for indirect calorimeters was determined using alcohol combustion and gas infusion, the latter was also used for the simulation of breathing. The direct

calorimeter was checked using an electric heat-source. In total 101 male and 48 female healthy adults provided data on multiple individual measurements. All studies conformed to the University of Maastricht protocols for ethics and informed consent, in agreement with the Declaration of Helsinki.

RESULTS

Simultaneous measurement of heat loss and gaseous exchange showed total energy expenditure, calculated from oxygen consumption and carbon dioxide production, matches heat loss at rest. During cycling, total energy expenditure matched heat loss plus the work performed, as measured by the cycle ergometer. Observations during walking showed that work is done in level walking as well.

Application of nine different formulae for the calculation of energy expenditure from oxygen consumption and carbon dioxide production resulted in an updated formula with a minimal effect for variation in protein as energy substrate, the energy substrate that is not fully oxidized to allow excretion of the nitrogen component in urine.

Repeated measurements allowed evaluation of biological variability of the five parameters of energy expenditure mentioned above: SMR; OMR; BMR; ADMR and $VO_2\text{max}$ (Table 1). SMR, OMR and ADMR were measured in a room calorimeter over 3 h, 5-8 h and 24 h intervals, respectively. BMR was measured with a ventilated hood, directly after waking up in the morning over 20-30 min in the fasted state. $VO_2\text{max}$ was measured with a facemask during a maximal exertion test on a cycle ergometer

Table 1: Biological variability of sleeping metabolic rate (SMR), overnight metabolic rate (OMR), basal metabolic rate (BMR), average daily metabolic rate (ADMR), and oxygen consumption at maximum exertion ($VO_2\text{max}$). These biological measurements are uncorrected and inclusive of technical aspects.

Parameter	Energy expenditure (kJ•min ⁻¹)	SD (kJ•min ⁻¹)	CV (%)
SMR	4.6	0.11	2.4
OMR	4.8	0.13	2.8
BMR	4.7	0.15	3.3
ADMR	6.8	0.13	1.9
$VO_2\text{max}$	~90	~1	1.2

Technical validity was dependent on the specific calorimeter used. Observed values showed an average accuracy range of 0 - 1% and a CV of up to 2% in agreement with published values.

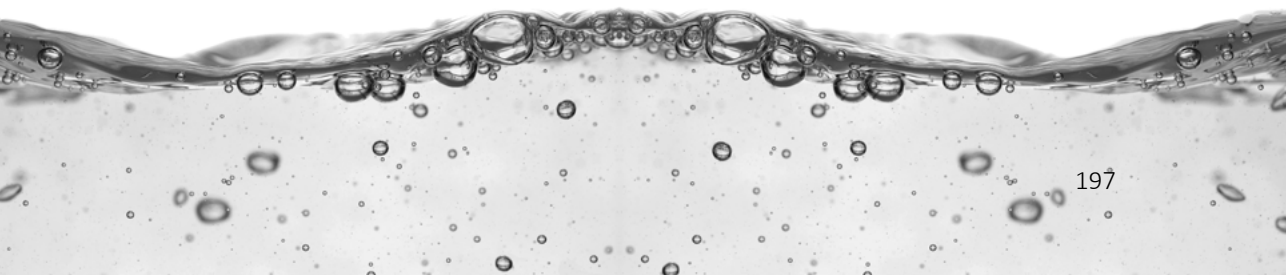
A final aspect that could yet be deemed "indirect" was the use of assumptions in calculating gas exchange quantities. This aspect was addressed by deriving equations for true molar balance of respiratory gas exchange, eliminating the "ideal gas" assumption and using SI units. Simulations resulted in finding sources of error specifically related to

temperature differences and transients, drawing attention to effects of internal compartmentalization and climate control in whole room indirect calorimeters.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Total energy expenditure as calculated from measured oxygen consumption and carbon dioxide production matched simultaneously measured heat loss plus work performed, as measured by a cycle ergometer. Thus, indirect calorimetry is a valid method for the measurement of energy expenditure. Biological variation of average daily metabolic rate and its components was found to be in agreement with technical validity of measurement over the complete human range. Reduction of technical variability requires regular on-site validation.

Samenvatting



INLEIDING

De mens gebruikt energie om te leven, afkomstig uit voedsel, door oxidatie van koolhydraat, vet en eiwit. De zo beschikbare energie wordt uiteindelijk omgezet in warmte en uitwendige arbeid. Meting van het energiegebruik werd mogelijk in 1780 met de bouw van een directe calorimeter, geschikt voor kleine dieren, door A.L. Lavoisier en P.S. Laplace. Directe calorimeters voor het meten van warmte (Joules), en indirecte calorimeters voor het meten van gaswisseling werden vervolgens verder ontwikkeld en toegepast. Bij indirecte calorimetrie wordt het energiegebruik berekend uit de gemeten zuurstof opname en koolstof dioxide productie op basis van gegevens over zuurstof opname, koolstof dioxide productie en vrijkomende energie bij oxidatie van de afzonderlijke nutriënten. Meting van het energiegebruik vindt tegenwoordig vrijwel uitsluitend plaats met indirecte calorimetrie. De brede verspreiding van calorimeters als meetapparaat wekt de indruk dat het een eenvoudige standaard meting betreft. Juiste toepassing vereist echter regelmatige controle op validiteit van metingen. Indirecte calorimetrie is tot op heden gevoelig voor fouten in toepassing en gebrek aan deskundigheid, variërend van omgevings- en biologische aspecten tot technische- en bedienings- fouten. De beschikbaarheid van gespecialiseerde kennis en faciliteiten ter plekke dient dan ook als een vereiste te worden beschouwd.

DOELSTELLING

Het doel van dit proefschrift was aan te tonen dat de biologische variabiliteit en technische validiteit van een vergelijkbare grootte-orde moeten zijn en dat dit kan worden bereikt door het klassieke principe van het compleet opvangen van geproduceerde warmte of uitademingsgassen, met moderne apparatuur en methodes. Een tweede doelstelling was aan te tonen dat technische validatiemethoden ter plekke beschikbaar moeten zijn, met regelmaat worden toegepast, en dat de te verwachten biologische variatie realistisch moet kunnen worden nagebootst. Tenslotte was het doel om kennis over de gevoeligheid voor fouten bij toepassing van indirecte calorimetrie te vergroten.

METHODES

Respiratiekamers werden toegepast voor het meten van energiegebruik over een etmaal (average daily metabolic rate, ADMR), gedurende de nacht (overnight metabolic rate, OMR) en tijdens slaap (sleeping metabolic rate, SMR). Vergelijkbare apparatuur werd toegepast voor het meten van het basale energiegebruik (basal metabolic rate, BMR), waarbij men ontspannen op bed ligt met een geventileerde doorzichtige kap over het hoofd. Zuurstofopname bij maximale inspanning (VO_{2max}) werd gemeten met een

masker over mond en neus. Een directe calorimeter, lijkend op een ruimtepak, werd toegepast met gelijktijdige meting in een respiratiekamer. De combinatie maakte vergelijking mogelijk van totaal energiegebruik, gemeten met indirecte calorimetrie, met de warmteproductie. Een typische calorimeter voor ademeuganalyse (breath-by-breath methode) werd toegepast voor het vergelijken van metingen van VO₂max bemonsterd per adem teug met resultaten verkregen door het compleet opvangen van ademteugen.

Technische validiteit van indirecte calorimeters werd bepaald met behulp van alcoholverbranding en gasinfusie; de gasinfusie methode werd ook gebruikt voor het simuleren van ademteugen. De directe calorimeter werd gevalideerd met behulp van een elektrische warmtebron. In totaal werden gegevens verzameld van 101 mannelijke en 48 vrouwelijke gezonde volwassenen die deelnamen aan meerdere experimenten. Alle studies voldeden aan de medisch-ethische eisen van de Universiteit Maastricht, en waren in overeenstemming met het verdrag van Helsinki.

RESULTATEN

Bij gelijktijdige toepassing van directe en indirecte calorimetrie bleek dat de gemeten warmte afgifte in rust overeen kwam met het energiegebruik zoals berekend uit gemeten zuurstof opname en koolstof dioxide productie. Tijdens inspanning was het totale energiegebruik in overeenstemming met de warmte afgifte plus de uitwendige arbeid zoals geregistreerd met een fiets ergometer. Waarnemingen tijdens lopen toonden aan dat ook dan sprake is van uitwendige arbeid.

Evaluatie van acht verschillende formules voor de berekening van energiegebruik uit zuurstof opname en koolstof dioxide productie resulteerde in een bijgestelde formule met een minimaal effect van variatie in eiwit als energie substraat, het nutrient dat niet volledig wordt geoxideerd vanwege de uitscheiding van de stikstof component in urine. Herhaalde metingen met proefpersonen resulteerden in waarden voor de biologische variatie van de hierboven genoemde energieparameters: SMR; OMR; BMR; ADMR en VO₂max (tabel 1). SMR, OMR en ADMR werden gemeten in een respiratiekamer over een interval van respectievelijk 3 uur, 5-8 uur en 24 uur. BMR werd gemeten met een geventileerde kap, na het ontwaken en voorafgaand aan voedsel inname, over een duur van 20-30 minuten. VO₂max werd gemeten met een masker over mond en neus tijdens maximale inspanning op een fiets ergometer.

Tabel 1. Biologische variatie van het energiegebruik tijdens slaap (SMR), gedurende de nacht (OMR), in rust na ontwaken (BMR), over een etmaal (ADMR) en zuurstofgebruik bij maximale inspanning (VO₂max). De metingen zijn niet gecorrigeerd en zijn inclusief de technische aspecten.

Parameter	Energie gebruik (kJ•min ⁻¹)	SD (kJ•min ⁻¹)	CV (%)
SMR	4.6	0.11	2.4
OMR	4.8	0.13	2.8
BMR	4.7	0.15	3.3
ADMR	6.8	0.13	1.9
VO ₂ max	~90	~1	1.2

De technische validiteit verschilde per type calorimeter. De gemiddelde waarde varieerde van 0-1%, met variatie coëfficiënt tot 2%, overeenkomstig gepubliceerde waarden in de literatuur.

Tot slot werden vergelijkingen afgeleid voor een molaire massa balans bij ademgasmetingen, waarbij de aanname dat alle gassen "ideaal" zijn werd geëlimineerd en uitsluitend SI-eenheden werden gebruikt. Simulaties resulteerden in mogelijke fouten bronnen wat betreft temperatuur verschillen en veranderingen, vooral van belang bij gebruik van respiratiekamers met klimaatbeheersing en verdeling van gasvolumina in compartimenten en deel-luchtstromen.

DISCUSSIE EN CONCLUSIES

Het energiegebruik, bepaald door meting van zuurstof opname en koolstof dioxide productie, komt overeen met gemeten warmte verlies plus uitwendige arbeid, zoals geleverd op een fietsergometer. De biologische variatie van het dagelijks energiegebruik en onderliggende componenten komt overeen met de betrouwbaarheid de gebruikte meetapparatuur over het gehele humane bereik. Betrouwbaarheid van apparatuur voor meting van energiegebruik vereist de aanwezigheid ter plekke van een valide test opstelling alsmede regelmatige toepassing daarvan.