

Bioelektrische Impedanzanalyse (BIA)

Grundlagen und Anwendung

Dejan Reljic, Hans Joachim Herrmann, Markus F. Neurath, Yurdagül Zopf

Die Körperzusammensetzung steht in engem Zusammenhang mit dem Ernährungsstatus und Gesundheitszustand. In der klinischen Praxis ist die Quantifizierung der einzelnen Körperkompartimente wie Muskelmasse, Fettmasse und Körperwasser von zentraler Bedeutung, um Therapieverläufe adäquat beurteilen zu können. Die Bioelektrische Impedanzanalyse (BIA) ist eine einfach durchzuführende, nicht-invasive und relativ kostengünstige Methode zur Bestimmung der Körperzusammensetzung. Mit ihr lassen sich mehrere Körperkompartimente gleichzeitig in einem einzigen Untersuchungsschritt beurteilen, was ein Vorteil gegenüber anderen Verfahren ist.

Einleitung

Die Körperzusammensetzung des Menschen unterliegt im Laufe des Lebens individuell unterschiedlich ausgeprägten Veränderungen. So nehmen mit zunehmendem Alter der Körperwassergehalt und die Muskelmasse kontinuierlich ab, während es gleichzeitig zu einer Zunahme und Umverteilung der Körperfett-speicher kommt. Neben diesen altersbedingten physiologischen Prozessen können aber auch bestimmte Situationen, z. B. eine chronische Mangelernährung, akute oder chronisch entzündliche Erkrankungen oder auch eine längere körperliche Inaktivität zu erheblichen Veränderungen der Körperzusammensetzung führen. So hat eine länger andauernde Mangelernährung typischerweise eine progressive Reduktion der Körper- und Muskelmasse zur Folge, die mit einem Verlust an Alltagsfunktionalität einhergeht und längerfristig das Morbiditäts- und Mortalitätsrisiko erhöhen kann [1, 2]. Beim Krankheitsbild Adipositas zeigt sich dagegen ein übermäßig hoher Körperfettanteil und zumeist auch ein ungünstiges Fettverteilungsmuster mit verstärkter Fettdepotbildung im Bauchraum, was mit einem erhöhten Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen, entzündlichen Erkrankungen und Krebserkrankungen assoziiert ist [3]. Kenntnisse über die Zusammensetzung des Körpers geben demnach Hinweise auf den Ernährungs- und Gesundheitszustand und sind für die klinische Praxis von zentraler Bedeutung, um Therapieverläufe differenziert beurteilen zu können. Die Computertomografie (CT) und Magnetresonanztomografie (MRT) gelten als Goldstandard zur Bestimmung der

Wichtige Abkürzungen

Physiologische Kompartimente

BCM	Körperzellmasse (<i>body cell mass</i>)
ECM	extrazelluläre Masse (<i>extracellular mass</i>)
ECW	extrazelluläres Wasser (<i>extracellular water</i>)
FM	Fettmasse (<i>fat mass</i>)
FFM	fettfreie Masse, häufig als Magermasse bezeichnet
ICW	intrazelluläres Wasser (<i>intracellular water</i>)
SMM	Skelettmuskelmasse (<i>skeletal muscle mass</i>)
TBW	Gesamtkörperwasser (<i>total body water</i>)

Methodik

ADP	Luftverdrängungsplethysmografie (<i>air displacement plethysmography</i>)
BIA	Bioelektrische Impedanzanalyse
BIVA	Bioelektrische Impedanz-Vektorenanalyse
BIS	Bioimpedanz-Spektroskopie
CT	Computertomografie
DXA	Dual-Röntgen-Absorptiometrie
MF-BIA	Multi-Frequenz-BIA
MRT	Magnetresonanztomografie
PA	Phasenwinkel
R	Resistanz (R)
SF-BIA	Einfach-Frequenz-BIA
Xc	Reaktanz
Z	Impedanz

Körperzusammensetzung [4, 5]. Diese Methoden zeichnen sich durch eine sehr hohe Messgenauigkeit aus, allerdings ist ein Routine-Einsatz durch hohe Kosten, den Bedarf an speziell ausgebildetem Personal, Zeitaufwand für die Durchführung der Messung sowie vorliegende Strahlenbelastungen (CT) limitiert.

Die Bioelektrische Impedanzanalyse (BIA) ist ein alternatives Verfahren, mit der sich die Körperzusammensetzung vergleichsweise kostengünstig, schnell und unkompliziert bestimmen lässt. Dadurch können auch größere Personenkollektive mit relativ geringem Aufwand untersucht werden. Da bei der BIA keine Strahlenbelastung auftritt und portable Geräte zur Verfügung stehen, kann die Methode zudem sicher für Verlaufsmessungen in verschiedenen Settings (z. B. auch bei bettlägerigen PatientInnen) eingesetzt werden. Allerdings unterliegt die Methode einigen Limitationen, denn die Messgenauigkeit kann durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst werden. Der vorliegende Beitrag soll einen Einblick in die theoretischen Grundlagen der Messmethodik geben sowie Einsatzmöglichkeiten und Grenzen der verschiedenen BIA-Systeme im Kontext zu anderen Verfahren zur Bestimmung der Körperzusammensetzung aufzeigen.

Lernziele

Die Leserin/der Leser soll nach der Lektüre dieses Beitrags:

- ▶ die Körperkompartimente und ihre Bedeutung kennen,
- ▶ den durchschnittlichen Anteil von Fettmasse, fettfreier Masse und Körperwasser im menschlichen Körper nennen können,
- ▶ das grundlegende Prinzip der Bioelektrischen Impedanzanalyse (BIA) erklären können,
- ▶ wissen, dass die BIA Widerstände im Körper misst und daraus die Körperzusammensetzung per Formel berechnet, diese jedoch nicht direkt gemessen wird,
- ▶ sich bewusst sein, dass die Berechnungsformel für die Testperson bezüglich verschiedener Parameter wie Alter, Geschlecht und Hydratationsstatus geeignet sein muss,
- ▶ wissen, dass es verschiedene BIA-Messsysteme gibt, und die wichtigsten charakterisieren können,
- ▶ Faktoren kennen und vermeiden können, die die BIA-Ergebnisse beeinflussen bzw. verfälschen.

Die Körperkompartimente

Rein biochemisch betrachtet besteht der menschliche Körper zu 99 % aus den 6 chemischen Elementen Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Kalzium und Phosphor. Nach funktionellen Gesichtspunkten kann die Körpermasse im Wesentlichen in die Komponenten Wasser, Muskeln, Fett und Knochen unterteilt werden [6]. Die quantitative Verteilung dieser einzelnen Komponenten hängt v. a. von genetischen Faktoren, dem Ernährungs- und Bewegungsverhalten

sowie vom Gesundheitszustand eines Individuums ab. Um einfache, besser veranschaulichte Darstellungen der Körperzusammensetzung zu erhalten, wurden unterschiedliche Modelle entwickelt, die diese Hauptkomponenten in bestimmte Kompartimente zusammenfassen. Die Unterteilung in verschiedene Körperkompartimente stellt letztendlich auch die Grundlage für die daraus abgeleiteten Abschätzungen der Körperzusammensetzung dar (♦ Abbildung 1).

Im ♦ Kasten „Körperkompartiment-Modelle“ auf den Seiten M476 und M477 werden die einzelnen Modelle vorgestellt und die gängigsten darauf basierenden Messmethoden kurz beschrieben.

	Fettmasse	Fettmasse	Fettmasse
Körpergewicht	fettfreie Masse	Körperzellmasse	Körperzellmasse
			intrazelluläres Wasser
		extrazelluläre Masse	extrazelluläre Masse
			extrazelluläres Wasser
1-Kompartiment-Modell	2-Kompartiment-Modell	3-Kompartiment-Modell	Erweitertes 3-Kompartiment-Modell

Abb. 1: Körperkompartiment-Modelle

Körperkompartiment-Modelle

Ein-Kompartiment-Modell

Beim Ein-Kompartiment-Modell wird lediglich das Körpergewicht zur Beurteilung herangezogen. Dieser Messwert ist von zentraler Bedeutung und kann mithilfe einer geeichten Waage sehr einfach und mit hoher Präzision bestimmt werden. Allerdings lassen sich aus diesem Modell keine differenzierteren Aussagen über die genaue Zusammensetzung des Körpers treffen.

Der Body-Mass-Index (BMI), der das Körpergewicht in Relation zur Körpergröße (kg/m^2) setzt, ist der gängigste Parameter zur Beurteilung des Gewichtsstatus und Grundlage für die Klassifizierung verschiedener Risikogruppen. Zwar zeigt sich in großen epidemiologischen Studien, dass der BMI auch mit dem Körperfettanteil und diversen kardiometabolischen Risikomarkern korreliert, allerdings ist mittlerweile auch hinreichend bekannt, dass aus dem BMI abgeleitete Abschätzungen der Körperzusammensetzung und daraus gezogene Prognosen zu Gesundheitsrisiken auf individueller Ebene sehr ungenau sein können [7]. Trainierte SportlerInnen können z. B. aufgrund einer ausgeprägten Muskelmasse einen deutlich über der Norm liegenden BMI aufweisen und deswegen als übergewichtig gelten, obwohl ihr Körperfettanteil niedrig ist.

Zwei-Kompartiment-Modell

Beim Zwei-Kompartiment-Modell wird der Körper in zwei Bereiche unterteilt: Die fettfreie Masse (FFM, häufig auch als Magermasse bezeichnet) und die Fettmasse (FM). Die Grundlage für dieses Modell lieferten densitometrische Untersuchungen zur Bestimmung der Körperdichte durch Unterwasserwiegen, die in den 1940er Jahren durchgeführt wurden [8]. Daraus ging hervor, dass der Dichtewert von Körperfett $0,9 \text{ g}/\text{cm}^3$ und der von fettfreier Masse $1,1 \text{ g}/\text{cm}^3$ beträgt. Das Zwei-Kompartiment-Modell ist aufgrund seiner Einfachheit das am weitesten verbreitete Modell zur Bestimmung der Körperzusammensetzung und beruht auf der einfachen Gleichung:

$$\text{Körpergewicht (kg)} = \text{fettfreie Masse (kg)} + \text{Fettmasse (kg)}$$

Die auf diesem Modell basierenden Messmethoden bestimmen in der Regel zunächst die Körperdichte und leiten daraus eine der beiden Komponenten (meist die FM) ab, während die andere Komponente aus der Differenz zum Körpergewicht errechnet wird. Für die Ableitung der FM aus der Körperdichte werden am häufigsten die Formeln nach Brozek [9] und Siri [10] verwendet. Zu den bekanntesten Mess-

methoden, die das Zwei-Kompartiment-Modell nutzen, zählen das Unterwasserwiegen (Hydrodensitometrie), die Luftverdrängungsplethysmografie (ADP) und die Hautfalten(dicke)messung (Calipometrie).

Hydrodensitometrie (Unterwasserwiegen)

Das Unterwasserwiegen galt lange als Referenzmethode zur Bestimmung des Körperfettanteils, sodass in der Vergangenheit auch viele andere Messmethoden daran validiert wurden. Basierend auf dem Archimedischen Prinzip taucht der/die ProbandIn dabei in einen speziellen Wassertank ein. Anhand der Menge des verdrängten Wassers wird zunächst die Körperdichte ermittelt und anschließend die FM berechnet [11]. Allerdings ist diese Messung, die ein vollständiges Eintauchen unter Wasser erfordert, für bestimmte Personengruppen wenig geeignet und wegen des hohen technischen Aufwands und der damit verbundenen Kosten speziellen Forschungseinrichtungen vorbehalten.

Luftverdrängungsplethysmografie (ADP)

Die ADP basiert auf den gleichen Prinzipien wie das Unterwasserwiegen, allerdings wird bei diesem Verfahren statt der Wasser- die Luftverdrängung genutzt. Dafür begibt sich die Testperson in eine spezielle Kammer, in der die Körperdichte anhand Veränderungen des Luftdrucks bestimmt wird [12]. Die im Vergleich zur Hydrodensitometrie praktikablere und auch kürzere Messung ermöglicht die Anwendung bei Personen, für die das Unterwasserwiegen ungeeignet ist. Allerdings erfordert auch dieses Messverfahren einen hohen apparativen Aufwand, sodass aufgrund der Kosten ebenfalls keine routinemäßige Anwendung erfolgt.

Calipometrie (Hautfalten[dicke]messung)

Bei der Hautfalten(dicke)messung wird anhand eines Calipers an verschiedenen Stellen des Körpers die Hautfaltendicke gemessen. Diese Methode ist aufgrund der sehr einfachen und kostengünstigen Durchführung seit Jahrzehnten sehr weit verbreitet. Das Verfahren zielt darauf ab, das Unterhautfettgewebe zu messen, welches etwa 40–60 % des Gesamtkörperfettanteils ausmacht [13] und wesentlich leichter zu erfassen ist als das viszerale (= im Bauchraum befindliche) Fett. Je nach Methode werden bis zu 19 verschiedene Stellen am Körper gemessen. Mithilfe unterschiedlicher Formeln wird zunächst die Körperdichte bestimmt und daraus die FM abgeschätzt [14]. Der größte Kritikpunkt an der Methode ist, dass die Messwerte sehr stark untersucherabhängig sind und deswegen in Längsschnittuntersuchungen eine hohe Varianz aufweisen können [13]. Werden die Bestimmungen im Verlauf

von einem/einer erfahrenen UntersucherIn durchgeführt, kann die Calipometrie aber auch sehr reliabel sein und Ergebnisse liefern, die gut mit der Hydrodensitometrie [15] und auch CT-Messungen übereinstimmen [16]. Da die verschiedenen Berechnungsformeln an unterschiedlichen Populationen validiert wurden, ist darauf zu achten, dass bei Verlaufsuntersuchungen stets das gleiche und für die Testperson passende Messprotokoll verwendet wird. Die Genauigkeit ist deutlich höher, wenn der/die ProbandIn hinsichtlich des Körpertypus dem Kollektiv ähnelt, das zur Validierung der jeweiligen Formel herangezogen wurde. Aufgrund des oberen Messlimits, das bei den meisten Calipern bei 45–55 mm liegt, ist die Methode für stark adipöse Personen oft nicht mehr geeignet [17, 18].

Das Zwei-Kompartiment-Modell ist generell dadurch limitiert, dass die Berechnungen zur Bestimmung der Körperzusammensetzung auf der Annahme eines konstanten Körperwassergehalts basieren. Daher können die Ergebnisse durch Veränderungen der Hydratation beeinflusst werden. Darüber hinaus erlauben die beschriebenen Messmethoden lediglich eine Abschätzung der FFM und FM des gesamten Körpers. Lokale Muskelgruppen oder Fettdepots (z. B. Viszeralfett) können nicht separat ermittelt werden [19].

Drei-Kompartiment-Modell

Das Drei-Kompartiment-Modell unterteilt die FFM nochmals in die Körperzellmasse (*body cell mass*, BCM) und die extrazelluläre Masse (*extracellular mass*, ECM). Die BCM umfasst sämtliche stoffwechselaktiven Zellen (z. B. Muskeln, Organe und Nerven) und das intrazelluläre Wasser. Die ECM setzt sich zusammen aus Knochen, Bindegewebe, dem Blutplasma und der Flüssigkeit, die sich im interstitiellen (Raum zwischen den Zellen) und transzellulären Raum (z. B. Liquorräume und Lumen des Verdauungstrakts) befindet. Ein erweitertes Drei-Kompartiment-Modell beschreibt die Flüssigkeitsverteilung noch differenzierter. Das intrazelluläre Wasser (*intracellular water*, ICW) und extrazelluläre Wasser (*extracellular water*, ECW) werden als flüssige Anteile der BCM und ECM separat betrachtet und ergeben zusammen das Gesamtkörperwasser (*total body water*, TBW) (♦ Abbildung 1).

Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA)

Die Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA) ermöglicht eine Bestimmung der drei Kompartimente FFM, FM und Knochenmasse. Dabei handelt es sich um ein zweidimensionales bildgebendes Verfahren, bei dem Röntgenstrahlen zweier verschiedener Energiequellen emittiert werden. Dadurch können Knochen

und weiches Gewebe getrennt erfasst werden. Die DXA wird hauptsächlich für Knochendichtemessungen verwendet, für welche sie als Goldstandard gilt. Hierfür werden gezielte Referenzpunkte gemessen, z. B. Lendenwirbelkörper oder der Oberschenkelhals [20, 21]. Als Ganzkörpermessung, die (abhängig vom Gerätetyp und den Körpermaßen) 5–20 Minuten dauert, ermöglicht die DXA eine differenzierte Bestimmung der Körperzusammensetzung inklusive FM und FFM. Die Strahlenbelastung liegt dabei im Bereich von 1–10 μSv und damit deutlich geringer als bei einer normalen Röntgenaufnahme oder CT-Messung [22].

Bei stark übergewichtigen oder sehr großen Personen können die maximale Traglast bzw. die Maße des Untersuchungstischs eine Limitation darstellen. Zudem kann auch die DXA durch Schwankungen des Wasserhaushalts beeinflusst werden, da die Datenauswertung ebenfalls auf der Annahme einer konstanten Hydrierung basiert. Weitere Einschränkungen liegen darin, dass die DXA nicht zwischen subkutanem und viszeralem Fett differenzieren kann und eine Detektion von intramuskulären Fettdepots nicht möglich ist [22–24]. Dennoch gilt die Methode als außerordentlich exakt. Die in der Literatur berichteten Variationskoeffizienten liegen bei 1–2 % für die FM und 0,5–2 % für die FFM [25–27].

Computertomografie und Magnetresonanztomografie

Noch genauere Bestimmungen der Körperzusammensetzung sind über Ganzkörper-CT und -MRT möglich. Diese können die Muskulatur, viszerales, subkutan, intramuskuläres und in den Organen gelegenes Fett sowie auch nahezu alle anderen Körperstrukturen detailliert und mit höchster Präzision dreidimensional darstellen. CT und MRT gelten als Goldstandard zur Bestimmung der Körperzusammensetzung, zusammen mit dem Vier-Kompartiment-Modell, bei dem zur unabhängigen Erfassung von Körperdichte, TBW und Knochenmineralgehalt verschiedene Messmethoden miteinander kombiniert werden (z. B. DXA, Hydrodensitometrie/ADP und Isotopendilution zur Quantifizierung des TBW durch die Gabe und Messung von Tracern im Blut/Urin) [19, 22, 25]. Letztendlich können diese Methoden aber aufgrund der hohen Kosten und der aufwändigen Auswertung der Messdaten, die nur durch SpezialistInnen erfolgen kann, lediglich begrenzt angewendet werden.

Die BIA stellt im Kontext aufwändigerer Messmethoden eine Methode dar, mit der die Körperzusammensetzung vergleichsweise kostengünstig, nicht-invasiv und mit relativ geringem Aufwand abgeschätzt werden kann. Durch die Entwicklung von phasensensitiven Messgeräten, die eine Differenzierung in FM, BCM und ECM erlauben, lassen sich neuere BIA-Systeme ebenfalls den Methoden des Drei-Kompartiment-Modells zuordnen. Die einfache und die PatientInnen nicht belastende Durchführung der Messung sowie flexible Einsatzmöglichkeiten durch portable Geräte haben dazu geführt, dass die BIA mittlerweile zu den am häufigsten genutzten Methoden zur Analyse der Körperzusammensetzung zählt.

Prinzip der Bioelektrischen Impedanzanalyse

Die BIA ist eine elektrische Widerstandsmessung am menschlichen Körper, die auf den unterschiedlichen Leitfähigkeiten der verschiedenen Körpergewebe basiert. Hierfür wird ein schwacher, nicht wahrnehmba-

rer mono- oder multifrequenter (je nach Gerätetypus) Wechselstrom durch den Körper geleitet. Am weitesten verbreitet sind Geräte, die mit einer einzelnen Frequenz von 50 kHz und einer Stromstärke von 800 μ A messen. Bei niedriger Frequenz (< 5 kHz) durchfließt der Strom hauptsächlich das ECW, während die Zellmembranen, die aufgrund ihrer Doppellipidschicht als gute Isolatoren dienen, nicht durchdrungen werden. Mit zunehmender Frequenzhöhe kann der Strom aber auch die Zellmembranen überwinden, sodass dieser dann sowohl durch das ECW als auch das ICW fließt [28, 29]. Da Fettgewebe einen sehr geringen Gehalt an Flüssigkeit und Elektrolyten aufweist, hat es einen relativ hohen elektrischen Widerstand (Impedanz Z). Die FFM ist hingegen ein flüssigkeitsreiches Gewebe und leitet den Strom daher gut.

Die Impedanz ist ein Maß für den Widerstand, den biologisches Gewebe einem applizierten Wechselstrom entgegensetzt.

Im auf dieser Seite beginnenden ♦ Kasten werden die wichtigsten physikalischen und mathematischen Grundlagen der BIA erläutert.

Physikalische und mathematische Grundlagen der BIA

Zur Bestimmung der Körperzusammensetzung wird der menschliche Körper modellhaft als ein Zylinder aufgefasst. Die Impedanz Z eines Zylinders ist abhängig von seiner Länge (L) und seinem Querschnitt (A), entsprechend der Formel:

$$Z = \rho L / A$$

wobei ρ der spezifische Widerstand des Materials ist. Um das Volumen (V) eines Zylinders zu bestimmen, wird dessen Länge mit dem Querschnitt multipliziert:

$$V = A \times L$$

Stellt man die erste Formel um und setzt sie in die zweite ein, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$V = L^2 / Z$$

Daraus wird ersichtlich, dass sich das Volumen eines Zylinders aus der Kenntnis von dessen Länge und elektrischem Widerstand bestimmen lässt. Auf den menschlichen Körper übertragen lautet die Formel dann entsprechend:

$$TBW = \text{Körperlänge}^2 / Z$$

Resistanz und Reaktanz

Eine Besonderheit biologischer Strukturen ist, dass sich die Impedanz Z nochmals in zwei Teilgrößen, Resistanz (R) und Reaktanz (X_c), unterteilt. R steht für den Widerstand der elektrolythaltigen Körperflüssigkeiten, während es sich bei X_c um den kapazitiven Widerstand handelt, der durch die Kondensatoreigenschaften¹ der Zellmembranen entsteht. R beträgt beim Menschen etwa 90 % von Z und korreliert stark mit dem TBW. Folglich ist R in Körperflüssigkeiten und im Muskelgewebe niedrig und in Körperstrukturen hoch, die keine oder wenig Flüssigkeit enthalten (z. B. Fettgewebe oder Knochen). Da R zum größten Teil in den Extremitäten entsteht, wird der Wert v. a. durch Schwankungen des Wassergehalts in den Armen und Beinen beeinflusst. Bei einer Frequenz von 50 kHz liegt der R -Wert bei Erwachsenen im Mittel in einem Bereich von 400–500 Ω (Männer) bzw. 500–600 Ω (Frauen) [30, 31]. R -Werte, die deutlich über dem Normbereich liegen, weisen auf einen niedrigen Wassergehalt oder eine schlechte Durchblutung der Extremitäten hin. X_c macht ca. 10 % von Z aus und ist ein Maß für die Quantität der Körperzellen. Ein niedriger X_c -Wert ist ein Hinweis auf eine geringe BCM. Der X_c -Normwert entspricht etwa 10–12 % des R -Werts.

¹ Vergleichbar einem Plattenkondensator in der Elektronik, bei der entgegengesetzte Ladungen auf zwei Platten durch eine isolierende Schicht getrennt werden.

Phasenwinkel (PA)

Der sogenannte Phasenwinkel (PA) reflektiert das Verhältnis von R und Xc [29]. Während sich das Körperwasser im Wechselstrom wie ein einfacher elektrischer Leiter verhält und dadurch Veränderungen von Strom und Spannung zeitgleich verlaufen, kommt es an Zellmembranen wegen deren Kondensatoreigenschaften zu einem verzögerten Spannungsverlauf. Diese zeitliche Verzögerung hat eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung zur Folge. In Grad gemessen ergibt diese den PA (♦ Abbildung 2), der direkt aus R und Xc anhand folgender Formel berechnet wird [31]:

$$PA \text{ (Grad)} = \arctan (Xc / R) \times (180 / \pi)$$

Intakte, gesunde Zellen mit einem stabilen elektrischen Membranpotenzial weisen einen hohen PA auf, während bei geschädigten Zellen oder einer geringen Zelldichte ein niedriger PA vorliegt. Daher werden z. B. bei gut ernährten SportlerInnen mit ausgeprägter Muskelmasse sehr hohe PA-Werte gemessen, während der PA bei Mangelernährung, Zellschädigungen oder atrophierter Muskulatur typischerweise niedrig ist. Aus dem PA lassen sich daher Rückschlüsse auf den Gesundheits- und Ernährungszustand der Zellen ziehen. Neben der körperlichen Konstitution ist der PA auch abhängig von Geschlecht, Alter und der ethnischen Zugehörigkeit. Frauen weisen generell einen geringeren PA auf als Männer. Mit zunehmendem Alter zeigt sich ein Absinken des Werts. Im Mittel liegen die Normwerte in einem Bereich von 5,0–6,5° bei Frauen und 6,0–7,0° bei Männern [31–33].

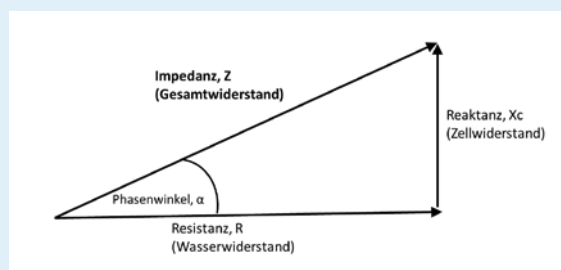


Abb. 2: Der Phasenwinkel

Z, R, Xc und der PA sind die Grunddaten bzw. Primärparameter der BIA, aus denen anhand von Algorithmen alle weiteren Daten (z. B. TBW, FFM und FM) als Sekundärparameter berechnet werden.

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen BIA-Formeln, die zum Teil mithilfe von Referenzmethoden an ausgewählten Populationen vali-

diert wurden. Bei der Auswahl eines bestimmten Algorithmus sollte darauf geachtet werden, dass die gleiche Messmethodik (z. B. derselbe Gerätetyp) wie bei der Validierung angewendet wird und auch die spezifischen Charakteristika der Referenzpopulation (z. B. Alter, Geschlecht, ethnische Zugehörigkeit) mit denen der Testperson übereinstimmen.

In den meisten publizierten BIA-Gleichungen findet sich der R-Wert als Hauptfaktor der statistischen Modelle. Aufgrund geschlechterspezifischer Unterschiede in der Körperzusammensetzung wird das Geschlecht ebenfalls als wichtige Variable in vielen Berechnungsformeln eingesetzt oder es wurden zwei unterschiedliche Gleichungen (separat für Frauen und Männer) entwickelt. Xc, das Alter und anthropometrische Indizes (v. a. Körpergewicht und Körpergröße) sind weitere Parameter, die zu einer besseren Präzision bei der Berechnung der Körperzusammensetzung beitragen und ebenfalls in vielen BIA-Formeln inkludiert sind. Darüber hinaus nutzen diverse Auswertungsprogramme von kommerziellen BIA-Systemen auch gerätespezifische Algorithmen, die nicht im Detail bekannt sind. Die Abhängigkeit der Messergebnisse von Berechnungsformeln gilt grundsätzlich als einer der Schwachpunkte der BIA.

Errechnete Werte der BIA (Sekundärparameter)

Körperwasser (TBW)

Der Wassergehalt des menschlichen Körpers (*total body water*) beträgt, abhängig vom Alter, der Körperzusammensetzung und dem Geschlecht, etwa 50–75 % des Körpergewichts. Bei Erwachsenen liegt der Wert im Mittel bei 60 % und nimmt mit zunehmendem Alter ab. Frauen weisen aufgrund des höheren Körperfettanteils einen ca. 10 % niedrigeren Wassergehalt als Männer auf, während die Werte bei muskulösen SportlerInnen durch den größeren Anteil an FFM im Bereich von 70–80 % liegen können.

Ungefähr zwei Drittel des TBW befinden sich in intrazellulären Kompartimenten (ICW). Der restliche Teil befindet sich in extrazellulären Kompartimenten (ECW), wie dem Blutplasma, Interstitium und transzellulärem Raum (z. B. Liquor, Drüsensekrete, Synovialflüssigkeit) [34].

Entscheidend für das Konstanthalten des TBW ist eine adäquate, an den Bedarf angepasste Flüssigkeitsaufnahme. Normalerweise stehen Aufnahme, Bildung und Ausscheidung von Wasser in einem dynamischen Gleichgewicht. Bei unzureichender Flüssigkeitsaufnahme und/oder gesteigertem Flüssigkeitsverlust (z. B.

durch starke Schweißverluste, Durchfälle oder Erkrankungen mit gesteigerter renaler Wasserausscheidung) kommt es zu einer Abnahme des TBW (Dehydratation). Eine chronisch verminderte Flüssigkeitsausscheidung über die Nieren (z. B. bei Herzinsuffizienz, Leberzirrhose oder Nierenerkrankungen) führt hingegen zu einem Wasserüberschuss (Hyperhydratation) mit vermehrter Wassereinlagerung (Ödeme, Aszites) im Körper [34].

Das Körperwasser lässt sich bei gesunden, normal-hydrierten Personen mit der BIA valide und sehr gut reproduzierbar erfassen. Akute Schwankungen oder pathologische Veränderungen des Wasserhaushalts können allerdings die Abschätzung des TBW und der weiteren Parameter deutlich beeinflussen, was zu den zentralen Kritikpunkten der BIA-Methode zählt [29].

Fettfreie Masse (FFM), Körperzellmasse (BCM) und Skelettmuskelmasse (SMM)

Zur FFM zählen jegliche Körpergewebe mit Ausnahme des Körperfetts. Die BCM, die aus metabolisch aktiven Geweben und dem ICW besteht, ist die proteinreiche Teilkomponente der FFM und daher besonders von katabolen Zuständen betroffen. Dieser Parameter ist daher von zentraler Bedeutung für die Beurteilung des Ernährungszustands. Ein starker Verlust an BCM ist generell mit einer schlechteren klinischen Prognose assoziiert [29]. Die Ausprägung der BCM ist ansonsten abhängig von genetischen Faktoren, dem Alter und Trainingszustand eines Individuums. Bei gesunden, gut ernährten Erwachsenen liegt die BCM in einem Bereich von 50–60 % der FFM. Trainierte SportlerInnen können aber auch eine BCM aufweisen, die deutlich über 60 % der FFM beträgt. Bei körperlicher Inaktivität und mit zunehmendem Alter nimmt die BCM ab [35].

Den größten Anteil an der BCM haben die Zellen der Skelettmuskulatur (SMM). Neuere BIA-Verfahren schätzen die SMM auch direkt ab. Die SMM ist nicht nur aufgrund ihrer Stütz- und Bewegungsfunktion, sondern auch als größtes Stoffwechselorgan des Körpers von zentraler Bedeutung für zahlreiche physiologische Prozesse. Ab einem Alter von ca. 30 Jahren reduziert sich die SMM um ca. 3–8 % pro Dekade. Dieser Prozess beschleunigt sich nochmals deutlich nach dem 60. Lebensjahr. Diese altersbedingte Abnahme der SMM (Sarkopenie) ist einer der Hauptgründe für den Verlust an Muskelkraft und -funktionalität und erhöht das Risiko für orthopädische Beschwerden, Stürze und Frakturen im Alter

[36]. Darüber hinaus ist eine geringe SMM in allen Altersgruppen auch mit metabolischen Beeinträchtigungen, z. B. einer reduzierten Insulinsensitivität und einem erhöhten Risiko für systemische Entzündungen, assoziiert [37].

MRT-basierte Populationsstudien haben gezeigt, dass die SMM-Normwerte (abhängig vom Lebensalter) bei ca. 27–34 % (Frauen) bzw. 34–42 % (Männer) des Körpergewichts liegen [38]. Die Quantifizierung der SMM ist daher ein wichtiges Diagnosekriterium für Sarkopenie und Mangelernährung.

Ein weiterer Parameter zur Beurteilung des Ernährungszustandes ist das Verhältnis von ECM zu BCM. Bei Gesunden ist die BCM grundsätzlich deutlich größer als die ECM, sodass der Index-Wert kleiner als 1 ist. Bei einer Mangelernährung nimmt die ECM typischerweise zu und die BCM ab, auch wenn das Körpergewicht zunächst noch unverändert bleiben kann.

Ein Anstieg des ECM/BCM-Index weist auf eine Verschlechterung des Ernährungszustands hin [29, 35].

Die meisten BIA-Formeln setzen voraus, dass der Wasseranteil der FFM konstant ist (73 %). Bei abnormaler Hydrierung der FFM kann es daher zu einer ungenauen Bestimmung der FFM und deren Teilkomponenten kommen. Eine Dehydratation hat einen Anstieg von Z zur Folge, was zu einer Unterschätzung der FFM und Überschätzung der FM führt. Umgekehrt verhält es sich bei einer Hyperhydratation (Überschätzung der FFM und Unterschätzung der FM) [29, 39].

Fettmasse (FM)

Die FM ist ein wesentlicher Bestandteil des menschlichen Körpers und erfüllt eine Vielzahl an lebensnotwendigen Aufgaben. Hierzu zählen Funktionen als Energielieferant/-speicher, Isolator, Wärmeerzeuger, mechanisches Schutzpolster und Stoffwechselorgan, das für die Sekretion unterschiedlicher Hormone und anderer Botenstoffe verantwortlich ist.

Der Anteil der FM ist ebenfalls von unterschiedlichen Einflussfaktoren wie Genetik, Alter, Geschlecht, Ernährung und körperlicher Aktivität abhängig. Übersteigt die Energiezufuhr über die Nahrung längerfristig den Energieverbrauch durch körperliche Aktivität, so wird die überschüssige Energie als Fett im Körper angelagert [34]. Eine übermäßige Fettanlagerung (v. a. im Bauchbereich) ist mit zahlreichen negativen gesundheitlichen Folgen verbunden. Ein zu hoher Fettanteil ist z. B. mit einem erhöhten Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen, chronisch entzündliche Erkrankungen, Diabetes mellitus Typ 2 und bestimmte Krebserkrankungen assoziiert, was u. a. auf den ungünstigen Einfluss auf Blutfettwerte sowie eine gesteigerte Produktion und Freisetzung von proinflammatorischen Zytokinen durch das Fettgewebe zurückgeführt wird [40].

Die Normwerte der FM sind alters- und geschlechtsabhängig und liegen bei Erwachsenen im Alter von 20–60 Jahren in einem Bereich von 21–34 % (Frauen) bzw. 8–22 % (Männer) [41]. LeistungssportlerInnen können Körperfettwerte aufweisen, die deutlich unter den Normbereichen liegen. Das Unterschreiten einer kritischen FM (Männer: 2–4 %, Frauen: 10–12 %) kann hingegen gravierende gesundheitliche Folgen haben, da z. B. die Regulation verschiedener Hormone, das Immunsystem oder auch das

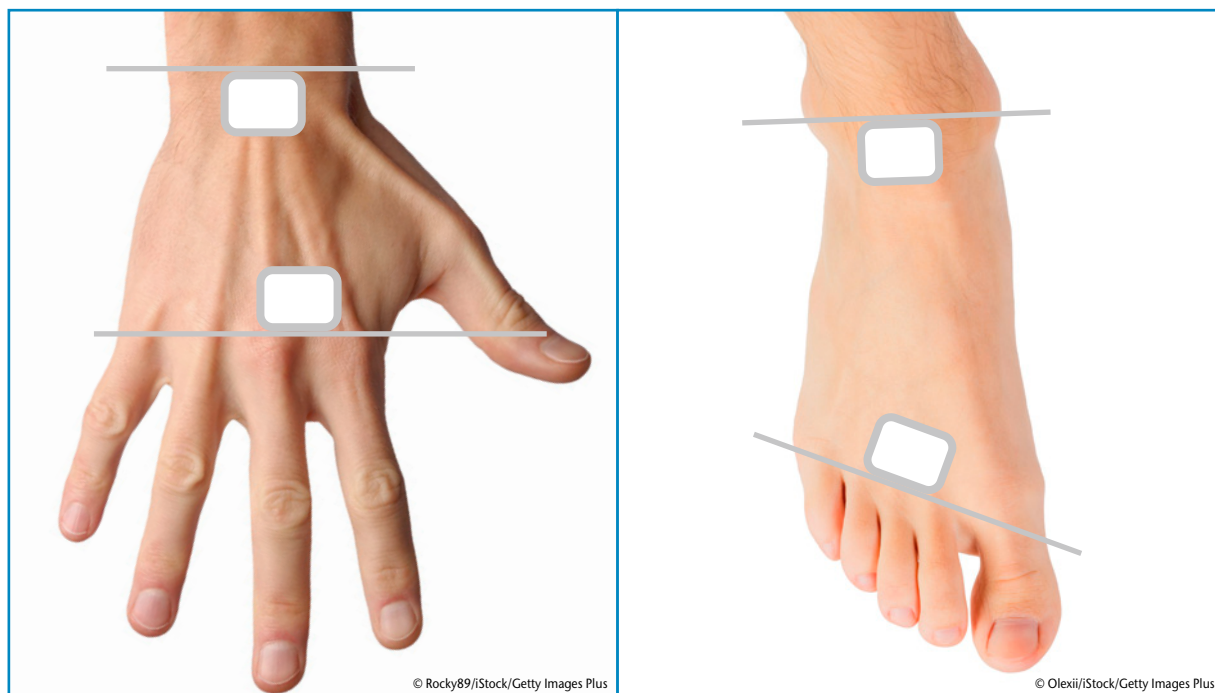


Abb. 3: Platzierung der Hand- und Fußelektroden bei Einfach-Frequenz-BIA (SF-BIA)

Herz-Kreislauf-System beeinträchtigt werden können [42, 43].

Zusammen mit dem Körpergewicht und der FFM bzw. SMM ist die FM daher ein weiterer wichtiger Indikator für den Gesundheitszustand. Da die FM bei den meisten BIA-Gleichungen aus der Differenz von FFM und Körpergewicht berechnet wird, unterliegen die Messergebnisse den gleichen Störfaktoren wie die FFM. Zudem wurde festgestellt, dass der Körperfettanteil von stark adipösen Personen mit vielen BIA-Formeln deutlich unterschätzt wird [44]. Mit neueren, speziell für diese PatientInnenkollektive entwickelten Formeln zeigte sich in Validierungsstudien, dass durch eine entsprechende Anpassung der Algorithmen die Messgenauigkeit verbessert werden kann [45, 46].

Methoden der Bioelektrischen Impedanzanalyse

Basierend auf den beschriebenen methodischen Grundlagen wurden unterschiedliche BIA-Geräte entwickelt, die sich, abhängig von der verwendeten Frequenz, grob in zwei Hauptkategorien unterteilen lassen: Die Einfach- und die Multi-Frequenz-BIA. Bei früheren, nicht-phasensensitiven BIA-Geräten wurde lediglich Z gemessen und aus dem daraus ermittelten

TBW anschließend die FFM und FM berechnet. Da bei diesen Geräten noch nicht der PA ermittelt werden konnte und keine Aussagen bezüglich der BCM und ECM möglich waren, zählten diese noch zu der Gruppe der Zwei-Kompartiment-Modelle. Auf diese älteren Systeme wird im Weiteren nicht näher eingegangen.

Einfach-Frequenz-BIA (Single-Frequency BIA, SF-BIA)

Die SF-BIA am ganzen Körper ist die ursprüngliche und nach wie vor die wohl am häufigsten genutzte Methode. Dabei wird üblicherweise ein sinusförmiger Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 kHz über Elektroden appliziert, die an definierten Stellen an der Hand und am Fuß angebracht werden. Am weitesten verbreitet ist die tetrapolare, ipsilaterale Messung. Hierzu werden für die Ganzkörpermessung jeweils zwei Elektroden an Hand und Fuß der gleichen Körperseite (ipsilateral) befestigt. Die distalen, stromführenden Elektroden werden dabei auf dem Handrücken, proximal des Metakarpophalangealgelenks, und auf dem Fußrücken, proximal des Metatarsophalangealgelenks, angelegt. Die proximalen Detektionselektroden werden auf der dorsalen Seite des Handgelenks, in der Mitte zwischen Processus styloideus radii und Processus styloideus ulnae, und auf der dorsalen Seite des Sprunggelenks, in der Mitte zwischen dem Malleolus lateralis und dem Malleolus medialis, platziert (♦ Abbildung 3).

Die Messung erfolgt liegend in Rückenlage und mit 30–45° vom Körper abduzierten (abstehenden) Extremitäten. Um eine gleichmäßige Verteilung der Körperflüssigkeiten zu erzielen, wird eine Liegezeit von 10 Minuten vor Durchführung der Messung empfohlen [28]. Grundlage der Methode ist der inverse Zusammenhang zwischen Z und TBW. Das TBW wird dabei nicht im eigentlichen Sinne gemessen, sondern aus den elektrischen Widerständen im ECW (75 %) und ICW (25 %) abgeschätzt [29]. Validierungsstudien, in denen die SF-BIA mit Referenzmethoden verglichen

wurde, haben gezeigt, dass sich TBW und FFM bei Gesunden mit stabilem Hydratationsstatus valide abschätzen lassen [47–49]. Akute Änderungen des Körperwassers und daraus abgeleitete Abschätzungen der Körperzusammensetzung können jedoch nicht mit ausreichender Präzision detektiert werden, was eine wesentliche Limitation der Methode darstellt [49, 50].

Multi-Frequenz-BIA (Multi-Frequency BIA, MF-BIA)

Bei der MF-BIA werden mehrere Frequenzen zur Messung verwendet, die meist im Bereich von 5–500 kHz liegen. Die Methode basiert auf der Feststellung, dass TBW und ECW differenziert erfasst können, wenn gleichzeitig sowohl niedrig- (bis 5 kHz für ECW) als auch hochfrequente (> 50 kHz für TBW) elektrische Ströme eingesetzt werden. Das ICW wird ermittelt, indem das ECW vom TBW subtrahiert wird. Untersuchungen mit Gesunden und KoronarpatientInnen haben gezeigt, dass sich z. B. das ECW mittels MF-BIA akkurater bestimmen lässt als mit der SF-BIA [51, 52]. Allerdings wurde von anderen WissenschaftlerInnen auch postuliert, dass durch den Einsatz mehrerer Frequenzen keine Steigerung der Aussagekraft erzielt werden kann [53]. Außerdem zeigt auch die MF-BIA nur eine geringe Sensitivität bei der Detektion von akuten Veränderungen des Hydratationsstatus und Flüssigkeitsverschiebungen zwischen ECW und ICW [52, 54].

Bioimpedanz-Spektroskopie (BIS)

Bei der BIS wird ein breites Frequenzspektrum von 5–1 000 kHz genutzt. Die Datenanalyse basiert im Gegensatz zur MF-BIA auf einem physiologischen Modell und einer Mischgleichung (♦ Kasten „Datenanalyse bei der BIS“).

Studien, in denen die BIS mit Referenzmethoden verglichen wurde, deuten darauf hin, dass sich das Körperwasser und die BCM bei Gesunden und auch bei bestimmten PatientInnenkollektiven präziser bestimmen lassen als mit der SF-BIA [56–58]. Allerdings können bei abnormalem Hydratationsstatus oder stark von der Norm abweichenden Körpermaßen (z. B. Adipositas) auch bei der BIS Probleme mit der Messgenauigkeit auftreten [29, 57, 58].

Körpersegment-Bioimpedanzanalyse

Die traditionellen Ganzkörper-BIA-Verfahren berücksichtigen nicht, dass die einzelnen Körpersegmente in einem Fünf-Zylinder-Körpermodell (Arme, Beine, Rumpf) unterschiedliche

Datenanalyse bei der BIS

Im ersten Schritt der BIS wird in der Regel ein sogenannter Cole-Cole-Plot verwendet, um R (X-Achse) und X_c (Y-Achse) grafisch gegenüberzustellen. Z wird dabei als Halbkreis dargestellt, über dessen Schnittpunkte mit der X-Achse R bei der Frequenz von Null und R bei unendlicher Frequenz rechnerisch extrapoliert und bestimmt werden. Der PA entspricht dann dem Winkel zwischen R und Z (♦ Abbildung 4).

Anschließend werden TBW, ECW und ICW anhand von Regressionsanalysen berechnet. Hierfür wird üblicherweise eine Mischgleichung nach der Hanai-Theorie verwendet, welche die Leitfähigkeit von Suspensionen nicht leitenden Materials in einem leitenden Medium beschreibt [29, 55–57].

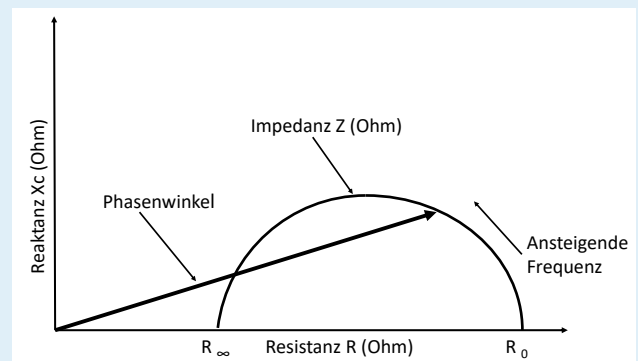


Abb. 4: Grafische Darstellung der Bioimpedanz-Spektroskopie (mod. nach Kyle et al. [29])

Formen und damit auch unterschiedliche Impedanzen aufweisen. Dabei werden in der Regel lediglich die rechte Körperhälfte gemessen und anschließend die Z -Werte des ganzen Körpers per Duplikation berechnet. Ungleichheiten zwischen den Segmenten werden über empirische Berechnungsvariablen (z. B. Geschlecht, Alter) rechnerisch ausgeglichen. Zudem können Veränderungen der FFM im Rumpf (dessen Anteil an der Gesamtkörpermasse ca. 50 % beträgt) mit Ganzkörper-BIA-Methoden nur unzureichend detektiert werden, da dieser aufgrund des relativ großen Durchmessers nur ca. 10 % zu der Gesamt- Z beiträgt.

Diese Limitationen haben zu der Entwicklung der segmentalen BIA geführt, die im Gegensatz zur Ganzkörper-BIA die Z in jedem einzelnen Körpersegment (Arme, Beine und Rumpf) misst. Moderne segmentale BIA-Geräte arbeiten mit 8 Elektroden (jeweils zwei an Händen und Füßen) und applizieren den Strom in einem breiten Frequenzspektrum (1–1 000 kHz) über beide Körperhälften [29, 59]. Bei einer Messung im Liegen werden Hautelektroden beidseitig an Händen und Füßen angebracht. Bei Standgeräten, deren Messdauer oft nur noch etwa 1 Minute beträgt, sind die Elektroden in Handgriffen und einer Bodenplatte integriert. Validierungsstudien, in denen die FFM bzw. SMM bei gesunden Personenkollektiven mit neuesten segmentalen BIA-Verfahren bestimmt wurde, zeigten eine hohe Übereinstimmung mit der DXA [60, 61] und dem Goldstandard MRT [62]. Zudem wurde in Studien festgestellt, dass

TBW [63], ECW [64] und die SMM [65] mit der segmentalen BIA akkurater abgeschätzt werden können als mit der Ganzkörper-BIA. Die Methode scheint im Vergleich zu herkömmlichen BIA-Verfahren auch in geringerem Maße durch akute Schwankungen und abnormale Veränderungen des Flüssigkeitshaushalts beeinträchtigt zu werden [65]. Allerdings sind weitere Validierungsstudien mit Goldstandard-Methoden nötig, um die Genauigkeit der zugrundeliegenden Algorithmen unter pathologischen Bedingungen weiter zu optimieren [39, 58].

Bioelektrische Impedanz-Vektorenanalyse (BIVA)

Die BIVA ist eine von Piccoli [66] etablierte Weiterentwicklung der herkömmlichen BIA-Methode, bei der die beiden Impedanz-Grundkomponenten R und X_c standardisiert zur Körpergröße in einem Koordinatensystem zu einem Vektorpunkt aufgetragen werden. Die Lage des Vektorpunkts innerhalb des Graphen gibt Auskunft über den Hydratationsstatus und die BCM.

Anhand von groß angelegten Populationsstudien mit mehreren Tausend Personen wurden drei Toleranzellipsen entwickelt, die den 50., 75. und 95. Perzentilen der Referenzpopulation entsprechen [66].

Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie unabhängig von Berechnungsformeln ist, da nur die elektrische Leitfähigkeit des Körpers in die Analyse eingeht. Die BIVA objektiviert keine Absolutwerte, stellt jedoch v. a. in Längsschnittuntersuchungen eine wertvolle Ergänzung zur BIA dar, da sich Veränderungen von TBW und BCM durch Verschiebungen des Vektorpunkts grafisch gut objektivieren lassen. Eine Verschiebung des Vektors entlang der Längsachse entspricht einer Veränderung der R und damit einer Zu-/Abnahme des Körperwassers. Eine Verschiebung entlang der Querachse entspricht einer Veränderung der X_c und damit einer Zu-/Abnahme der BCM. Der Dehydrations- bzw. Überwässerungsgrad und das Ausmaß der BCM-Änderung lassen sich somit allein per Blickdiagnostik anhand der Abweichung vom Normalbereich innerhalb der drei Toleranzellipsen beurteilen (♦ Abbildung 5).

Einflussfaktoren auf die Messergebnisse der BIA

Die Reliabilität von BIA-Messungen kann durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst werden, die grob in 4 Gruppen unterteilt werden können:

1. Faktoren, die direkt mit der Technik (BIA-Gerät, Messequipment) zusammenhängen
2. Faktoren, die vom/von der Untersuchenden ausgehen
3. Faktoren, die im Zusammenhang mit der Testperson stehen
4. umweltbedingte Faktoren

Um die Präzision der Messergebnisse zu erhöhen, ist daher auf eine standardisierte Durchführung zu achten.

Einflussfaktoren durch das Gerät und Messequipment

Einige BIA-Geräte müssen vor dem Gebrauch kalibriert werden, wofür ein entsprechendes Equipment verwendet wird. Von einigen Herstellern werden auch spezielle Dummy-Schaltkreise zur Verfügung gestellt, die nicht einer Kalibrierung im eigentlichen Sinne, aber der routinemäßigen Überprüfung der Messgenauigkeit dienen. Durch diese Maßnahmen kann die intra-instrumentelle Variabilität verringert werden. Da gerätespezifische Unterschiede die Messergebnisse beeinflussen können, sollten Verlaufsmessungen auch stets mit dem gleichen Gerät durchgeführt werden, um einen inter-instrumentellen Bias zu vermeiden.

Die Qualität und Positionierung der Elektroden ist von außerordentlicher Wichtigkeit für akkurate Messergebnisse.

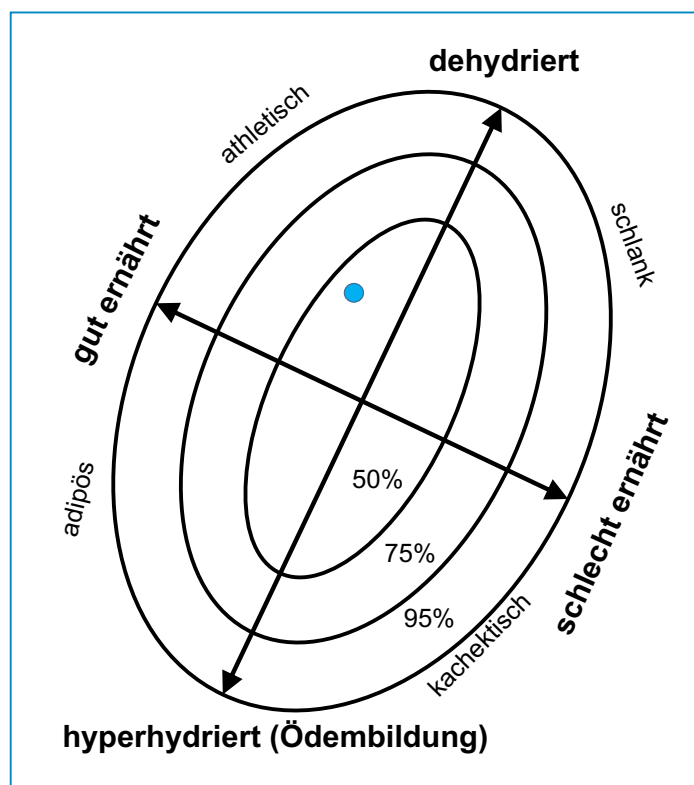


Abb. 5: Der BIVA-Graph (mod. nach Piccoli et al. [66])
Die Toleranzellipsen entsprechen den 50. (innen), 75. (Mitte) und 95. (außen) Perzentilen der Referenzpopulation.

Die Verwendung von ungeeigneten Elektroden und falsche Positionierung zählen zu den wesentlichen Ursachen für Fehlmessungen.

Um eine ausreichende Kontaktfläche und gute elektrische Leitfähigkeit zu erzielen, werden konduktive Elektroden auf Gelbasis mit einer Größe von $> 4 \text{ cm}^2$ empfohlen. Die Strom- und Spannungselektroden müssen mindestens in einem Abstand von 5 cm zueinander an den definierten Stellen angebracht werden, da es sonst zu einer Interaktion zwischen den Elektroden kommen kann [39]. Eine Verschiebung der Elektroden um 1 cm kann bereits zu einer Veränderung der Impedanz Z um 10Ω führen [67].

Einflussfaktoren durch den/die Untersuchende/n

Aufgrund der sehr einfachen und unkomplizierten Durchführung einer BIA ist der potenzielle Untersucher-Bias geringer einzuschätzen als bei anderen Methoden zur Bestimmung der Körperzusammensetzung. Werden Verlaufsmessungen aber von mehreren Untersuchenden durchgeführt, sollte dennoch unbedingt auf eine standardisierte Durchführung (insbesondere beim Anbringen der Elektroden) geachtet werden, um reliable Ergebnisse zu gewährleisten.

Einflussfaktoren durch die Testperson

Neben dem Hydratationsstatus der Testperson, der als wichtigste Einflussgröße auf die Messergebnisse bereits ausführlich diskutiert wurde, sind noch eine Reihe weiterer personenbedingter Faktoren relevant:

- Es wird empfohlen, dass die Testperson **nüchtern** (idealerweise > 8 Stunden Nahrungskarenz) und mit leerer Blase zur Messung erscheint. Mahlzeiten und Getränke, die 2–4 Stunden vor der Messung konsumiert wurden, können die Z um bis zu 15Ω reduzieren [68].
- Die letzte **sportliche Betätigung** sollte u. a. aufgrund von Plasmavolumenverschiebungen, die nach intensiven körperlichen Belastungen auftreten, ebenfalls > 8 Stunden zurückliegen.
- Bei **Fieber** kann die Messung nicht durchgeführt werden, da die erhöhte Körpertemperatur eine veränderte Flüssigkeitsverteilung im Körper bewirkt, die sich auf die Z auswirkt und zu invaliden Messergebnissen führt [39].
- Während der Messung darf die Testperson keinen Kontakt zu äußeren Metallobjekten (z. B. einem Bettgestell) haben. Am Körper liegende

metallische Gegenstände (z. B. Schmuck, Uhren etc.) sollten entfernt werden.

- PatientInnen mit **Herzschrittmachern** oder **Defibrillatoren** wird aus Sicherheitsgründen empfohlen, auf eine BIA zu verzichten. Aktuelle Studienergebnisse weisen zwar auf eine Unbedenklichkeit bei Messungen mit einer Frequenz von 50 kHz hin [69], aber um diese Frage abschließend beurteilen zu können, ist noch weitere Forschung (insbesondere auch mit multifrequenten Geräten) nötig. Bei PatientInnen mit einer Amputation oder metallischen Implantaten kann eine Messung an den vorhandenen bzw. gesunden Extremitäten durchgeführt werden. Die Absolutwerte können dabei nicht präzise bestimmt werden, allerdings sind Verlaufserhebungen aufgrund des konsistenten Messfehlers möglich [39].
- Bei liegenden Messungen ist auf eine mindestens zehnminütige **Ruhephase** in entspannter, horizontaler Position zu achten, um eine gleichmäßige Flüssigkeitsverteilung im Körper zu gewährleisten.
- Die Extremitäten sollten $30\text{--}45^\circ$ vom Körper **abduziert** werden, da Kontakte zwischen den Beinen bzw. zwischen Armen und dem Rumpf den Stromweg verkürzen und dadurch zu falschen Messergebnissen führen [39]. Bei hochgradig adipösen PatientInnen kann isolierendes Material (z. B. ein Handtuch) verwendet werden, um den Kontakt zu unterbinden.
- Bei einer BIA in **stehender Position** wird aufgrund der Blutverteilung im Körper in den Armen und Beinen ein ca. 3 % geringeres und im Rumpf ein ca. 3 % größeres ECV im Vergleich zur liegenden Position gemessen [70].
- Die **Hautbeschaffenheit** kann einen merklichen Einfluss auf die Messergebnisse haben [39]. Grundsätzlich sollten Hautstellen, die mit den Elektroden beklebt werden, zuvor mit Alkohol-/Desinfektionstupfern gereinigt und entfettet werden. Sehr trockene Haut leitet den Strom schlechter, sodass hier ein zusätzliches konduktives Gel zur Steigerung der Leitfähigkeit hilfreich sein kann.
- Des Weiteren gilt bei weiblichen Testpersonen zu beachten, dass der **Menstruationszyklus** mit verschiedenen physiologischen Veränderungen des Flüssigkeitshaushalts einhergeht, die einen Einfluss auf die Messergebnisse haben können. Bei Verlaufsuntersuchungen wird daher empfohlen, standardisiert während definierter Zyklusphasen zu messen [71].
- Aufgrund der physiologischen Veränderungsprozesse der Körperzusammensetzung in der Lebensspanne zählt auch das **Lebensalter** zu den entscheidenden personenbedingten Einflussfaktoren. So zeigen sich bei älteren Menschen z. B. größere Schwankungen des Hydratationsgrades der FFM. Aus diesem Grund sollten für die Auswertung stets Algorithmen verwendet werden, die für eine vergleichbare Altersgruppe entwickelt wurden.
- Letztlich ist auch die **ethnische Zugehörigkeit** als weitere Einflussgröße zu nennen. Aufgrund potenzieller Unterschiede in anthropometrischen Indizes und der Körperzusammensetzung zwischen ethnischen Gruppen ist auch hier auf die Wahl einer geeigneten Berechnungsformel zu achten. Da der Großteil der BIA-Studien mit kaukasischen Kollektiven durchgeführt wurde, bedarf es aktuell aber auch noch der Entwicklung und Validierung weiterer populationspezifischer BIA-Algorithmen [72].

Umweltbedingte Einflussfaktoren

Die Umgebungstemperatur zählt zu den wichtigsten umweltbedingten Faktoren, die einen Einfluss auf die Messergebnisse haben können. So wurde z. B. beobachtet, dass sich die Z-Werte, bedingt durch eine kältebedingte Vasokonstriktion, bereits bei einer Temperatur von 14 °C deutlich erhöhen können. Bei kurzzeitiger Hitzeexposition (35 °C) kann die Impedanz aufgrund von verstärkter Vasodilatation hingegen deutlich absinken. Die Messungen sollten daher idealerweise bei standardisierter Umgebungstemperatur in einem Bereich von 20–25 °C durchgeführt werden [73].

Fazit

Die BIA ist ein unkompliziertes Verfahren zur Bestimmung der Körperzusammensetzung bei gesunden Personen und PatientInnen. Die Validität der Methode, die bei Gesunden und auch bei normal hydrierten Personen gut belegt ist, kann jedoch bei Störungen des Wasserhaushalts beeinträchtigt sein.

Die Messgenauigkeit kann durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden. Um aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten, sollten nur wissenschaftlich validierte Systeme verwendet und auf standardisierte Untersuchungsbedingungen geachtet werden. Moderne, segmentale BIA-Systeme scheinen sich nach aktueller Datenlage am besten für die klinische Anwendung zu eignen, da diese im Vergleich zur herkömmlichen Einfach-Frequenz-BIA weniger fehlerbehaftet sind und eine höhere Präzision erreichen können.

Bei liegenden Messungen ist besonderes Augenmerk auf eine korrekte Platzierung der Elektroden zu legen. Darüber hinaus ist es wichtig, für die Datenauswertung eine passende Berechnungsformel zu verwenden, die z. B. in Bezug auf Alter, Geschlecht, ethnischen Hintergrund und Gesundheitszustand anhand einer Referenzpopulation validiert wurde und vergleichbar mit der Testperson ist. Die Optimierung und Weiterentwicklung von spezifischeren BIA-Gleichungen für bestimmte Populationen und Krankheitsbilder (insbesondere bei Störungen des Hydratationsstatus) und deren Validierung durch entsprechende Referenzmethoden ist Gegenstand aktueller und zukünftiger Forschung.

Dr. phil. Dejan Reljic^{1, 3}

Dr. oec. troph. Hans Joachim Herrmann¹

Prof. Dr. med. Markus F. Neurath²

Prof. Dr. med. Yurdagül Zopf¹

¹ Hector-Center für Ernährung, Bewegung und Sport

Medizinische Klinik 1 – Gastroenterologie, Pneumologie und Endokrinologie
Universitätsklinikum Erlangen

² Medizinische Klinik 1 – Gastroenterologie, Pneumologie und Endokrinologie
Universitätsklinikum Erlangen

³ dejan.reljic@uk-erlangen.de

Beiträge der zertifizierten Fortbildung sind prinzipiell produkt- und dienstleistungsneutral und werden finanziell nicht von externen Stellen unterstützt.

Interessenkonflikt

Dr. Reljic, Dr. Herrmann und Prof. Dr. Zopf (ärztliche Leitung) führen zur Zeit der Erstellung des Beitrags eine Studie durch, die durch die Seca GmbH & Co. KG kofinanziert wird.

Prof. Neurath erklärt, dass kein Interessenkonflikt vorliegt.

Literatur online

DOI: 10.4455/eu.2019.039

Zertifizierte Fortbildung

10 Fragen

Informationen zur Teilnahme:
www.ernaehrungs-umschau.de

Bearbeitung möglich bis:
 16.12.2019

Bei allen Fragen ist jeweils nur eine Antwort richtig.

1. Welche/s Verfahren gilt/gelten aktuell als Goldstandard zur Messung der Körperzusammensetzung?

1. Computertomografie
 2. Bioelektrische Impedanzanalyse
 3. Luftverdrängungsplethysmografie
 4. Magnetresonanztomografie
- ☐ A Nur Antwort 1 ist richtig
☐ B Nur Antwort 2 ist richtig.
☐ C Nur die Antworten 2 und 3 sind richtig.
☐ D Nur die Antworten 1 und 4 sind richtig.

2. Das 3-Kompartiment-Modell der Körperzusammensetzung umfasst:

- ☐ A Fettmasse, Körperzellmasse, extrazelluläre Masse
☐ B Fettmasse, fettfreie Masse, Körperwasser
☐ C Körperfettmasse, intrazelluläres Wasser, extrazelluläres Wasser
☐ D Körperzellmasse, fettfreie Masse, Körperwasser

3. Die Funktion der BIA basiert auf:

- ☐ A den verschiedenen großen Zellen der Körpergewebe
☐ B dem individuellen Verhältnis von Gewicht zu Körperoberfläche
☐ C der unterschiedlichen Resonanz von Körperzellen im magnetischen Feld
☐ D den unterschiedlichen Leitfähigkeiten der verschiedenen Körpergewebe für elektrischen Strom

4. Die Impedanz Z bezeichnet:

- ☐ A ein Maß für die Stärke eines Magnetfeldes in biologischen Geweben.
☐ B die Auftriebskraft von geometrischen Körpern unter Wasser.

- ☐ C ein Maß für den Widerstand, den biologisches Gewebe Wechselstrom entgegengesetzt.
☐ D die Stromstärke eines Wechselstroms, der durch Körpergewebe geleitet wird.

5. Die Ergebnisse aller BIA-Systeme werden ungenau, wenn folgender Zustand zutrifft:

- ☐ A Wassergehalt des Körpers zu hoch
☐ B Fettgehalt des Körpers zu niedrig
☐ C Wassergehalt des Körpers zu hoch oder zu niedrig
☐ D Fettgehalt des Körpers zu hoch oder zu niedrig

6. Das Verhältnis von extrazellulärer Masse (ECM) zu Körperzellmasse (BCM) (ECM/BCM-Index) ist ein hilfreicher Parameter zur Beurteilung des Gesundheitszustands. Wie ändert sich der ECM/BCM-Index bei einer Mangelernährung?

- ☐ A ECM und BCM nehmen in etwa gleich ab.
☐ B ECM und BCM nehmen in unterschiedlichem Ausmaß ab.
☐ C Die BCM nimmt zu und die ECM nimmt ab.
☐ D Die ECM nimmt zu und die BCM nimmt ab.

7. Die Unterschreitung der minimal benötigten, essenziellen Fettmasse des Körpers kann gravierende Folgen haben, z. B. die Regulation von Hormonen und das Immunsystem beeinträchtigen. Welcher essenzielle Körperfettanteil sollte daher nicht unterschritten werden?

- ☐ A 8–12 %
☐ B Männer: 2–4 %, Frauen: 10–12 %
☐ C Erwachsene: 5–10 %, Kinder 10–15 %
☐ D Eine Untergrenze ist schwierig zu bestimmen, liegt aber geschätzt bei ca. 0,5 %

8. Bei der Einfach-Frequenz-BIA werden insgesamt 4 Elektroden an Hand und Fuß angebracht. Bei der Körpersegment-BIA, die die Unterschiedlichkeit der Z-Werte zwischen Rumpf und Gliedmaßen mit einbezieht, sind es hingegen:

- ☐ A 6
☐ B 8
☐ C 10
☐ D 12

9. Zu den wichtigsten/häufigsten Ursachen für Fehlmessungen bei BIA zählen:

1. eine falsche Positionierung der Elektroden
 2. die Verwendung ungeeigneter Elektroden
 3. eine zu kurze Messzeit
 4. eine zu trockene Umgebungsluft
- ☐ A Nur die Antworten 1 und 2 sind richtig.
☐ B Nur die Antworten 1 und 3 sind richtig.
☐ C Nur die Antworten 2, 3 und 4 sind richtig.
☐ D Alle Antworten sind richtig.

10. Folgende Faktoren müssen bei der Interpretation der Ergebnisse einer BIA-Messung berücksichtigt werden, da sie z. T. erheblichen Einfluss auf diese haben:

1. Nahrungsaufnahme oder Sport kurz vor der Messung
 2. hohe Körpertemperatur (Fieber)
 3. Menstruationszyklus der Frau
 4. Alter und ggf. ethnische Zugehörigkeit
- ☐ A Nur Antwort 2 ist richtig.
☐ B Nur die Antworten 1 und 3 sind richtig.
☐ C Nur die Antworten 1, 2 und 4 sind richtig.
☐ D Alle Antworten sind richtig.