

DIN EN ISO 8996

ICS 13.180

Entwurf

Einsprüche bis 2020-12-23
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN ISO 8996:2005-01

**Ergonomie der thermischen Umgebung –
Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes (ISO/DIS 8996:2020);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 8996:2020**

Ergonomics of the thermal environment –
Determination of metabolic rate (ISO/DIS 8996:2020);
German and English version prEN ISO 8996:2020

Ergonomie de l'environnement thermique –
Détermination du métabolisme énergétique (ISO/DIS 8996:2020);
Version allemande et anglaise prEN ISO 8996:2020

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-10-23 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an naerg@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg), 10772 Berlin oder Saatwinkler Damm 42/43, 13627 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 74 Seiten

DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 8996:2020) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 159 „Ergonomics“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 122 „Ergonomie“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Gemeinschaftsarbeitsausschuss NA 023-00-05 GA „Gemeinschaftsarbeitsausschuss NAErg/NAM: Ergonomie der physikalischen Umgebung, ErgPhysU“ im DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 9886 siehe DIN EN ISO 9886

ISO 13731 siehe DIN EN ISO 13731

ISO 15265 siehe DIN EN ISO 15265

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 8996:2005-01 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) der mit einer bestimmten Aufgabe verbundene und mit den in diesem Dokument beschriebenen Verfahren bestimmte Energieumsatz wird in Watt angegeben.
- b) auf Stufe 1, Screening, wurde das Verfahren zur Klassifizierung des Energieumsatzes nach Berufen entfernt, und es werden überarbeitete Verfahren für die Bestimmung des Energieumsatzes für bestimmte Tätigkeiten (Stufe 2, Beobachtung) und bei Verwendung der Herzfrequenz (Stufe 3, Analyse) bereitgestellt.
- c) die Genauigkeit der Methoden zur Schätzung des Energieumsatzes wurde im Lichte der neueren Literatur neu bewertet, und folglich wird die integrale Methode auf Stufe 4, Expertise, nicht mehr empfohlen;
- d) die Norm wurde redaktionell überarbeitet.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 9886, *Ergonomie — Ermittlung der thermischen Beanspruchung durch physiologische Messungen*

DIN EN ISO 13731, *Ergonomie des Umgebungsklimas — Begriffe und Symbole*

DIN EN ISO 15265, *Ergonomie der thermischen Umgebung — Strategie zur Risikobeurteilung zur Abwendung von Stress oder Unbehagen unter thermischen Arbeitsbedingungen*

— Leerseite —

<i>Titel de:</i>	Ergonomie der thermischen Umgebung – Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes (ISO/DIS 8996:2020)
<i>Titel en:</i>	Ergonomics of the thermal environment – Determination of metabolic rate (ISO/DIS 8996:2020)
<i>Titel fr:</i>	Ergonomie de l'environnement thermique – Détermination du métabolisme énergétique (ISO/DIS 8996:2020)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Einheiten	7
5 Die 4 Stufen von Verfahren zur Abschätzung des Energieumsatzes	7
6 Genauigkeit der Abschätzung des Energieumsatzes	8
7 Stufe 1, Screening: Klassifikation des Energieumsatzes nach Tätigkeitsarten	10
8 Stufe 2, Beobachtung	10
8.1 Bestimmung des Energieumsatzes bei einer bestimmten Aktivität	10
8.2 Bestimmung des mittleren Energieumsatzes über einen bestimmten Zeitraum	10
9 Stufe 3, Analyse	11
9.1 Bestimmung des Energieumsatzes mit Hilfe der Herzfrequenz	11
9.1.1 Kurzbeschreibung des Verfahrens	11
9.1.2 Genauigkeit der Beziehung (HR — M)	12
9.1.3 Gültigkeit der Beziehung (HR — M)	12
9.1.4 Nicht mit der dynamischen Muskelbelastung in Zusammenhang stehende HR-Komponenten	13
9.2 Bestimmung des Energieumsatzes durch Beschleunigungsmessung (Akzelerometrie)	13
10 Stufe 4, Expertise	14
10.1 Bestimmung des Energieumsatzes durch Messung der Sauerstoffverbrauchsrate	14
10.1.1 Partial- und Integralverfahren	14
10.1.2 Bestimmung des Energieumsatzes anhand der Sauerstoffverbrauchsrate	17
10.1.3 Bestimmung der Sauerstoffaufnahme	18
10.1.4 Berechnung des Energieumsatzes	20
10.2 Bestimmung des Energieumsatzes durch Messung mit doppelt markiertem Wasser für Langzeitmessungen	20
10.3 Bestimmung des Energieumsatzes durch direkte Kalorimetrie — Kurzbeschreibung	21
Anhang A (informativ) Bestimmung des Energieumsatzes auf Stufe 1, <i>Screening</i>	22
Anhang B (informativ) Bestimmung des Energieumsatzes auf Stufe 2, <i>Beobachtung</i>	24
B.1 Bestimmung des Energieumsatzes einer spezifischen Tätigkeit	24
B.2 Bestimmung des mittleren Energieumsatzes (in Watt) über einen Zeitraum	28
Anhang C (informativ) Bestimmung des Energieumsatzes auf Stufe 3, <i>Analyse</i>	29
Anhang D (informativ) Bestimmung des Energieumsatzes auf Stufe 4, <i>Expertise</i>	31
D.1 Berechnung des Energieumsatzes anhand des Partialverfahrens	31
D.1.1 Messdauer	31
D.1.2 Atmosphärischer Druck	31
D.1.3 Messwerte	31
D.1.4 Berechnung des Ausatmungsvolumens	31
D.1.5 Berechnung des Volumendurchflusses	32

D.1.6	Berechnung der Sauerstoffverbrauchsrate	32
D.1.7	Berechnung der Kohlenstoffdioxid-Produktion	32
D.1.8	Berücksichtigung der Volumenverkleinerung des ausgeatmeten Luftvolumens	32
D.1.9	Berechnung des Energieumsatzes	32
Anhang E (normativ)	Korrektur von Messungen der Herzfrequenz in Bezug auf thermische Effekte.....	33
Anhang F (informativ)	Unsicherheiten des Integralverfahrens	35
Literaturhinweise.....		37

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 8996:2020) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 159 „Ergonomics“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 122 „Ergonomie“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN ISO 8996:2004 ersetzen.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 8996:2020 wurde von CEN als prEN ISO 8996:2020 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 159, *Ergonomics*, Unterkomitee SC 5, *Ergonomics of the physical environment*, Arbeitsgruppe WG 1, *Thermal environments*, erarbeitet.

Diese dritte Ausgabe ersetzt die zweite Ausgabe (ISO 8996:2004), die technisch überarbeitet wurde.

Die wesentlichen Änderungen im Vergleich zur Vorgängerausgabe sind folgende:

- der Energieumsatz, der in Zusammenhang mit einer bestimmten Aufgabe steht und mit den in diesem Dokument beschriebenen Verfahren abgeschätzt wird, wird in Watt angegeben;
- auf Stufe 1, Screening, wurde das Verfahren zur Klassifizierung des Energieumsatzes nach Beruf entfernt und überarbeitete Verfahren für die Bestimmung des Energieumsatzes bei bestimmten Tätigkeiten (Stufe 2, Beobachtung) und bei Verwendung der Herzfrequenz (Stufe 3, Analyse) werden bereitgestellt;
- die Präzision der Verfahren zur Abschätzung des Energieumsatzes wurde auf Grundlage neuer Literatur neu bewertet, woraus folgte, dass das Integralverfahren auf Stufe 4, Expertise nicht mehr empfohlen wird.

1 Anwendungsbereich

Der (körpereigene) Energieumsatz bzw. die körpereigene Energieerzeugung, als Umwandlung von chemischer in mechanische und thermische Energie, ist ein Maß für den Energieaufwand der Muskelarbeit und ermöglicht es, die Tätigkeiten quantitativ abzuschätzen. Der Energieumsatz ist eine wichtige Größe bei der Bestimmung des Wohlbefindens oder der Belastung, die sich durch ein warmes Umgebungsklima ergeben können. Besonders in einem sehr warmen Umgebungsklima wird die Wärmebelastung durch das bei der Muskelarbeit auftretende hohe Maß an körpereigener Wärmeerzeugung erhöht, da große Mengen an Wärme hauptsächlich durch das Verdunsten von Schweiß abgegeben werden müssen. Im Gegensatz dazu unterstützt ein hohes Maß an körpereigener Wärmeerzeugung in einem kaltem Umgebungsklima den Ausgleich übermäßiger Wärmeverluste über die Haut und verringert so die Kältebelastung.

Diese Internationale Norm legt unterschiedliche Verfahren für die Bestimmung des Energieumsatzes im Bereich der Ergonomie der thermischen Arbeitsumgebung fest. Die Internationale Norm kann auch für andere Anwendungsgebiete, zum Beispiel für die Bewertung von Arbeitsverfahren, des Energieaufwands für spezielle Aufgaben oder Sportaktivitäten sowie des Gesamtenergieaufwands einer Tätigkeit usw., angewendet werden.

Die in dieser Internationalen Norm enthaltenen Abschätzungen, Tabellen und anderen Daten beziehen sich auf die allgemeine Arbeitsbevölkerung. Die Anwender sollten in Bezug auf besondere Gruppen, Kinder, ältere Personen, Personen mit Körperbehinderungen usw. entsprechende Korrekturen vornehmen. Persönliche Merkmale, z. B. Körpermasse, können verwendet werden, wenn der Körper durch Laufen oder Steigen bewegt wird (Anhang A und Anhang B). Geschlecht, Alter und Körpermasse sind in Anhang C für die Bestimmung des Energieumsatzes auf Grundlage der Herzfrequenz berücksichtigt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 9886, *Ergonomics — Evaluation of thermal strain by physiological measurements*

ISO 13731, *Ergonomics of the thermal environment — Vocabulary and symbols*

ISO 15265, *Ergonomics of the thermal environment — Risk assessment strategy for the prevention of stress or discomfort in thermal working conditions*

3 Begriffe

In diesem Dokument werden keine Begriffe aufgeführt.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>

4 Einheiten

Der Energieumsatz, der in Zusammenhang mit einer bestimmten Aufgabe steht und mit den in diesem Dokument beschriebenen Verfahren abgeschätzt wird, ist in Watt anzugeben.

Wenn die Aufgabe keine Bewegungen beinhaltet, variiert der Energieumsatz nicht in Abhängigkeit von der Größe und dem Gewicht der Person. Wenn sie Bewegungen beinhaltet, muss das Gewicht der Person berücksichtigt werden (siehe Anhang B).

Da die mit diesem Energieumsatz in Zusammenhang stehende und im Körper erzeugte Wärme diesen im Wesentlichen über die Haut verlassen muss, geben Thermophysiologen den Energieumsatz üblicherweise je Einheit der Körperoberfläche (in $W \cdot m^{-2}$) an und die in anderen Normen dieser Reihe beschriebenen Abschätzungen der thermischen Behaglichkeit und thermischen Einschränkungen werden immer mit Energieumsätzen in $W \cdot m^{-2}$ durchgeführt.

5 Die 4 Stufen von Verfahren zur Abschätzung des Energieumsatzes

Die wirksame mechanische Leistung der Muskelarbeit – auch „nutzbare Arbeit“ genannt – ist gering. Bei den meisten Arbeitstätigkeiten ist diese sogar so gering (wenige Prozent), dass sie gleich null gesetzt wird. Das bedeutet, dass davon ausgegangen wird, dass die gesamte für die Arbeit aufgewendete Energie in Wärme umgewandelt wird. Für die Anwendung dieser Internationalen Norm wird der Energieumsatz (die körpereigene Energieerzeugung) mit der Wärmeerzeugung gleichgesetzt.

In Tabelle 1 sind die unterschiedlichen in dieser Internationalen Norm dargestellten Ansätze zur Bestimmung des Energieumsatzes aufgeführt.

Diese Ansätze sind nach der in ISO 15265 dargelegten Expositionsbewertung aufgebaut. Es werden vier Stufen berücksichtigt:

- Stufe 1, **Screening**: Es wird ein einfaches und leicht anwendbares Verfahren vorgestellt, um die durchschnittliche Arbeitsbelastung nach Art der Tätigkeit als leichte, mittelschwere, schwere oder sehr schwere Tätigkeit einzustufen.
- Stufe 2, **Beobachtung**: Es wird eine Zeit- und Bewegungsstudie für Anwender vorgestellt, die über genaue Kenntnisse der Arbeitsbedingungen verfügen, jedoch nicht notwendigerweise ergonomisch geschult sind, um die Arbeitssituation zu einem bestimmten Zeitpunkt im Mittel einzuschätzen:

Es wird eine Vorgehensweise beschrieben, um nacheinander die Dauer der Tätigkeiten aufzuzeichnen, den Energieumsatz jeder Tätigkeit mit den in Anhang B aufgeführten Gleichungen und Daten abzuschätzen und den zeitbezogenen mittleren Energieumsatz zu berechnen.

- Stufe 3, **Analyse**: Ein Verfahren richtet sich an Anwender, die in Arbeitsschutz und Ergonomie der thermischen Umgebung ausgebildet wurden. Der Energieumsatz wird aus der über eine repräsentative Zeitspanne hinweg aufgezeichneten Herzfrequenz bestimmt. Dieses Verfahren für die indirekte Bestimmung des Energieumsatzes beruht auf der Beziehung zwischen Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz unter festgelegten Bedingungen. Ein weiteres Verfahren dieser Stufe basiert auf der Verwendung von Beschleunigungsmessungen zum Erfassen von Körperbewegungen.
- Stufe 4, **Expertise**: Es werden 3 Verfahren angegeben. Diese erfordern sehr genaue Messungen durch Fachleute:
- Verfahren 4A: der Sauerstoffverbrauch wird über kurze Zeitspannen hinweg (10 min bis 20 min) gemessen;

- Verfahren 4B: Messung mit doppelt markiertem Wasser, mit dem die Bestimmung des mittleren Energieumsatzes über viel längere Zeitspannen hinweg (1 Woche bis 2 Wochen) vorgenommen wird;
- Verfahren 4C: ein direktes kalorimetrisches Verfahren.

Tabelle 1 — Stufen für die Bestimmung des Energieumsatzes

Stufe	Verfahren	Genauigkeit	Arbeitsplatzinspektion
1 Screening	Klassifikation nach Tätigkeitsart	grobe Information sehr hohes Fehlerrisiko	nicht erforderlich
2 Beobachtung	Zeit- und Bewegungsstudie	hohes Fehlerrisiko Genauigkeit: ± 20 %	erforderlich
3 Analyse	3A: Herzfrequenzmessung unter definierten Bedingungen	mittleres Fehlerrisiko Genauigkeit: ± 10 %	Studie zur Bestimmung der repräsentativen Zeitspanne erforderlich
	3B: Beschleunigungsmessung (Akzelerometrie)	hohes Fehlerrisiko	
4 Expertise	4A: Messung des Sauerstoffverbrauchs	Fehler liegen innerhalb der Messgenauigkeit oder der Genauigkeit der Zeit- und Bewegungsstudie, wenn die Annahmen (10.1.1, 10.1.4) erfüllt sind. Genauigkeit: ± 5 %	Zeitstudie erforderlich
	4B: Messung mit doppelt markiertem Wasser		Arbeitsplatzinspektion nicht erforderlich, Freizeitaktivitäten müssen jedoch bewertet werden
	4C: Direkte Kalorimetrie	Fehler liegen innerhalb der Messgenauigkeit oder der Genauigkeit der Zeit- und Bewegungsstudie. Genauigkeit: ± 5 %	Arbeitsplatzinspektion nicht erforderlich

6 Genauigkeit der Abschätzung des Energieumsatzes

Die Genauigkeit der aufgeführten Ergebnisse ist in Tabelle 1 als Variationskoeffizient (CV) angegeben, d. h. als das prozentuale Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert, und sollten als indikative Werte verstanden werden, die sich aufgrund der nachfolgend behandelten unkontrollierten Einflüsse erhöhen können. Die Genauigkeit nimmt von Stufe 1 nach Stufe 4 zu und so weit wie möglich sollte das genaueste Verfahren angewendet werden.

- Auf Stufe 1, *Screening*, liefert das Verfahren nur eine grobe Abschätzung und weist einen beträchtlichen Fehlerumfang auf. Hierdurch wird seine Genauigkeit beträchtlich eingeschränkt. Auf dieser Stufe ist eine Arbeitsplatzinspektion nicht erforderlich.
- Auf Stufe 2, *Beobachtung*, hängt die Genauigkeit der Zeit- und Bewegungsstudie von der Genauigkeit der verwendeten Gleichungen ab (siehe Anhang B), am meisten aber vom Ausbildungsgrad der beobachtenden Person und ihren Kenntnissen der Arbeitsbedingungen: Die Fehlermöglichkeiten sind hoch.
- Auf Stufe 3, *Analyse*,

- wird die Genauigkeit des abgeschätzten Energieumsatzes durch die Genauigkeit der verwendeten Beziehung ($HR - M$) beeinflusst, da andere Stressfaktoren die Herzfrequenz beeinflussen können;
- die Genauigkeitsstufe von 10 %-15 % (Malchaire et al. 2017) wird in der Praxis nur erreicht (Rodahl et al. 1974; Dubé et al. 2016), wenn die Beziehung ($HR - M$) für jede Person während eines Herz-Stresstests mit Tätigkeiten kalibriert wird, die für die Art der betrachteten Arbeit repräsentativ sind (vgl. 9.1.3) und wenn die Abschätzungen für die thermische HR-Komponente korrigiert werden (Anhang E) (Vogt et al. 1973; Kampmann et al. 2001). Andernfalls erhöht sich der Fehler bei der Verwendung von für Gruppen definierten (Anhang C) Verhältnissen ($HR - M$) erheblich und die Genauigkeitsstufe fällt unter die der Verfahren der Stufe 2 (Bröde und Kampmann 2019);
- die Genauigkeit der Bewertung mit Beschleunigungsaufnehmern hängt stark von den verwendeten Geräten und von der Art der Arbeit ab, und das Verfahren scheint für die langfristige Bewertung besser geeignet zu sein als für eine kurzfristige Bewertung.
- Auf Stufe 4, *Expertise*, wird die Genauigkeit über die Dynamik der Sauerstoffaufnahme sowie durch das Messsystem bestimmt (Bestimmung des Gasvolumens und Sauerstoffgehalts).

Es kann angenommen werden, dass:

- die Schwankungsbreite bei einer eingearbeiteten Person unter Laborbedingungen etwa 5 % beträgt;
- unter Praxisbedingungen, d. h., wenn die zu untersuchende Tätigkeit von Versuch zu Versuch nicht exakt gleich ist, mit einer Schwankungsbreite bis 20 % gerechnet werden kann;
- unter heißen Bedingungen kann ein um 7 % je Grad Anstieg der Kerntemperatur erhöhter Energieumsatz in Zusammenhang mit dem Q_{10} -Effekt erwartet werden, typischerweise ist $Q_{10} = 2$. Diese Erhöhung kann zwischen verschiedenen Personen mit Q_{10} -Werten zwischen 1 und 8 (Kampmann und Bröde 2015) stark variieren und kann weit unterhalb einer Sauerstoffaufnahme von $1 \text{ l O}_2 \cdot \text{min}^{-1}$ auftreten;
- unter kalten Bedingungen kann ein maximaler Anstieg bis 400 W beobachtet werden, falls Kältezittern auftritt;
- durch schwere Bekleidung könnte sich der Energieumsatz auch um 20 % oder mehr erhöhen, da dadurch das Gewicht, das von der Person getragen wird, zunimmt und ihre Beweglichkeit abnimmt.

Es muss beachtet werden, dass die Genauigkeit auch von Folgendem abhängt:

- die Repräsentativität des erfassten Zeitraums;
- die mögliche Störung der üblichen Tätigkeiten durch den Beobachter und/oder das Verfahren. In diesem Zusammenhang scheint das auf Aufzeichnungen der Herzfrequenz basierende Verfahren eines der Verfahren zu sein, die die Tätigkeit am wenigsten beeinträchtigen;
- die Anzahl der Messungen: Wiederholung ist ein Verfahren zur Minimierung zufälliger Messabweichungen. Basierend auf dem CV eines erwartungstreuen Schätzwertes nähert die Formel $(\text{tatsächlicher CV} / \text{gewünschter CV})^2$ die erforderliche Anzahl der Wiederholungen an (Vogt et al. 1976). Dies bedeutet, dass zum Erreichen einer 10-%-Genauigkeitsstufe zwei Messungen mit einem Verfahren erforderlich wären, das eigentlich eine Genauigkeit von 14 % liefert, und bei 20 % wären vier Wiederholungen erforderlich, bei 30 % sogar 9. Natürlich funktioniert diese Verbesserung nur, wenn keine inhärenten systematischen Messabweichungen vorliegen.

7 Stufe 1, Screening: Klassifikation des Energieumsatzes nach Tätigkeitsarten

Der Energieumsatz kann näherungsweise durch Anwendung der in Anhang A angegebenen Klassifikation abgeschätzt werden. In Tabelle A.1 ist der Energieumsatz in fünf Klassen unterteilt: Ruhe, niedriger Energieumsatz, mittlerer Energieumsatz, hoher Energieumsatz, sehr hoher Energieumsatz. Für jede Klasse sind ein Wertebereich für den Energieumsatz sowie einige Beispiele angegeben. Diese Aktivitäten schließen kurze Ruhepausen ein. Die in Tabelle A.1 angegebenen Beispiele verdeutlichen die Klassifikation.

Da die Genauigkeit dieses Verfahrens gering ist, sollte es nur für Klassifizierungszwecke ohne Interpolation zwischen den 4 Stufen verwendet werden.

8 Stufe 2, Beobachtung

8.1 Bestimmung des Energieumsatzes bei einer bestimmten Aktivität

Anhang B enthält Mittelwerte oder Gleichungen zur Abschätzung des Energieumsatzes in Watt in den folgenden Fällen:

- im Ruhezustand;
- beim Laufen mit/ohne Last bei $< 6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$;
- beim Laufen mit/ohne Last bei $\geq 6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$;
- beim Auf- und Absteigen von Treppen und Leitern;
- beim Anheben oder Absenken von Lasten ohne Fortbewegung;
- bei Tätigkeiten ohne Fortbewegung, aus der Beobachtung des an der Arbeit beteiligten Körpersegmentes: beide Hände, ein Arm, zwei Arme, der gesamte Körper;
- unter Berücksichtigung der Körperhaltung: Sitzen; Knien; Hocken; Stehen; Stehen in gebeugter Haltung.

8.2 Bestimmung des mittleren Energieumsatzes über einen bestimmten Zeitraum

Zur Bestimmung des mittleren Energieumsatzes über einen bestimmten Zeitraum ist es erforderlich, eine detaillierte Studie der Arbeit durchzuführen. Dies beinhaltet:

- Bestimmung der in diesem Zeitraum durchgeführten Tätigkeiten;
- Abschätzung des Energieumsatzes bei jeder dieser Tätigkeiten unter Berücksichtigung ihrer Eigenschaften und Verwendung der Daten in Anhang B: die Geschwindigkeit der Bewegung, die überwundenen Höhenunterschiede, die bewegten Gewichte, die Anzahl der durchgeführten Tätigkeiten usw.;
- Bestimmung der für jede Tätigkeit benötigten Zeit über den gesamten betrachteten Zeitraum.

Der zeitbezogene mittlere Energieumsatz in dem Zeitraum kann dann mit folgender Gleichung bewertet werden:

$$M = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n M_i t_i \quad (1)$$

Dabei ist

- M der mittlere Energieumsatz des Arbeitszyklus, in W;
- M_i der Energieumsatz der Tätigkeit i , in W;
- t_i die Dauer der Tätigkeit i , in min;
- T die Gesamtdauer des betrachteten Zeitraums in Minuten, die gleich der Summe der Dauer der Tätigkeiten t_i ist.

Das Verfahren für die Bestimmung von Zeit und Tätigkeiten wird in Anhang B näher beschrieben.

9 Stufe 3, Analyse

9.1 Bestimmung des Energieumsatzes mit Hilfe der Herzfrequenz

9.1.1 Kurzbeschreibung des Verfahrens

Bei einer dynamischen Arbeit, bei der größere Muskelgruppen eingesetzt werden und die nur einen kleinen Anteil an statischen Muskelbelastungen und psychische Belastungen aufweist, darf der Energieumsatz durch Messungen der Herzfrequenz während der Arbeit abgeschätzt werden. Unter solchen Bedingungen besteht eine lineare Beziehung zwischen dem Energieumsatz und der Herzfrequenz. Werden die oben angeführten Einschränkungen berücksichtigt, kann dieses Verfahren genauer sein als die Schätzverfahren für Stufe 1 und Stufe 2 (siehe Tabelle 1 und Abschnitt 6), und es ist erheblich weniger komplex als die unter Stufe 4 aufgelisteten Verfahren.

Die Beziehung zwischen Herzfrequenz und Energieumsatz kann wie folgt umschrieben werden:

$$M = a + b \text{ HR} \quad (2)$$

Dabei ist/sind

- M der Energieumsatz, in W;
- HR die gemessene Herzfrequenz, in Schläge·min⁻¹;
- a und b Koeffizienten.

Die Herzfrequenz kann kontinuierlich aufgezeichnet werden, z. B. mit Hilfe von Telemetrie-Einrichtungen oder, auf Kosten einer Abnahme der Genauigkeit, durch Zählen des arteriellen Pulses von Hand.

Die durchschnittliche Herzfrequenz lässt sich über festgelegte Zeitintervalle, z. B. 1 min, über einen bestimmten Zeitraum oder über die gesamte Schicht errechnen.

Die Genauigkeit dieser Abschätzung des Energieumsatzes hängt von Folgendem ab:

- der Genauigkeit und Gültigkeit der Beziehung (2);
- der Größe der nicht mit der dynamischen Muskelbelastung in Zusammenhang stehenden HR-Komponenten.

9.1.2 Genauigkeit der Beziehung (HR — M)

Die Beziehung zwischen Herzfrequenz und Energieumsatz kann mit verschiedenen Verfahren, aufgeführt nach abnehmender Genauigkeit, bestimmt werden:

- Das genaueste Verfahren zeichnet die Herzfrequenz und den entsprechenden Sauerstoffverbrauch bei unterschiedlichen Anstrengungsstufen während einer Belastung des Herzens auf, z. B. auf einem Ergometer oder einem Laufband. Die Beziehung (HR – M) kann verwendet werden, wenn die Zeitspannen der Anstrengungen jeder Stufe so lang sind, dass für HR und Sauerstoffverbrauch stabile Werte erreicht werden. Ein solches Verfahren ist sehr anstrengend und wird üblicherweise in einem medizinischen Umfeld durchgeführt.
- Ein einfacheres Verfahren besteht aus der Aufzeichnung der stabilen Herzfrequenz im Verlauf einiger dynamischer Anstrengungen, deren Energieumsatz bekannt ist. Die Genauigkeit ist geringer, da der Sauerstoffverbrauch nicht gemessen wird.
- Der Ausdruck (3) lässt sich aus den folgenden Bewertungen herleiten:
- der Herzfrequenz im Ruhezustand unter neutralen thermischen Bedingungen, HR_0 , Schläge·min⁻¹;
- dem Energieumsatz im Ruhezustand, M_0 , W;
- dem maximalen Arbeitsleistungsvermögen, MWC, W;
- der maximalen Herzfrequenz HR_{max} , Schläge·min⁻¹;
- dem Anstieg der Herzfrequenz je Einheit des Energieumsatzes: $RM = (HR_{max} - HR_0)/(MWC - M_0)$.

Die Beziehung (HR – M) ist dann gegeben durch:

$$M = M_0 + (HR - HR_0)/RM \quad (3)$$

Die Genauigkeit dieser Beziehung ist eine Funktion der Gültigkeit der Messungen oder Abschätzungen von HR_0 , M_0 , HR_{max} und MWC. Anhang C enthält Gleichungen zur Abschätzung dieser 4 Parameter.

In Tabelle C.1 sind direkte Abschätzungen der Beziehung (HR – M) für Personen im Alter von 20 Jahren bis 65 Jahren mit einem Körpergewicht von 50 kg bis 110 kg angegeben. Die Präzision ist hier weiter vermindert.

9.1.3 Gültigkeit der Beziehung (HR — M)

Die Frage bezieht sich auf die Relevanz der Beziehung (HR – M), die direkt oder indirekt von einer Belastung des Herzens unter Verwendung der großen Muskelgruppe der Beine abgeleitet wird, wenn eine Arbeit mit den oberen Gliedmaßen ausgeführt wird. Studien haben gezeigt, dass V_{O2max} bei manuellen Anstrengungen in Form von Kurbelbewegungen 23 % bis 30 % geringer war als der Wert, der beim gleichen HR-Wert während einer Belastung des Herzens auf einem Fahrrad oder Laufband gemessen wurde. Dies zeigt, dass die Beziehung (HR – M) zu einer Überbewertung des tatsächlichen Energieaufwands führt.

9.1.4 Nicht mit der dynamischen Muskelbelastung in Zusammenhang stehende HR-Komponenten

Die Herzfrequenz zu einem bestimmten Zeitpunkt kann als Summe aus verschiedenen Komponenten aufgefasst werden:

$$HR = HR_0 + \Delta HR_M + \Delta HR_S + \Delta HR_{th} + \Delta HR_N + \Delta HR_\epsilon \quad (4)$$

Dabei ist

- HR_0 die Herzfrequenz im Ruhezustand, in Schlägen je Minute, unter neutralen thermischen Bedingungen;
- ΔHR_M der Anstieg der Herzfrequenz, in Schlägen je Minute, auf Grund von dynamischer Muskelbelastung unter neutralen thermischen Bedingungen;
- ΔHR_S der Anstieg der Herzfrequenz, in Schlägen je Minute, auf Grund von statischer Muskularbeit (diese Komponente hängt von der Beziehung zwischen aufgebrachter Kraft und maximaler willkürlicher Kraft der arbeitenden Muskelgruppe ab);
- ΔHR_{th} der Anstieg der Herzfrequenz, in Schlägen je Minute, auf Grund von thermischer Belastung (die thermische Komponente wird in ISO 9886 behandelt);
- ΔHR_N der Anstieg der Herzfrequenz, in Schlägen je Minute, auf Grund psychischer Belastung;
- ΔHR_ϵ die Änderung der Herzfrequenz, in Schlägen je Minute, auf Grund anderer Faktoren, z. B. Atmungseffekten, Tag-Nacht-Rhythmus, Dehydratation.

Unter statischer Muskularbeit, dynamischer Muskularbeit mit kleinen Muskelgruppen und/oder psychischer Belastung kann sich das Verhältnis zwischen dem Anstieg und dem Abfall der Herzfrequenz und dem Energieumsatz signifikant ändern. Die Komponenten ΔHR_S , ΔHR_N und ΔHR_ϵ hängen mit den Arbeitsbedingungen zusammen und können weder abgeschätzt noch entfernt werden.

Die thermische Komponente ΔHR_{th} könnte zu einer starken Überbewertung des Energieumsatzes führen. Das kann vermieden werden, indem die HR-Aufzeichnungen in einer Zeitspanne ohne Wärmebelastung erfasst werden. Die Körpertemperatur kann jedoch auch in neutralem oder kühlen Klima je nach Aktivitätsgrad über das Ruheniveau ansteigen. Daher ist es zwingend erforderlich, entweder die Kerntemperatur begleitend zu überwachen (Kampmann et al. 2001) oder Messungen der Herzfrequenz in Bezug auf thermische Effekte zu korrigieren, wie in dem in Anhang E beschriebenen Verfahren.

Wenn die statischen Muskelbelastungen und psychische Komponenten nicht vernachlässigbar sind, führt das Verfahren zu einer Überbewertung des Energieaufwands, die bei einer Bestimmung der Belastung in warmen Umgebungen zu einem erhöhten Schutz der exponierten Personen bzw. zu einer unnötigen Einschränkung der Arbeitsbelastung führt. Es ist zu beachten, dass dies bei der Bestimmung der Belastung in kalten Umgebungen zu einem verringerten Schutzniveau führt.

9.2 Bestimmung des Energieumsatzes durch Beschleunigungsmessung (Akzelerometrie)

Der über den Ruheumsatz hinaus erhöhte Energieumsatz steht üblicherweise mit einem Anstieg der Körperbewegungen in Zusammenhang. Diese vermehrte Bewegung kann mit Beschleunigungsaufnehmern beurteilt werden, die am Rumpf (z. B. Schrittzähler) oder an diversen Körperstellen positioniert werden können, um die zusätzliche Beurteilung der Arm- und Beinbewegungen zu ermöglichen. Aufgrund der zunehmenden Beachtung von physischer Aktivität und Gesundheit ist die Verwendung von Beschleunigungsaufnehmern für die Bestimmung des gesamten täglichen Energieverbrauchs (TEE, en: Total Daily Energy Expenditure) oder des aktivitätsbasierten Energieverbrauchs (AEE, en: Activity Based Energy Expenditure) in den letzten 10 Jahren enorm angestiegen. Dies wurde auch von der Integration solcher Geräte in kleine Fitness-Überwachungsgeräte stimuliert, die häufig mit Apps auf Mobiltelefonen verbunden

sind, sowie von der weit verbreiteten Nutzung einfacher Schrittzähler zur Überwachung der persönlichen Aktivität und von der zunehmenden Verwendung von auf wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhender Systeme zur Nachverfolgung von Tätigkeiten und des Energieumsatzes.

Aufgrund der proprietären Natur vieler dieser Geräte stehen die zugrunde liegenden Umrechnungen der Daten des Beschleunigungsaufnehmers in den Energieverbrauch in den meisten Fällen nicht öffentlich zur Verfügung.

Auf wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhende Systeme verwenden diverse Technologien, wobei eine Entwicklung von piezoelektrischen Sensoren, die nicht das Gravitationsfeld und somit auch nicht die Körperposition erfassen können, hin zu piezoresistiven und kapazitiven Sensoren zu beobachten ist, die das Gravitationsfeld messen und daher auch die Körperhaltung (Stehen/Sitzen/Liegen) erkennen können. Einige Systeme verwenden einzelne Beschleunigungsaufnehmer, während andere mehrachsige Systeme oder sogar mehrere Sensoren auf verschiedenen Körperteilen verwenden. Systeme unterscheiden sich in der Abtastfrequenz, im Gewicht (8 g bis 200 g), Sensorposition(en) auf dem Körper und Dynamikbereich (es wurde ein Bereich von -6 g bis $+6\text{ g}$ empfohlen). Mehrere Forschungssysteme verwenden zusätzliche Informationen über die Person (Körpermasse, Größe, Alter, Geschlecht) und dynamische Messungen (Herzfrequenz, Hauttemperatur, oberflächenbasierte Schätzung der Kerntemperatur, galvanische Hautreaktion, Wärmestrom), obwohl letztere nicht notwendigerweise zu besseren Vorhersagen des Energieaufwands führen.

Eine Vielzahl von Forschungssystemen wurde über mehrere Tage gegen Messungen mit doppelt markiertem Wasser (en: Doubly Labelled Water, DLW, siehe 10.2) validiert (Plasqui et al. 2013; Plasqui und Westerterp 2007). Korrelationen zwischen Ergebnissen von Beschleunigungsaufnehmern (Schrittzähler, Aktivitätsgrade, AEE, TEE) und erfassten DLW-Messungen zeigten große Abweichungen zwischen Studien und Ausrüstungsarten, wobei die Korrelationen von nicht signifikant bis 0,91 reichten. Während die mittleren Unterschiede auf Gruppenebene zwischen DLW und TEE oder AEE häufig gering waren, war die Variabilität recht groß. Obwohl einige Systeme für langfristige Abschätzungen des Energieumsatzes effektiv eingesetzt werden können, stehen für solche Systeme weniger Informationen für die Messung über kurze Einsatzzeiträume zur Verfügung. Zusätzlich ist die Art der Arbeit wichtig, da z. B. Hand-/Armarbeit im Sitzen von den meisten Systemen nicht als Arbeit erkannt wird.

10 Stufe 4, Expertise

10.1 Bestimmung des Energieumsatzes durch Messung der Sauerstoffverbrauchsrate

10.1.1 Partial- und Integralverfahren

Der Energieumsatz wird traditionell mit zwei Hauptverfahren bewertet:

- nach dem Partialverfahren, das bei leichten und mäßig schweren Arbeiten anzuwenden ist;
- nach dem Integralverfahren, das bei kurzzeitiger schwerer Arbeit anzuwenden ist.

Die Anwendung des Partialverfahrens lässt sich mit der folgenden Annahme begründen:

- bei leichten und mäßig schweren Arbeiten erreicht die Sauerstoffaufnahme schon nach einer kurzen Arbeitsperiode einen stabilen Zustand, der dem Sauerstoffbedarf entspricht [Bild 1 a)];
- diese Annahme gilt, solange die Körpertemperatur stabil ist, bei der Arbeit keine anderen Arten von Muskelfasern eingesetzt werden oder bis eine Laktatazidose auftritt.

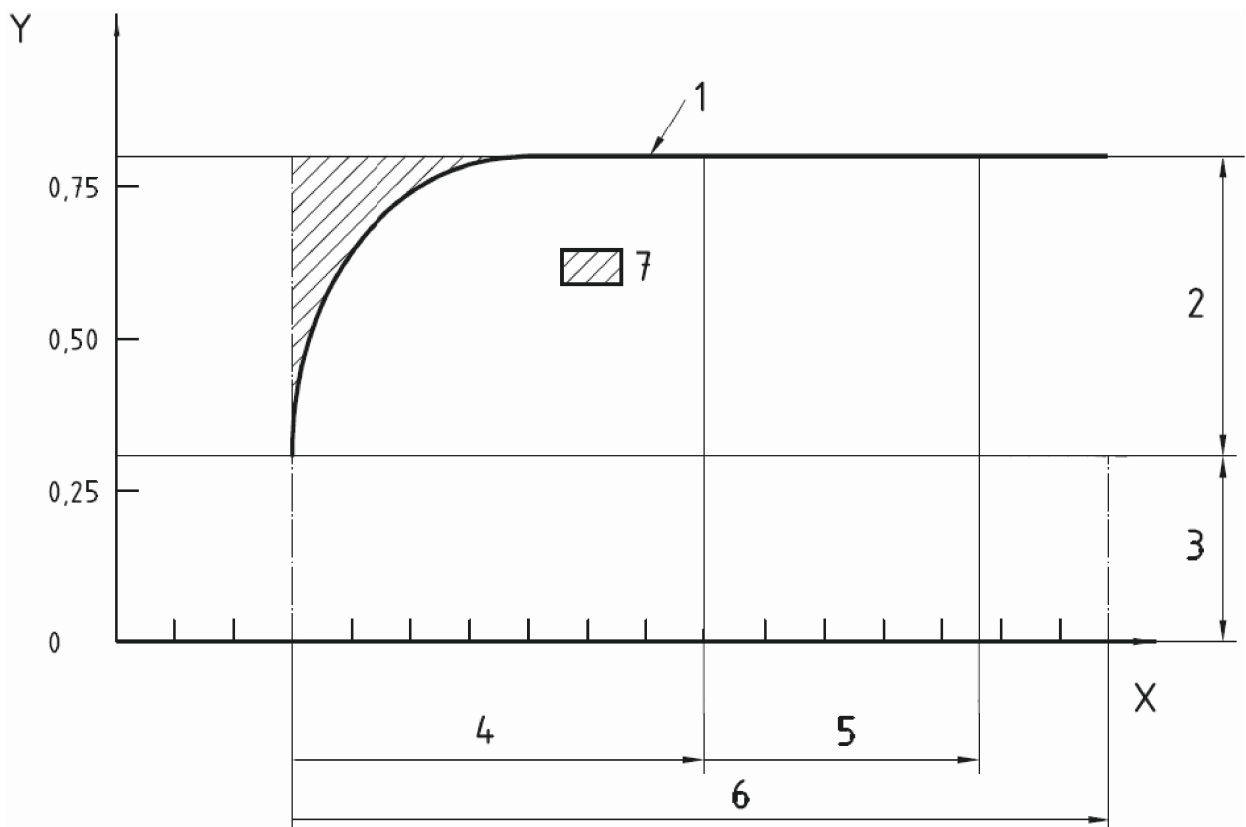
Andernfalls tritt eine sog. langsame Komponente (en: „slow component“) der Sauerstoffaufnahme auf [z. B. Gaesser und Poole 1996; Barstow und Molé 1991; vgl. Bild 1 b)], wodurch der Wert des für die Abschätzung der Energieumsätze (vgl. 10.1.2, 10.1.4) zu verwendenden energetischen Äquivalents ungewiss wird und insgesamt zu einer Überbewertung des Energieumsatzes führen kann, obwohl die Sauerstoffaufnahme korrekt gemessen wird.

Wenn eine „langsame Komponente“ vorliegt [Bild 1 b)], stellt sich bei der gemessenen Sauerstoffaufnahme bei konstanter Arbeitsintensität für einige Zeit kein stabiler Zustand ein, weshalb der Wert von der Zeit der Messungen abhängen kann. Aus diesem Grund kann die langsame Komponente bei einer bestimmten Arbeitsbelastung zu einer Überbewertung des Energieumsatzes und der Sauerstoffaufnahme führen.

Eine Erhöhung der Körpertemperatur kann deutlich unter einer Sauerstoffaufnahme von $1 \text{ l O}_2 \cdot \text{min}^{-1}$ beobachtet werden und führt aufgrund des Q_{10} -Effekts zu einer erhöhten Sauerstoffaufnahme.

Auf Bild 1 a) ist die Vorgehensweise, der beim Partialverfahren zu folgen ist, dargestellt.

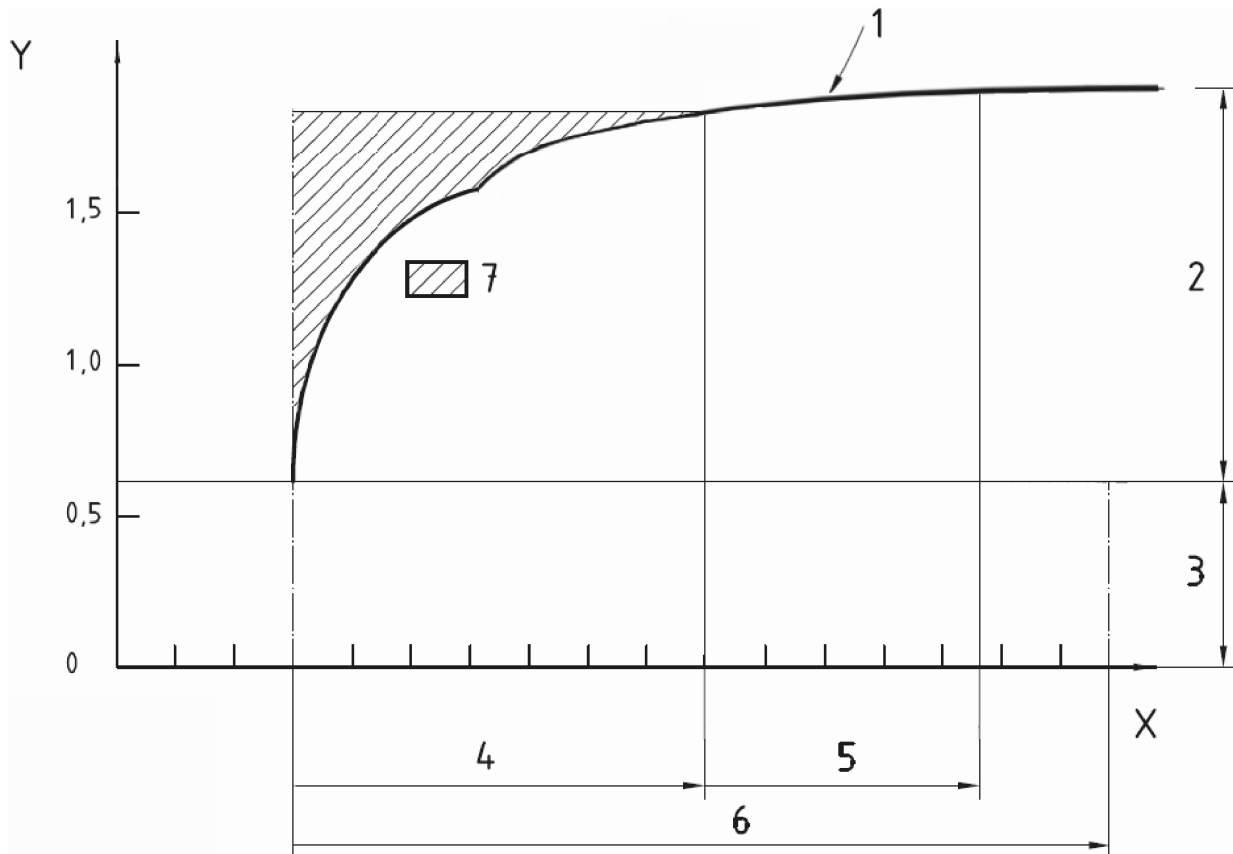
Da der Gleichgewichtszustand erst nach 3 min bis 5 min erreicht wird, wird mit dem Auffangen der ausgeatmeten Luft nach etwa 5 min (Vorlaufzeit) begonnen, ohne dass die Arbeit unterbrochen wird. Die Arbeit wird noch 5 min bis 10 min (Messzeit) fortgesetzt. Das Auffangen der Ausatemungsluft kann entweder vollständig (z. B. mit einem Douglassack) oder durch regelmäßige Probenahme (z. B. mit einem Gaszähler) erfolgen. Es wird beendet, wenn ausreichend ausgeatmete Luft aufgefangen wurde oder sich z. B. die Arbeitsbelastung ändert.



Legende

- X Zeit, min
- Y Sauerstoffaufnahme, l/min
- 1 erforderliche Sauerstoffaufnahme
- 2 arbeitsbedingter Anstieg der Sauerstoffaufnahme
- 3 Sauerstoffaufnahme im Ruhezustand
- 4 Vorlaufzeit
- 5 Messzeit
- 6 Arbeitsperiode
- 7 Sauerstoffdefizit

Bild 1 a) — Messung des Energieumsatzes nach dem Partialverfahren



Legende

- X Zeit, min
- Y Sauerstoffaufnahme, l/min
- 1 erforderliche Sauerstoffaufnahme
- 2 arbeitsbedingter Anstieg der Sauerstoffaufnahme
- 3 Sauerstoffaufnahme im Ruhezustand
- 4 Vorlaufzeit
- 5 Messzeit
- 6 Arbeitsperiode
- 7 Sauerstoffdefizit bis zum Start der Messung

Bild 1 b) — Messung des Energieumsatzes nach dem Partialverfahren für hohe Sauerstoffaufnahme: langsame Komponente bei konstanter Arbeitsbelastung

Um die Ergebnisse weiter auswerten und den Energieumsatz mit Daten aus der Literatur vergleichen zu können, ist es erforderlich, dass der Arbeitsverlauf (Zeit- und Bewegungsstudie) und die Häufigkeit sich wiederholender Tätigkeiten festgehalten werden. Beispiele für die Berechnung des Energieumsatzes sind im Anhang D angegeben.

Für Sauerstoffaufnahme über $1 \text{ l O}_2 \cdot \text{min}^{-1}$ wurde das Integralverfahren empfohlen. Bei schwerer Arbeit liegt der Sauerstoffbedarf über dem langzeitigen Sauerstoffaufnahmevermögen und bei sehr schwerer Arbeit kann er sogar über dem maximalen Sauerstoffaufnahmevermögen liegen. Während einer schweren Arbeit kann die Sauerstoffaufnahme nicht den Sauerstoffbedarf decken. Das Sauerstoffdefizit wird daher nach Arbeitsende ausgeglichen, sodass die Sauerstoffaufnahme langsam wieder zum Ruhewert zurückkehrt. Die den Ruhezustand überschreitende Sauerstoffaufnahme wird als zusätzlicher Sauerstoffverbrauch nach Belastung bezeichnet (EPOC, en: Excess Post-Exercise Oxygen Consumption, z.B. Gaesser und Brooks 1984; früher auch als O_2 -Schuld oder Nachverbrauch (afterburn) bezeichnet). Das Integralverfahren basiert auf der Annahme, dass das O_2 -Defizit durch den EPOC ausgeglichen wird, aber es liegen Nachweise

dafür vor, dass das O₂-Defizit üblicherweise vom EPOC überschritten wird. Somit kann der EPOC bis zu 10 l O₂–20 l O₂ betragen; und die Dauer des EPOC kann 30 min bis 40 min betragen (Smith und Mc Naughton, 1993). Das Verhältnis zwischen EPOC und O₂-Defizit kann bei harter Arbeit einen Wert von 4 erreichen (Gore und Withers, 1990).

Aufgrund der oben aufgeführten Überlegungen wird die Anwendung des Integralverfahrens nicht mehr empfohlen. Zu Informationszwecken ist das Schema des Integralverfahrens weiterhin in Anhang F aufgeführt.

10.1.2 Bestimmung des Energieumsatzes anhand der Sauerstoffverbrauchsrate

Da nur sehr kleine Sauerstoffmengen im menschlichen Körper gespeichert werden können, muss der Sauerstoff kontinuierlich durch Atmung aus der Atmosphäre aufgenommen werden. Muskeln können kurzzeitig auch ohne direkte Sauerstoffversorgung arbeiten (anaerobe Arbeit), jedoch bilden bei längeren Arbeitsperioden sauerstoffverbrauchende Stoffwechselprozesse die Hauptenergiequelle.

Der Energieumsatz lässt sich daher einschätzen, indem die Sauerstoffverbrauchsrate gemessen wird. Dabei wird das energetische Äquivalent (EE) von Sauerstoff verwendet, um die Sauerstoffverbrauchsrate in den Energieumsatz umzurechnen.

Das energetische Äquivalent hängt dabei vom Stoffwechseltyp ab, der durch den respiratorischen Quotienten (RQ) gekennzeichnet ist. Bei der Bewertung des Energieumsatzes ist oft die Verwendung eines mittleren RQ von 0,85 und eines energetischen Äquivalents von 5,68 W·h·l O₂⁻¹ ausreichend. In diesem Fall ist die Messung der Kohlenstoffdioxid-Produktionsrate nicht erforderlich. Der maximal mögliche Fehler liegt bei ±3,5 %, doch überschreitet der Fehler im Allgemeinen nicht den Wert von 1 %.

Der Energieumsatz kann daher mit Hilfe der folgenden Gleichungen bewertet werden:

$$RQ = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}} \quad (5)$$

$$EE = (0,23RQ + 0,77)5,68 \quad (6)$$

$$M = EE \times \dot{V}_{O_2} \quad (7)$$

Dabei ist

RQ der respiratorische Quotient;

$\dot{V}_{O_2}$ die Sauerstoffverbrauchsrate, in l O₂·h⁻¹;

$\dot{V}_{CO_2}$ die Kohlenstoffdioxid-Produktionsrate, in l CO₂·h⁻¹;

EE das energetische Äquivalent, in Wattstunden je Liter Sauerstoff (W·h·l O₂⁻¹);

M der Energieumsatz, in W.

10.1.3 Bestimmung der Sauerstoffaufnahme

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Sauerstoffaufnahme ist in den folgenden Unterabschnitten beschrieben.

10.1.3.1 Berechnung des STPD-Reduktionsfaktors

Zur Bestimmung der Sauerstoffaufnahme müssen die folgenden Daten gemessen oder aufgezeichnet werden:

- a) das Messverfahren;
- b) die Messzeitspanne: Partial- oder Integralverfahren nach 10.1.1;
- c) der atmosphärische Druck;
- d) das Volumen der Ausatemungsluft;
- e) die Temperatur der Ausatemungsluft;
- f) der Anteil von Sauerstoff in der Ausatemungsluft;
- g) der Anteil von Kohlenstoffdioxid in der Ausatemungsluft, falls die Bestimmung des RQ erforderlich ist.

Das Gasvolumen ist auf $\theta = 0\text{ °C}$, $p = 101,3\text{ kPa}$ (normaler atmosphärischer Druck) für ein trockenes Gas umzurechnen (STPD-Bedingungen: Standardtemperatur und -druck, trocken). Da die aufgefangene Ausatemungsluft mit Wasserdampf gesättigt ist (der Sättigungsdruck ist eine Funktion der Temperatur) und deren Temperatur von der Umgebungstemperatur bestimmt wird (ATPS-Bedingungen: atmosphärische(r) Temperatur und Druck, gesättigt), lässt sich der Reduktionsfaktor f nach der folgenden Gleichung anhand des Wasserdampfpartialdrucks (siehe Tabelle 2) berechnen:

$$f = \frac{273 \times (p - p_a)}{(273 + \theta) \times 101,3} \quad (8)$$

Dabei ist

- f der STPD-Reduktionsfaktor;
- p der gemessene Atmosphärendruck, in kPa;
- θ die Temperatur der Ausatemungsluft, in °C, gemessen im Gaszähler oder als mit der Umgebungstemperatur identisch angenommen, wenn ein Douglassack verwendet wird;
- p_a der Wasserdampfpartialdruck, in kPa, entsprechend der Temperatur θ (Tabelle 2).

**Tabelle 2 — Druck von gesättigtem Wasserdampf (kPa) für Temperaturen von 10 °C bis 37 °C
(in Schritten von 1 °C)**

Temperatur °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	1,23	1,31	1,40	1,50	1,60	1,70	1,82	1,94	2,06	2,20
20	2,34	2,49	2,64	2,81	2,98	3,17	3,36	3,56	3,78	4,00
30	4,24	4,49	4,75	5,03	5,32	5,62	5,94	6,27	—	—

Wird die aufgefangene Ausatemungsluft durch die Umgebungstemperatur auf über 37 °C aufgeheizt, so ist ein Druck von gesättigtem Wasserdampf von 6,27 kPa bei 37 °C zu verwenden.

10.1.3.2 Berechnung des Ausatemungsvolumens für STPD

$$V_{\text{exSTPD}} = V_{\text{exATPS}} \cdot f \quad (9)$$

Dabei ist

V_{exSTPD} das Ausatemungsvolumen bei STPD, in l;

V_{exATPS} das Ausatemungsvolumen bei ATPS, in l;

f wie in 10.1.3.1 definiert.

10.1.3.3 Berechnung des Volumendurchflusses

$$\dot{V}_{\text{ex}} = \frac{V_{\text{exSTPD}}}{t} \quad (10)$$

Dabei ist

$\dot{V}_{\text{ex}}$ der Volumendurchfluss, in l·h⁻¹;

t die Versuchsdauer, d. h. die Hauptzeit des Partialverfahrens und die Haupt- und Erholungszeit des Integralverfahrens (Anhang F), in h.

10.1.3.4 Berechnung des Sauerstoffverbrauchsrate

$$V_{\text{O}_2} = V_{\text{ex}} \cdot (0,209 - F_{\text{O}_2}) \quad (11)$$

Dabei ist

V_{O_2} die Sauerstoffverbrauchsrate, in l O₂·h⁻¹;

F_{O_2} der Anteil an Sauerstoff in der Ausatemungsluft.

10.1.3.5 Berechnung der Kohlenstoffdioxid-Produktionsrate

$$V_{\text{CO}_2} = V_{\text{ex}} \cdot (F_{\text{CO}_2} - 0,0003) \quad (12)$$

Dabei ist

V_{CO_2} die Kohlenstoffdioxid-Produktionsrate, in l CO₂·h⁻¹;

F_{CO_2} der Anteil an Kohlendioxid in der Ausatemungsluft.

10.1.3.6 Einfluss der Kontraktion des Ausatemungsvolumens

Das eingeatmete und das ausgeatmete Volumen sind nicht gleich, wenn RQ nicht gleich 1 ist. Die Kontraktion kann mit Hilfe der folgenden Gleichungen berücksichtigt werden:

$$V_{\text{O}_2} = V_{\text{ex}}[0,265(1 - F_{\text{O}_2} - F_{\text{CO}_2}) - F_{\text{O}_2}] \quad (13)$$

$$V_{\text{O}_2} = V_{\text{ex}}[F_{\text{CO}_2} - (1 - F_{\text{O}_2} - F_{\text{CO}_2})0,380 \times 10^{-3}] \quad (14)$$