

Sarkopenie – Definition, radiologische Erfassung, klinische Bedeutung

Sarcopenia – Definition, Radiological Diagnosis, Clinical Significance

Autorinnen/Autoren

Daniel Vogele¹, Stephanie Otto², Nico Sollmann¹, Benedikt Hagenmüller¹, Daniel Wolf¹, Meinrad Beer¹, Stefan Andreas Schmidt¹

Institute

- 1 Department of Diagnostic and Interventional Radiology, University Hospital Ulm, Germany
- 2 Comprehensive Cancer Center (CCCU), University Hospital Ulm, Germany

Key words

sarcopenia, radiological screening, body composition analysis, quantitative imaging, segmentation

eingereicht 08.06.2022

akzeptiert 29.10.2022

online publiziert 11.01.2023

Bibliografie

Fortschr Röntgenstr 2023; 195: 393–405

DOI 10.1055/a-1990-0201

ISSN 1438-9029

© 2023, Thieme. All rights reserved.

Georg Thieme Verlag KG, Rüdigerstraße 14, 70469 Stuttgart, Germany

Korrespondenzadresse

Daniel Vogele

Department of Diagnostic and Interventional Radiology, University Hospital Ulm, Albert-Einstein-Allee 23, 89081 Ulm, Germany

Tel.: +46/7 31/50 06 11 97

daniel.vogele@uniklinik-ulm.de

ZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund Bei der Sarkopenie handelt es sich um ein altersabhängiges Syndrom, welches durch einen Verlust an Muskelmasse und -kraft gekennzeichnet ist. In der Folge wird die Selbständigkeit älterer Menschen eingeschränkt und die Hospitalisierungsrate sowie die Mortalität steigen. Die Entwicklung einer Sarkopenie beginnt oftmals bereits im mittleren Lebensalter durch Fehl- und Mangelernährung bzw. in Kombination mit mangelnder körperlicher Aktivität. Verstärkt wird dieser Effekt durch Begleiterkrankungen wie Adipositas oder Stoffwechselerkrankungen wie Diabetes mellitus.

Methode Durch effektive präventiv-diagnostische Verfahren und die gezielte therapeutische Behandlung der Sarkopenie lassen sich die negativen Auswirkungen auf das Individuum reduzieren und negative gesundheitliche sowie sozioökonomische Effekte verhindern. Hierfür stehen verschiedene diagnostische Möglichkeiten zur Verfügung. Neben einfachen

klinischen Methoden wie der Messung der Muskelkraft lässt sich die Sarkopenie auch mit bildgebenden Verfahren erfassen, etwa mittels der Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA), der Computertomografie (CT), der Magnetresonanztomografie (MRT) oder der Sonografie. Die DXA bietet dabei als einfaches und kostengünstiges Verfahren eine dosisarme Möglichkeit der Erfassung der Körperzusammensetzung. Mit den schnittbildgebenden Verfahren der CT und MRT ergeben sich weitere diagnostische Möglichkeiten bis hin zur MR-Spektroskopie (MRS) zur nicht invasiven molekularen Analyse von Muskelgewebe. Durch die CT können auch bei im Rahmen anderer Fragestellungen durchgeführten Untersuchungen zusätzlich Parameter der Skelettmuskulatur erfasst werden (opportunistische sekundäre Verwendung von CT-Daten), so beispielsweise die abdominelle Muskelmasse (total abdominal muscle area – TAMA) oder der Psoas- sowie der Pektoralis-Muskel-Index. Die Bedeutung der Sarkopenie ist bereits für Patienten mit verschiedenen Tumorentitäten und auch Infektionen wie SARS-COV2 gut untersucht.

Ergebnisse und Schlussfolgerung Nicht zuletzt durch den demografischen Wandel der Bevölkerung wird die Sarkopenie an Bedeutung zunehmen. In dieser Übersichtsarbeit werden die Möglichkeiten zur Diagnostik der Sarkopenie, die klinische Bedeutung und Therapiemöglichkeiten beschrieben. Dabei können insbesondere CT-Untersuchungen, die wiederholt bei Tumorpatienten durchgeführt werden, zur Diagnostik herangezogen werden. Diese opportunistische Verwendung kann dabei durch den Einsatz künstlicher Intelligenz unterstützt werden.

Kernaussagen:

- Sarkopenie ist ein altersabhängiges Syndrom mit Verlust an Muskelmasse und kraft.
- Durch Früherkennung und Therapie lassen sich negative Effekte einer Sarkopenie verhindern.
- Zur Diagnostik stehen neben der DEXA auch Schnittbildverfahren (CT, MRT) zur Verfügung.
- Der Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) bietet weitere Möglichkeiten bei der Sarkopenie-Diagnostik.

Zitierweise

- Vogele D, Otto S, Sollmann N et al. Sarcopenia – Definition, Radiological Diagnosis, Clinical Significance. Fortschr Röntgenstr 2023; 195: 393–405

ABSTRACT

Background Sarcopenia is an age-related syndrome characterized by a loss of muscle mass and strength. As a result, the independence of the elderly is reduced and the hospitalization rate and mortality increase. The onset of sarcopenia often begins in middle age due to an unbalanced diet or malnutrition in association with a lack of physical activity. This effect is intensified by concomitant diseases such as obesity or metabolic diseases including diabetes mellitus.

Method With effective preventative diagnostic procedures and specific therapeutic treatment of sarcopenia, the negative effects on the individual can be reduced and the negative impact on health as well as socioeconomic effects can be prevented. Various diagnostic options are available for this purpose. In addition to basic clinical methods such as measuring muscle strength, sarcopenia can also be detected using imaging techniques like dual X-ray absorptiometry (DXA), computed tomography (CT), magnetic resonance imaging (MRI), and sonography. DXA, as a simple and cost-effective method, offers a low-dose option for assessing body composition. With

cross-sectional imaging techniques such as CT and MRI, further diagnostic possibilities are available, including MR spectroscopy (MRS) for noninvasive molecular analysis of muscle tissue. CT can also be used in the context of examinations performed for other indications to acquire additional parameters of the skeletal muscles (opportunistic secondary use of CT data), such as abdominal muscle mass (total abdominal muscle area – TAMA) or the psoas as well as the pectoralis muscle index. The importance of sarcopenia is already well studied for patients with various tumor entities and also infections such as SARS-COV2.

Results and Conclusion Sarcopenia will become increasingly important, not least due to demographic changes in the population. In this review, the possibilities for the diagnosis of sarcopenia, the clinical significance, and therapeutic options are described. In particular, CT examinations, which are repeatedly performed on tumor patients, can be used for diagnostics. This opportunistic use can be supported by the use of artificial intelligence.

Definition

Der Begriff „Sarkopenie“ setzt sich aus den beiden griechischen Worten „sarx – Fleisch“ und „penia – Mangel“ zusammen. Unter einer Sarkopenie versteht man den im Alter progressiven und generalisierten Abbau an Muskelmasse und -kraft. Die Ausprägung dieses primären Alterungsprozesses kann durch Komorbiditäten und körperliche Inaktivität verstärkt werden [1]. Auch bei Kindern und Jugendlichen kann eine Sarkopenie vorliegen, z. B. im Rahmen einer Tumorerkrankung wie dem Hepatoblastom, langandauernder Steroidtherapie, Muskeldystrophie oder einer chronischen Lebererkrankung [2–4]. Potenzielle Risikofaktoren für eine Sarkopenie sind in ► **Tab. 1** zusammengefasst. Neben funktionellen Einschränkungen bedeutet dies für die Betroffenen oftmals eine Zunahme von Traumata/Stürzen und daraus resultierende Verletzungen, die ihrerseits wiederum die Lebensqualität weiter einschränken können. Im siebten Lebensjahrzehnt sind etwa 20 %, bei den 75-Jährigen etwa die Hälfte aller Frauen und Männer von einer Sarkopenie betroffen [5]. Bei der Geschlechterverteilung werden je nach verwendeter Definition und Population teils bei Männern, teils aber auch bei Frauen höhere Prävalenzen angegeben oder geschätzt [6]. Es existieren bereits einige Studien mit großen Fallzahlen, die sich mit der Prävalenz, den Risikofaktoren und dem Screening der Sarkopenie beschäftigt haben [7–10]. So ergab die „UK Biobank“-Studie mit 168 682 Teilnehmern ein erhöhtes Osteoporoserisiko bei prä-sarkopenen Männern und sarkopenen Frauen [10]. Soh und Won untersuchten in ihrer Studie den Zusammenhang zwischen Sarkopenie und dem Sturzrisiko bei älteren koreanischen Erwachsenen. Dabei verwendeten sie Daten aus der „Korean Frailty and Aging Cohort Study“ [11]. Durch den demografischen Wandel der Bevölkerungsstruktur wird die Sarkopenie in Zukunft eine zunehmende Rolle spielen.

Neben der Sarkopenie liegt häufig auch eine erhöhte Fettmasse vor. Die sogenannte „sarkopene Adipositas – sarcopenic obesity“ ist eine Sonderform der Adipositas. Normalerweise erhöht sich durch eine zunehmende Gewichtsbelastung die Muskelmasse. Dieser adaptive Mechanismus kann gerade bei älteren Menschen gestört sein [12]. Zudem führt ein verringerter Energieverbrauch nicht direkt zu einer Abnahme des Appetits [13]. In der Folge zeigen diese Menschen im Verhältnis zur erhöhten Fettmasse eine geringe Muskelmasse und -kraft. Auch bei Kindern und Jugendlichen zeigt sich eine deutliche Prävalenz der sarkopenen Adipositas. In einem Review wurde die Prävalenz mit 5,7 % bis 69,7 % bei Mädchen und 7,2 % bis 81,3 % bei Jungen angegeben. Auch ein Zusammenhang mit kardiometabolischen Ereignissen, dem Schweregrad der nichtalkoholischen Fettlebererkrankung, Entzündungen und der psychischen Gesundheit wurde bereits beschrieben [14].

Von der Sarkopenie abzugrenzen ist der Begriff der „Kachexie“. Vereinbartes diagnostisches Kriterium für die Kachexie ist ein Gewichtsverlust (Fett und Muskelmasse) von mehr als 5 % in den letzten 6 Monaten oder von mehr als 2 % bei Personen, die bereits ein Untergewicht (Body Mass Index [BMI] < 20 kg/m²) oder eine Sarkopenie aufweisen. Ein internationaler Konsens eines Expertengremiums definiert die Sarkopenie bei Tumorkranken als grundlegenden Teil der Kachexie und als wichtigen Teil der Beurteilung von Tumorkranken [15, 16]. Der Unterschied einer Kachexie zur Sarkopenie bei Tumorerkrankungen definiert sich dadurch, dass bei ersterer eine Sarkopenie mit Gewichtsverlust vorliegen muss [15].

Diagnostik

Um eine Sarkopenie zu erfassen, stehen verschiedene Screening-Methoden zur Verfügung, die unter anderem von der *European*

► **Tab. 1** Risikofaktoren für eine Sarkopenie und ihre Bedeutung.

Alter	Beginn häufig im mittleren Alter, Fortschreiten im zunehmenden Alter
Geschlecht	Je nach verwendeter Klassifikation teils höhere Prävalenz bei Frauen oder Männern (Referenz Petermann-Rocha et al., Morley et al.)
Mangelernährung	Vor allem eine verringerte Proteinzufuhr. Zugleich steigt im Alter der Bedarf an Proteinen
Bewegungsmangel	Häufig durch Erkrankungen wie Arthrose/andere Degenerationen oder als Folge von Tumorerkrankungen. Daraus entsteht ein Teufelskreis, der einen aggravierten Muskelabbau zur Folge hat
Hormonmangel	Insbesondere Testosteron- oder Östrogenmangel
Entzündungsprozesse	Chronische Entzündungsprozesse wie zum Beispiel bei einer rheumatoiden Arthritis fördern den Muskelabbau
Tumorerkrankungen	Häufig konsumierende Erkrankung und Nebenwirkungen der Therapie mit resultierender Fehl-/Mangelernährung Durch längere Hospitalisierung und/oder operative Eingriffe besteht die Gefahr eines fortschreitenden Bewegungsmangels
Muskeldystrophien	Seltene Ursache einer fortschreitenden Muskelschwäche und Abnahme der Muskelmasse durch genetische Mutationen

► **Tab. 2** Bildgebende Verfahren zur Erfassung der Sarkopenie (modifiziert nach Mohamed Ali et al.[6]). Zusätzliche Darstellung der Vorteile und Limitationen. DXA: Dual-energy-X-rax absorptiometry, CT: Computertomografie, MRT: Magnetresonanztomografie.

Bildgebung	Vorteile	Limitationen
DXA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Günstig, schnell durchführbar ▪ Geringe Dosisbelastung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ungenaue Ergebnisse bei adipösen Patienten und Ödem ▪ Eingeschränkte Vergleichbarkeit bei Untersuchung an verschiedenen Geräten ▪ 2D-Aufnahmen
CT	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Quantifizierung der Muskulatur und des Grades der Verfettung ▪ Kann für den ganzen Körper oder für einzelne Muskeln verwendet werden ▪ Auswertungen können auch bei Untersuchungen mit anderer Fragestellung erfolgen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Teuer und zeitintensiv ▪ Dosisbelastung ▪ Keine Cutoff-Werte für die Diagnose der Sarkopenie
MRT	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zuverlässige Bestimmung der Muskelquantität und -qualität ▪ Keine Dosisbelastung ▪ Kann für den ganzen Körper oder für einzelne Muskeln verwendet werden 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Teuer und nicht breit verfügbar ▪ Lange Untersuchungszeiten und technisch herausfordernd ▪ Keine Cutoff-Werte für die Diagnose der Sarkopenie
Sonografie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfach durchführbar, günstig, sicher und nicht invasiv ▪ Gute Reproduzierbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine standardisierten Messungen ▪ Unklar, welche anatomischen Regionen mit der Gesamtmuskelmasse korrelieren

Working Group on Sarcopenia in Older People (EWGSOP) aufgelistet werden [17]. Allgemein lassen sich diese in direkte und indirekte Methoden kategorisieren [18]. Zu den indirekten Messmethoden zählt die Erfassung molekularer und zellulärer Veränderungen in der Skelettmuskulatur etwa mittels Biomarkern. Auch die negativen Folgen einer Sarkopenie können analysiert werden. Dazu zählen zum Beispiel eine reduzierte Lebensqualität, eine erhöhte Sturzneigung und eine steigende Hospitalisierungsrate [19].

Radiologische Diagnoseverfahren

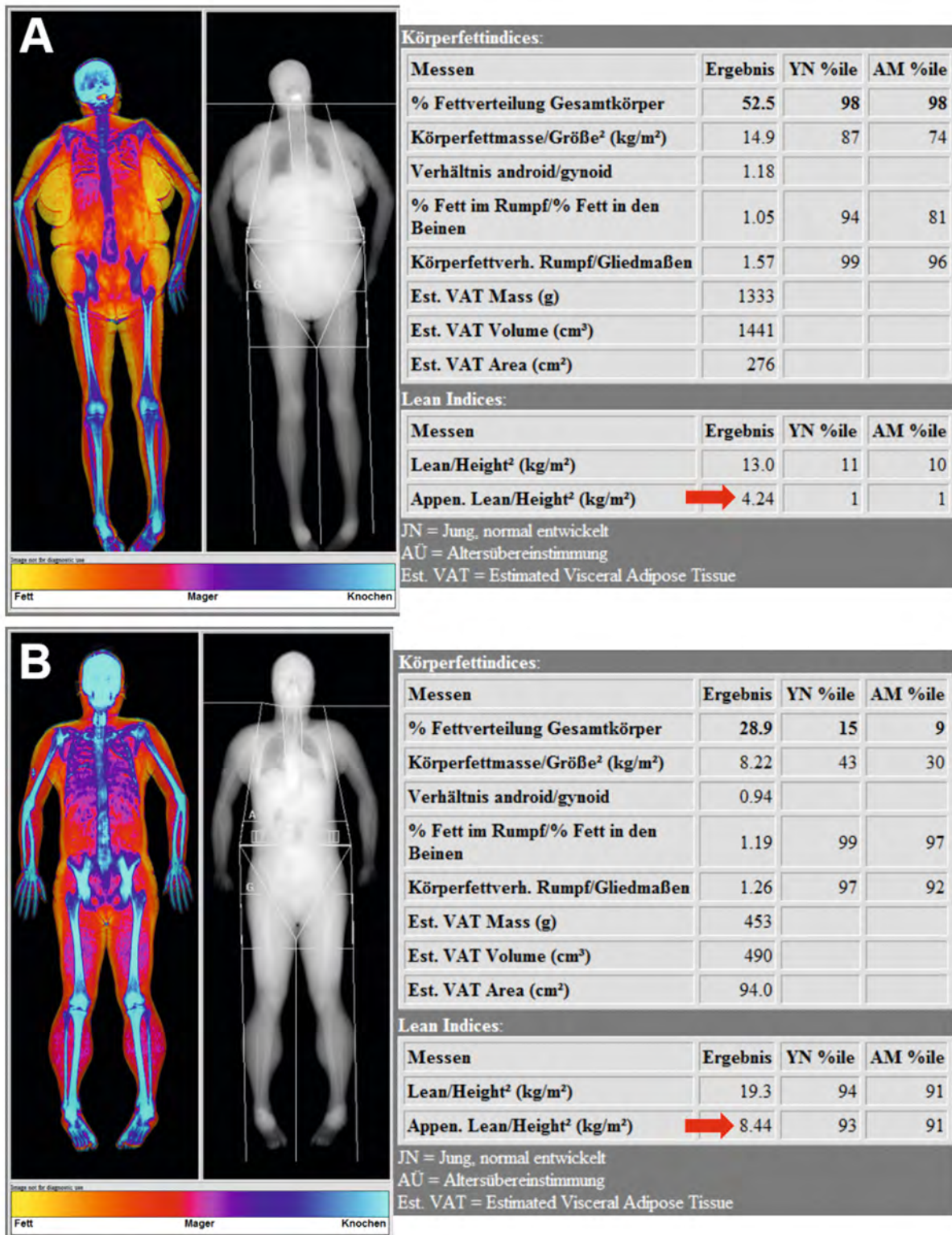
Für die Diagnostik der Sarkopenie stehen verschiedene radiologische Verfahren zur Verfügung wie die Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA) oder auch die schnittbildgebenden Verfahren Computertomografie (CT) und Magnetresonanztomografie (MRT).

Eine zusammenfassende Übersicht gibt ► **Tab. 2**. Im Folgenden werden die wichtigsten Methoden näher erläutert.

Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA)

Die DXA ist ein röntgendiagnostisches Verfahren mit vergleichsweise geringer Strahlenexposition und die am häufigsten verwendete Methode zur Analyse der Körperzusammensetzung [20]. Dieses Messverfahren beruht auf dem unterschiedlichen Absorptionsverhalten niedrig- und hochenergetischer Röntgenstrahlen durch Mineral-, Fett- und Weichteilgewebe [21].

Mit der DXA können üblicherweise folgende Werte bestimmt werden: lean mass (LM), fat mass (FM) und bone mineral content (BMC) bzw. areal bone mineral density (aBMD). Die LM ist dabei die Messung aller Gewebearten, die weder Fett noch Knochen entsprechen. Die Summe der LM der oberen und unteren Extremitäten



► **Abb. 1** Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA) von 2 Patientinnen. A Eine 74-jährige, adipöse Patientin mit einem appendicular lean index (ALMI) von 4,24 kg/m² (roter Pfeil). Gemäß der European Working Group on Sarcopenia in Older People (EWGSOP) liegt somit eine Sarkopenie vor (Grenzwert für Frauen < 6 kg/m²). B 40-jährige Patientin ohne Sarkopenie mit einem ALMI von 8,44 kg/m² (roter Pfeil).

tät, die sogenannte appendicular LM (ALM), wird zur Bestimmung der Muskelmasse verwendet. Durch die Korrelation mit der Körpergröße wird der ALM-Index ($ALMI = ALM/Körpergröße^2$) berechnet. Die EWGSOP gibt einen ALMI von $<6 \text{ kg/m}^2$ für Frauen und $<7 \text{ kg/m}^2$ für Männer als Grenzwert für eine verminderte Muskelmasse an [20]. In ► **Abb. 1** sind Beispiele für die DXA dargestellt.

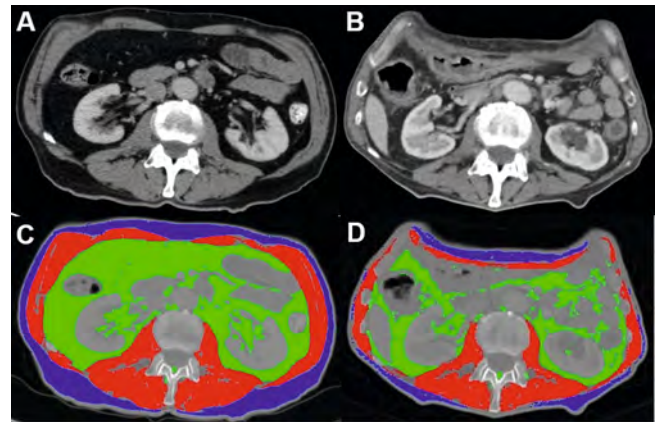
Als Limitation der DXA gilt die eingeschränkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Hersteller. Gegenüber CT und MRT liefert sie nur zweidimensionale Aufnahmen. Darüber hinaus erlaubt die DXA keine Aussage über die qualitative Zusammensetzung der Muskulatur, wie zum Beispiel in Bezug auf Fetteinlagerungen.

Computertomografie

Mit der CT als am weitesten verbreitete Schnittbildgebung lässt sich die Skelettmuskulatur an verschiedenen Körperregionen analysieren. Neben der Muskelfläche bzw. dem -volumen können die Dichtewerte einzelner Muskeln oder Muskelgruppen bestimmt werden [22]. In der Regel erfolgen die Segmentierung der Muskulatur und die Bestimmung der cross sectional area (CSA) auf Höhe L3 oder L4. Analysiert werden auf dieser Höhe der Musculus psoas alleine oder die gesamte Muskelfläche [23]. Hierfür werden die Bauchwandmuskulatur, der Musculus psoas, die autochthone Rückenmuskulatur und der Musculus quadratus lumborum segmentiert. Zusätzlich kann auch das subkutane und viszerale Fettgewebe quantifiziert werden. Prinzipiell erfolgt die Durchführung der Muskelsegmentierung manuell. Alternativ können auch Masken mit vordefinierten Hounsfield-Einheiten (HU) verwendet werden. Goodpaster et al. definierten für die Muskulatur den Bereich zwischen 0 bis 100 HU, während Mitsopoulos et al. den Dichtebereich zwischen -29 und 150 HU verwendeten [24, 25]. In einem direkten Vergleich der beiden HU-Bereiche zeigten sich signifikante Unterschiede bei den ermittelten Muskelflächen [26]. Durch den größeren HU-Bereich werden auch interstitielle Fetteinlagerungen (interstitial adipose tissue – IAT) im Muskelgewebe berücksichtigt. Bei Verwendung des geringeren HU-Bereichs wird dagegen nur der fettgewebsfreie Muskel (adipose tissue-free muscle – ATFMS) erfasst. Bei gesunden jungen Erwachsenen ist die anatomische Skelettmuskulatur nur geringfügig größer als die ATFMS. Allerdings nimmt die IAT im Alter, bei Adipositas und auch bei bestimmten Erkrankungen wie zum Beispiel der Muskeldystrophie zu [25]. Aus diesem Grund hat sich der Bereich von -29 bis 150 HU etabliert.

Darüber hinaus ergab der direkte Vergleich der ermittelten Skelettmuskelflächen aus nativen und kontrastverstärkten CT-Untersuchungen teils signifikante Unterschiede in Abhängigkeit des verwendeten HU-Bereichs. [26]. Auch in dieser Studie zeigte der Bereich zwischen -29 und 150 HU die zuverlässigsten Ergebnisse. Der verwendete HU-Bereich muss also bei der Auswertung, der Interpretation und dem Vergleich von Ergebnissen bedacht werden.

Die anhand einer CT-Schicht erhobenen Muskelflächen korrelieren sehr gut mit der gesamten Körpermuskelmasse [27, 28]. Meist werden die Ergebnisse der Muskelfläche mit der Körpergröße korreliert und der sogenannte skeletal muscle index (SMI) bestimmt ($SMI = CSA/Körpergröße^2$). Für die Diagnose der Sarkope-

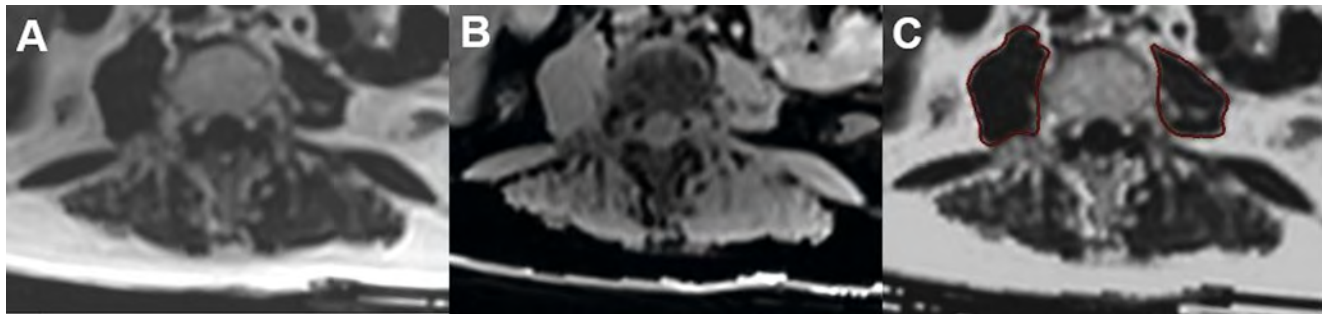


► **Abb. 2** Analyse der Körperzusammensetzung auf Höhe L3 eines 67-jährigen Patienten mit einem AEG-Tumor vor **A, C** und nach **B, D** neoadjuvanter Chemotherapie mit einer deutlichen Reduktion der Skelettmuskelfläche sowie des subkutanen und viszeralen Fettgewebes. Die Skelettmuskelfläche reduzierte sich von $123,40 \text{ cm}^2$ auf $65,06 \text{ cm}^2$. Der Skelettmuskelindex verringerte sich von $36,85 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ auf $19,43 \text{ cm}^2/\text{m}^2$. Die Skelettmuskelfläche ist rot eingefärbt, das subkutane Fettgewebe blau und das viszerale Fettgewebe grün. Die Segmentierung erfolgte semiautomatisch mit einer eigenen Python-Anwendung basierend auf SimpleITK. Für die Skelettmuskulatur lag der verwendete Dichtebereich zwischen -5 und 135 Hounsfield-Einheiten (HU) und für das Fettgewebe zwischen -190 und -30 HU.

nie sind von der EWGSOP aktuell nur Grenzwerte für die DXA und die Bioelektrische Impedanzanalyse (BIA) definiert [17]. In einigen Studien sind auch für den SMI entsprechende Grenzwerte angegeben [23, 29, 30]. Bei Tumorpatienten wurden als Referenz am häufigsten die CT-Daten von Prado et al. und Martin et al. verwendet. Die Daten von Prado et al. basieren auf der Analyse von insgesamt 2115 Patienten mit soliden Tumoren des Gastrointestinaltrakts oder der Atemwege [29]. In der Studie von Martin et al. wurde von 1473 Patienten mit einem Malignom der Lunge oder des Gastrointestinaltrakts der skeletal muscle index (SMI) bestimmt [30]. Auch für Kinder existieren bereits alters- und geschlechtsspezifische Perzentilenkurven für die total psoas muscle area (tPMA) [31].

Vorteil dieser Indizes ist, dass sich bei allen CT-Untersuchungen des Körperstamms zusätzlich zur primären klinischen Fragestellung die Muskelmasse erfassen lässt und entsprechende Berechnungen durchgeführt werden können (sekundäre Verwendung von CT-Daten). Die CT eignet sich insbesondere bei Tumorpatienten zur Sarkopenie-Diagnostik, da diese häufig schon bei der Diagnosestellung und anschließend in definierten Zeitabständen zur Evaluation des Therapieansprechens durchgeführt wird.

Die Analyse der Muskulatur auf den genannten Höhen (L3 und L4) ist nur bei abdominalen Untersuchungen möglich. Derstine et al. haben aus diesem Grund die Untersuchung der Skelettmuskulatur von Th10 bis L5 evaluiert [32]. Dadurch kann die Sarkopenie-Diagnostik prinzipiell auch bei der CT des Thorax angewendet werden. Ein zusätzlicher Vorteil der Abdomen-CT ist, dass neben der Skelettmuskulatur begleitend auch die abdominale Fettverteilung erfasst werden kann (subkutanes und intraabdominelles



► **Abb. 3** Magnetresonanztomografie (MRT) in Multi-Echo (ME) Dixon-Technik. Berechnetes Fettbild **A**, Wasserbild **B** und die Auswertung aus den Dixon-Daten zur Bestimmung des Fettanteils **C** mit Segmentierung des Musculus psoas. Die Fläche des rechten Musculus psoas beträgt 12,0 cm² und links 8,40 cm². Der Fettanteil liegt rechts bei 7,5% und links bei 16,3%.

Fettgewebe). Diese ergänzenden Messungen erlauben damit eine Körperanalyse in Anlehnung an die DXA [33].

Ein Beispiel für eine Analyse der Körperzusammensetzung anhand einer Routine-CT zeigt ► **Abb. 2**.

Eine der Limitationen der CT stellt die hohe Dosisbelastung im Vergleich zur DXA dar. Als Größenordnung der applizierten effektiven Dosis bei einer Ganzkörper-DXA werden von der Strahlenschutzkommission 1–10 µSv angegeben [34]. Die typische effektive Dosis für eine CT des Abdomens und des Beckens liegt etwa bei 11 mSv [35]. Diese kann jedoch durch individuelle Faktoren variieren, wie zum Beispiel Geschlecht, Alter und Konstitution. Dieser Nachteil relativiert sich, wenn die CT-Bildgebung im Rahmen von Untersuchungen anderweitiger Fragestellungen erfolgt ist, zum Beispiel wie erwähnt im Rahmen von Routine-Staginguntersuchungen bei Tumorpatienten.

Magnetresonanztomografie (MRT)

Neben dem Vorteil eines ausgezeichneten Weichteilkontrastes bietet sich die MRT v. a. als strahlungsfreie Alternative an. Neben der gezielten Darstellung einzelner Muskeln bzw. Muskelgruppen sind auch Ganzkörperuntersuchungen möglich. Zudem erlaubt die MRT nicht nur eine qualitative Darstellung – wie zum Beispiel einer fettigen Infiltration oder Fibrosierung – sondern auch die quantitative Bestimmung der Muskel- und Fettmasse [36]. Pons et al. beschreiben, dass die Volumetrie der Muskulatur mittels MRT sich als valide und zuverlässige Methode gezeigt hat. Neben der manuellen Segmentierung ist auch die (semi-)automatisierte Segmentierung bestimmter Muskeln möglich [37].

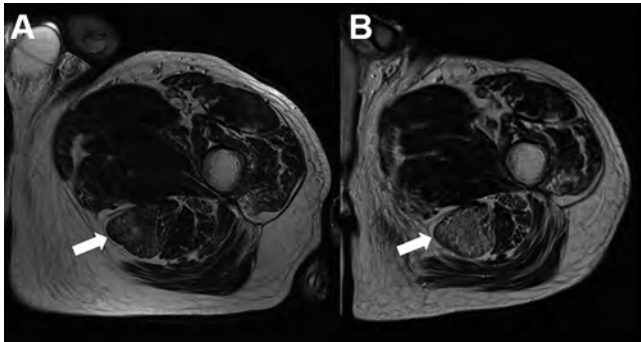
Neben der Muskelsegmentierung stehen mit dem Dixon-Verfahren und der MR-Spektroskopie (MRS) spezielle Techniken für die Diagnostik einer Sarkopenie zur Verfügung. Als wichtiger Faktor für die eingeschränkte Mobilität bei Patienten mit Sarkopenie gilt die fettige Infiltration der Skelettmuskulatur [38–40]. Zur Erfassung dieser Muskelverfettung bietet sich das sogenannte DIXON-Verfahren an. Dabei werden die unterschiedlichen Resonanzfrequenzen von Wasser und Fett genutzt, um die Anteile von Fett und Wasser am gesamten Protonensignal zu analysieren. Mit der ursprünglichen DIXON-Sequenz werden 2 Echos akquiriert, einmal mit Wasser und Fett in-phase (IP) und ein weiteres mit Wasser und Fett opposed-phase (OP) [41]. Durch die Addition und Subtraktion der OP und der IP lassen sich sogenannte Fett-

und Wasserbilder erzeugen. Durch die akquirierten Bilder kann mit der ursprünglichen DIXON-Methode ein qualitativer Fettnachweis erfolgen. In der klinischen Routine wird diese Methode zum Beispiel zur Differenzierung von Nebennierentumoren eingesetzt. Die Weiterentwicklung der DIXON-Methode verwendet Echos zu mehreren Zeitpunkten und wird als Multi-Echo (ME)-Methode bezeichnet. Dieser Ansatz erlaubt durch die Berechnung parametrischer Karten eine direkte Wasser- und Fettquantifizierung. In klinischen Studien wurde die ME-Technik schon zur Quantifizierung der Leberverfettung verwendet [42, 43]. Zudem bietet sie die Möglichkeit über eine Kartierung die Fettverteilung in der Muskulatur zu analysieren [44, 45]. In ► **Abb. 3** ist ein Beispiel der Fettquantifizierung mit der ME-Dixon-Methode dargestellt.

Die MRS bietet eine weitere Option bei der Erfassung der Sarkopenie [21]. Im Gegensatz zur MR-Bildgebung ist das Resultat einer Spektroskopiemessung kein Schnittbild, sondern ein Intensitätsspektrum von Frequenzsignalen [46]. Durch diese volumenselektiven Messungen lassen sich Stoffwechselvorgänge im menschlichen Körper, z. B. in der Skelettmuskulatur untersuchen. Speziell mit der ³¹P-Spektroskopie können dabei das Spektrum der Phosphormetabolite und die Veränderungen der Konzentrationen dieser Metabolite während muskulärer Arbeit analysiert werden [47], zum Beispiel bei Patienten mit Diabetes mellitus Typ II oder peripherer arterieller Verschlusskrankheit [48–50]. Auch im Rahmen der Sarkopenie wurde mit der MRS ein Zusammenhang zwischen Veränderungen des Metabolismus der Skelettmuskulatur und einer abnehmenden Muskelmasse bzw. Veränderungen der Muskelfunktion beschrieben. Um die Ergebnisse zu bestätigen und zu vertiefen, sind weitere Studien nötig.

Die Reproduzierbarkeit und intermodale Konkordanz zwischen MRT und CT bei der abdominalen Muskelsegmentierung konnte bei Patienten mit Nierenzellkarzinom bereits gezeigt werden [51]. Beispiele für qualitative Veränderungen der Muskulatur zeigen ► **Abb. 4, 5**.

Als Limitationen der MRT sind neben den Kosten und der teils eingeschränkten Verfügbarkeit auch die im Vergleich zu anderen Methoden langen Untersuchungszeiten zu nennen. Zudem existieren keine absoluten Grenzwerte für die Definition einer Sarkopenie. Der Einsatz erfolgt meist im Rahmen von Forschungsvorhaben in spezialisierten Zentren.



► **Abb. 4** Magnetresonanztomografie (MRT) eines 45-jährigen Patienten mit der Diagnose eines malignen peripheren Nerven-scheidentumor (MPNST). T2 turbo spin echo (TSE)-Sequenz des linken Oberschenkels transversal 1 Jahr nach **A** und 6 Jahre nach distaler Oberschenkelamputation **B**. Es zeigt sich eine fortschreitende Volumenminderung der Oberschenkelmuskulatur und Fetteinlagerungen, am deutlichsten ausgeprägt des Musculus semitendinosus (Pfeile).

Sonografie

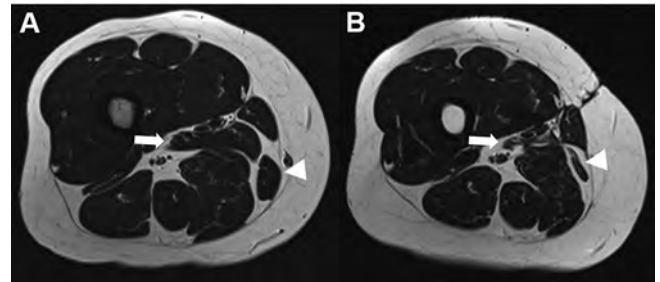
Die Sonografie bietet als günstige, breit verfügbare und strahlungsfreie Methode eine gut reproduzierbare Alternative [52]. Ticinesi et al. konnten dabei über die Bestimmung des Querschnitts des Musculus rectus femoris das Volumen der gesamten Quadrizeps-Muskulatur erfassen. Zusätzlich zeigte sich eine sehr gute Korrelation zur Messung mittels MRT [53]. Die fehlende Standardisierung der sonografischen Erfassung sowie teils untersucherabhängige Qualität der Durchführung stellen Limitationen dar. Darüber hinaus können durch zu starken Druck durch den Schallkopf die muskulären Kompartimente zu stark komprimiert werden, was zu falsch kleinen Muskelvolumina führt.

Nicht radiologische Diagnoseverfahren

Weitere nicht radiologische Diagnoseverfahren sind die Bioelektrische Impedanzanalyse (BIA), Elektromyografie (EMG), Bestimmung des Kaliumgehalts und anthropometrische Messungen, wie zum Beispiel der Umfang des Oberarms.

Künstliche Intelligenz in der Sarkopenie-Diagnostik

In einigen Studien wurden die Muskulatur und das Fettgewebe in CT- und MRT-Datensätzen bereits mittels künstlicher Intelligenz (KI) analysiert [9, 54–57]. Nowak et al. verwendeten in ihrer Studie mit 1143 CT-Datensätzen 2 neuronale Netze [57]. Mit dem ersten neuronalen Netz wurde die zu analysierende CT-Schicht auf Höhe L3/L4 ausgewählt, durch das zweite anschließend die Skelettmuskulatur sowie das Fettgewebe segmentiert. Dabei zeigte sich eine hohe Übereinstimmung zwischen der manuellen und der automatischen Analyse durch die beiden neuronalen Netze. Pickhardt et al. verwendeten bei der Analyse der Skelettmuskulatur auf Höhe des 1. und 3. Lendenwirbelkörpers von 9223 CT-Datensätzen einen automatisierten Deep-learning-Ansatz [9].



► **Abb. 5** Magnetresonanztomografie (MRT) einer 36-jährigen Patientin mit der Diagnose eines Ewing-Sarkoms. T2 turbo spin echo (TSE)-Sequenz des rechten Oberschenkels transversal vor **A** und 3 Jahre nach Resektion **B**. Es zeigt sich im Verlauf eine Volumenminderung der Oberschenkelmuskulatur am deutlichsten ausgeprägt des Musculus adductor magnus (Pfeile) und des Musculus gracilis (Pfeilspitze). Die Muskulatur zeigt zunehmende streifige Fetteinlagerungen.

Die dadurch ermittelten Daten zur Sarkopenie und insbesondere die Muskelverfettung zeigten sich bei der Vorhersage von Hüftfrakturen und Mortalität vergleichbar zu klinischen Risikoscores. Durch eine KI-basierte Auswertung kann der Zeitaufwand für die Segmentierung reduziert werden und die zusätzlich gewonnenen Daten in den radiologischen Befund übernommen werden.

Ein weiterer Ansatz zur Sarkopeniediagnostik stellt die Radiomics-Analyse der Skelettmuskulatur dar [58]. In einer Studie wurden Radiomics zur Erfassung der Sarkopenie aus den CT-Datensätzen von 247 Patienten mit kleinzelligem Bronchialkarzinom genutzt. Bei der Analyse wurde dafür ein Machine-learning-Modell verwendet. Um diesen vielversprechenden Ansatz weiter zu untersuchen, sind jedoch noch weitere Studien nötig.

Klinische Bedeutung

Mit der zunehmenden Alterung der Weltbevölkerung wird das Auftreten der Sarkopenie deutlich zunehmen und zu zusätzlichen negativen Folgen und Schäden führen. Jedoch können auch altersunabhängig schwere Erkrankungen wie Malignome, COPD, chronische Herz- oder Nierenerkrankungen sekundär einen Verlust von Muskelmasse und -kraft verursachen. Ein frühzeitiges Screening und Intervention können die Ausgaben für das öffentliche Gesundheitswesen erheblich senken.

Aus den beschriebenen modalitätengestützten Verfahren zur Diagnostik der Sarkopenie ergeben sich mannigfache klinische Anwendungsmöglichkeiten. Im Folgenden werden einige exemplarisch dargestellt, hier beschränkt auf Tumoren sowie entzündliche/infektiöse Erkrankungen.

Tumor

Hauptanwendungsgebiet der Diagnostik der Sarkopenie sind sicherlich tumoröse Erkrankungen. Besonders Patienten mit Malignomen leiden häufig an ausgeprägter Gewichtsabnahme und den daraus resultierenden Folgen, bedingt durch die konsumierende Erkrankung selbst oder durch die therapieassoziierten Nebenwirkungen. Zudem ist gerade dieses Patientenkollektiv durch

große Operationen sowie lange Krankenhausaufenthaltszeiten gefährdet.

In einer Kohorte von Patienten mit Malignomen des oberen Gastrointestinaltrakts zeigte sich gemäß DXA eine Prävalenz der Sarkopenie von 11,5 % gemäß der Schwellenwerte nach Suetta in einem dänischen Referenzkollektiv [59] bzw. von 19,1 % im Vergleich zu einem australischen Referenzkollektiv [60], wobei eine deutliche Diskrepanz zu den Schwellenwerten für die Sarkopenie-Diagnose gemäß CT im gleichen Kollektiv bestand [61]. Im Speziellen zeigte sich eine mittlere Differenz in der Quantifizierung von lean tissue von 1,4 kg [61]. Insbesondere die CT-Bildgebung wird in diesem Zusammenhang häufig zur Bestimmung der Körperzusammensetzung herangezogen, da Staging- und Follow-Up-Untersuchungen bei Patienten mit Tumoren wiederholt über den Krankheitsverlauf durchgeführt werden, sodass insbesondere die sekundäre Verwendung von CT-Daten im Fokus steht.

In Bezug auf den CT-basierten SMI zur Diagnostik der Sarkopenie zeigte sich, dass über die verfügbaren Studien bei onkologischen Patienten hinweg insbesondere die Schwellenwerte von Martin et al. [30] und Prado et al. [29] zur Anwendung kamen mit einem jeweiligen Anteil von ca. 30 % bzw. ca. 45 % [62]. Am häufigsten wurden in den bisherigen Studien Patienten mit kolorektalen Karzinomen untersucht, wobei sich eine Prävalenz von niedrigem SMI-Werten in 46,0 % zeigten (medianer Anteil von Patienten mit niedrigem SMI: 41,1 % bei kurativer Kohorte, 49,1 % in der Kohorte ohne kurativen Ansatz) [62]. Die höchste Prävalenz eines erniedrigten CT-basierten SMI zeigte sich allerdings bei Patienten mit ösophagealen und pulmonalen Karzinomen mit 49,8 % und 49,5 %, wobei die Kohorte mit nicht kurativen Krebsleiden jeweils – vergleichbar zu den kolorektalen Karzinomen – durch eine höhere Prävalenz charakterisiert war [62]. Über die einzelnen Tumorentitäten verteilt zeigt sich eine prozentuale Prävalenz von erniedrigten SMI-Werten zwischen 35 % und 50 %, was unter den einzelnen Tumortypen, Schwellenwerten und Krankheitsstadien ungefähr vergleichbar war, sodass eine reduzierte Muskelmasse bzw. -qualität anhand CT-basierter SMI-Werte endemisch unter onkologischen Patienten zu sein scheint [62]. Hierbei ist erwähnenswert, dass ein reduzierter SMI – zusammen mit der etwas seltener gebräuchlichen skeletal muscle density (SMD) – negativen Einfluss auf das Überleben von onkologischen Patienten zu haben scheint und somit unmittelbare klinische Relevanz hat [63–65]. In einer Metaanalyse von Shachar et al. wurden 38 Studien mit insgesamt 7843 Patienten mit der Diagnose eines soliden Tumors eingeschlossen [63]. Die häufigsten in den Studien untersuchten Tumorerkrankungen waren das hepatozelluläre Karzinom (n = 11), pankreatikobiliäre Tumore (n = 6), gastroösophageale Tumore (n = 4), Urothel-Karzinome, Nierenzellkarzinome und kolorektale Karzinome (je n = 3). Bei allen eingeschlossenen Studien zeigte sich der bei der Diagnose ermittelte SMI als negativer prognostischer Faktor für das Überleben. Dies galt für Patienten mit vorliegender Metastasierung wie auch für Patienten ohne Metastasen. Kim et al. ermittelten in einer retrospektiven Analyse bei Patienten mit Pankreaskarzinomen unter Erstlinien-Chemotherapie den SMI, SMD und Sarkopenie [65]. Ein niedriger SMI oder SMD zeigte sich als negativer prognostischer Faktor für das Überleben. Noch stärker war dieser Effekt bei gleichzeitig erniedrigtem SMI und SMD zu beobachten. Auch Nebenwirkungen der Chemo-

therapie wurden bei Patienten mit niedrigem SMI häufiger beobachtet. Die breitere Verwendung von MRT-basierten Methoden zur Diagnostik oder Verlaufsbildgebung der Sarkopenie steht demgegenüber noch weitgehend aus. In einer ersten Studie unter Einbezug von Patienten mit verschiedenen onkologischen Grunderkrankungen zeigte sich eine starke intermodale positive Korrelation zwischen der CSA und der paraspinalen muskulären Fettinfiltration gemäß CT- und MRT-Bildgebung [55]. Insbesondere die gute Korrelation zwischen CS-MRT-basierter Quantifizierung des Fettanteils der Muskulatur und Dichtewerten aus der CT-Bildgebung erscheint vielversprechend, um verhältnismäßig valide Marker opportunistisch aus der CT-Bildgebung gewinnen zu können, die der MRT-Bildgebung nicht unterlegen sein müssen [55]. Die Anwendung von DTI oder MRS könnte eine weitere Charakterisierung von Sarkopenie betroffener Kompartimente ermöglichen, kommt jedoch speziell bei Patienten mit Tumorerkrankungen noch nicht in repräsentativem Umfang zur Anwendung.

Entzündung/Infektion

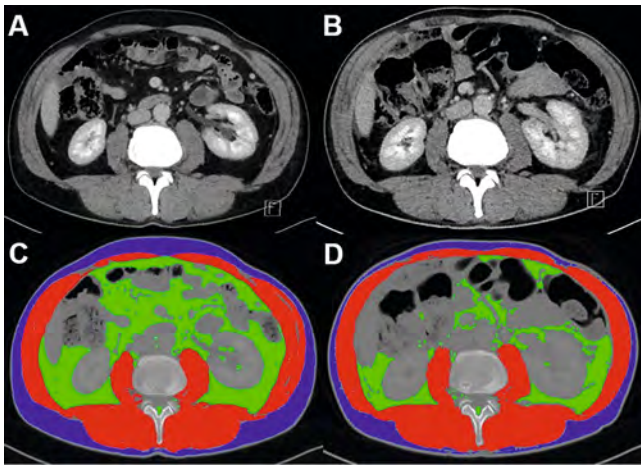
Eine weitere große Patientengruppe von Interesse für die Sarkopeniediagnostik findet sich bei den entzündlichen bzw. infektiösen Erkrankungen. Auch diese fördern katabole Stoffwechselreaktionen und führen zu einer Abnahme der Muskelmasse, ebenfalls verstärkt durch lange Liegezeiten, sei es im stationären oder ambulanten Umfeld [66, 67].

Gerade bei chronisch-entzündlichen Erkrankungen aus dem rheumatischen Formenkreis oder bei chronisch-entzündlichen Darmerkrankungen ist die Korrelation mit der Sarkopenie meist durch DXA-Messungen in mehrere Studien nachgewiesen worden, wie die systematische Auswertung von An et al. zeigt [68].

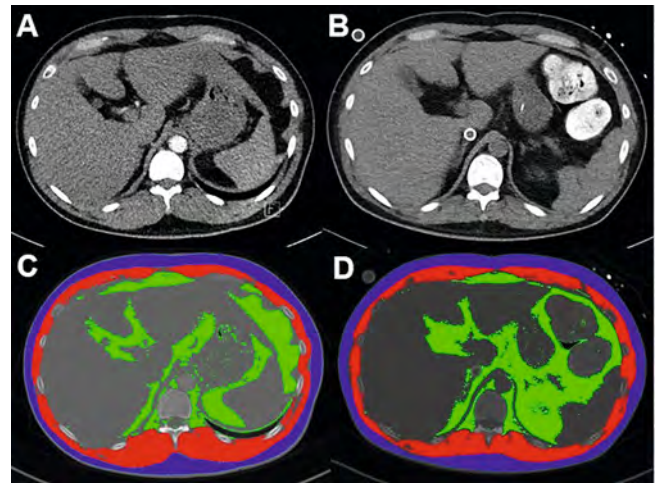
Im Hinblick auf entzündliche Veränderungen haben Modesto et al. eine gesunde Kontrollgruppe und 3 Patientengruppen mit unterschiedlichen Stadien der Pankreatitis untersucht [69]. Dabei wurde ein Erstereignis einer akuten Pankreatitis von einer rezidivierend-akuten Form sowie der chronischen Pankreatitis unterschieden. Zur Anwendung kam bei der Analyse ein abgewandelter Psoas-Index. Die Gruppe konnte zeigen, dass das Muskelvolumen der Psoasmuskulatur durchaus als Biomarker geeignet ist, um den Übergang von der akut-rezidivierenden zur chronischen Pankreatitis rechtzeitig zu erkennen und damit frühzeitig entsprechende therapeutische Maßnahmen einleiten zu können. Es ergab sich jedoch auch hier das Problem eines fehlenden Schwellenwerts für das absolute Muskelvolumen, sodass nur vergleichende Analysen zwischen den Patientengruppen möglich waren. In einer weiteren Studie konnte bei Patienten mit nekrotisierender Pankreatitis ein Zusammenhang zwischen dem Verlust der Muskelmasse und der Mortalität innerhalb eines Monats nach Hospitalisierung gezeigt werden [70]. Ein Beispiel für die Reduktion der Skelettmuskulatur bei einem Patienten mit nekrotisierender Pankreatitis zeigt

► Abb. 6.

Aber auch für die noch junge Erkrankung COVID-19 wurden in jüngster Zeit mehrere Untersuchungen bezüglich einer Sarkopenie publiziert. So konnten Gualtieri et al. mittels CT eine Abnahme der Muskelmasse während des Aufenthalts auf der Intensivstation dokumentiert werden [71]. Auch lässt sich anhand der Fläche der Pektoralismuskulatur eine Vorhersage hinsichtlich der Dauer des



► **Abb. 6** Computertomografie (CT) eines 68-jährigen Patienten mit nekrotisierender Pankreatitis bei Diagnosestellung **A, C** und 4 Wochen später unter Therapie **B, D**. Es zeigt sich eine deutliche Reduktion des subkutanen (blau) und viszeralen (grün) Fettgewebes. Die Skelettmuskelfläche (rot) reduzierte sich von 184,20 cm² auf 164,13 cm². Der Skelettmuskelindex zeigt eine mäßige Abnahme von 53,24 cm²/m² auf 47,44 cm²/m². Die Segmentierung erfolgte semiautomatisch mit einer eigenen Python-Anwendung basierend auf SimpleITK. Für die Skelettmuskulatur lag der verwendete Dichtebereich zwischen -5 und 135 Hounsfield-Einheiten (HU) und für das Fettgewebe zwischen -190 und -30 HU.

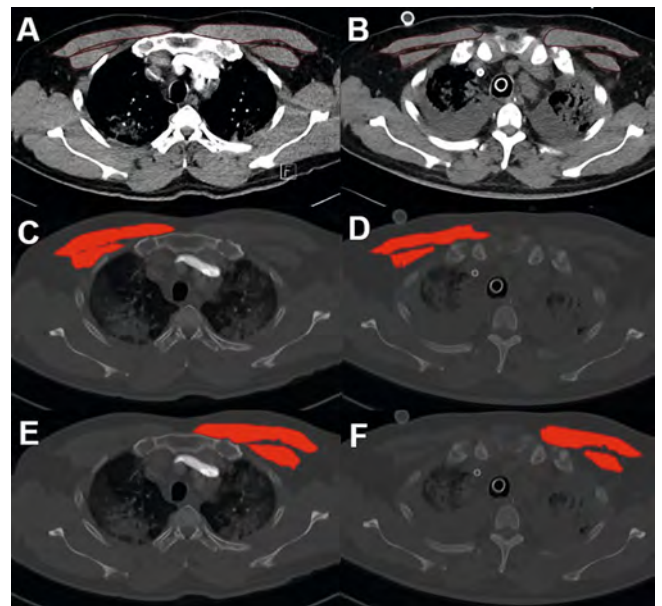


► **Abb. 7** Computertomografie (CT) eines 44-jährigen Patienten mit COVID-19-Pneumonie und schwerem acute respiratory distress syndrome (ARDS) zu Beginn der Erkrankung **A, C** und 5 Wochen später **B, D**. Der Patient erhielt eine intensivmedizinische Behandlung inklusive invasiver Beatmung und Anlage einer veno-venösen extrakorporalen Membranoxygenierung (ECMO). Es zeigt sich eine Abnahme der Skelettmuskelfläche auf Höhe BWK 12 von 99,38 cm² auf 87,13 cm². Die Segmentierung erfolgte semiautomatisch mit einer eigenen Python-Anwendung basierend auf SimpleITK. Für die Skelettmuskulatur lag der verwendete Dichtebereich zwischen -5 und 135 Hounsfield-Einheiten (HU) und für das Fettgewebe zwischen -190 und -30 HU.

Krankenhausaufenthalts, der Intubation und der Mortalität bei COVID-19-Patienten ableiten [72]. In ► **Abb. 7, 8** ist der Verlauf der Skelettmuskulatur im Rahmen einer schweren COVID-19-Infektion dargestellt.

Komplikationen, Hospitalisierungsdauer, Morbidität

Eine weitere interessante Option der Sarkopenie-Diagnostik ergibt sich aus der Möglichkeit, das Risiko postoperativer Komplikationen mittels einer perioperativen Muskelmassenbestimmung besser abschätzen zu können. Eine entsprechende Kenntnis kann dann zur besser personalisierten OP-Indikation mit ggf. umfassenderer physiotherapeutischer Vorbereitung und Aufklärung beitragen. So untersuchten Jang et al. 284 Patienten vor geplanter Pankreaschirurgie [73]. In einer präoperativ durchgeführten Bestimmung der auf das Körpergewicht standardisierten Muskelfläche in der Abdomen-CT konnte gezeigt werden, dass bei Sarkopeniepatienten hoch signifikant häufiger gefürchtete postoperative Pankreasfisteln mit entsprechend langer stationärer Behandlungsnötigkeit und hieraus resultierender Immobilisation resultieren. Andere untersuchte Parameter, wie der bislang zur Risikoabschätzung meist angewandte präoperative Durchmesser des Pankreashauptganges, zeigten dagegen keinen Einfluss auf eine postoperative Fistelbildung. Darüber hinaus konnte eine Korrelation des Psoas-Index bei älteren Patienten und bei Traumatopatienten mit der Morbidität, der Hospitalisierungsdauer und der Komplikationsrate während des stationären Aufenthalts gezeigt werden [74, 75].



► **Abb. 8** Vergleich der Fläche des Musculus pectoralis major et minor gemessen direkt oberhalb des Aortenbogens zu Beginn der Erkrankung **A** und 5 Wochen später **B**. Die gemessene Fläche des Musculus pectoralis major et minor rechts zeigte eine Abnahme von 20,14 cm² auf 14,95 cm² **C, D** und links von 26,23 cm² auf 16,81 cm² **E, F**. Für die Skelettmuskulatur lag der verwendete Dichtebereich zwischen -5 und 135 Hounsfield-Einheiten (HU).

Prophylaxe und Therapie

Bewegung stellt die bedeutendste Intervention im Zusammenhang mit der Prophylaxe und der Behandlung einer Sarkopenie dar. Die körperliche Betätigung hat eine positive Auswirkung auf die Muskelmasse, die Muskelkraft und die körperliche Funktion, indem sie den altersbedingten Verlust abschwächt [76, 77].

Für die Sarkopenie gibt es derzeit noch keine spezifische Behandlung, sie ist jedoch prinzipiell reversibel. Es gilt eine Verbesserung der Muskelmasse, -kraft und -leistung zu erzielen. Insbesondere bei frühzeitiger Intervention lässt sich den Abbauprozessen durch ein individuell angepasstes körperliches Training und adäquate Ernährung aktiv entgegenwirken [7, 78]. Aufgrund der gezielten muskulären Beanspruchung ist vor allem ein altersgerechtes und individuell angepasstes progressives Kraft- und Widerstandstraining zur Prävention und Behandlung geeignet [79, 80]. Neben der Muskelkraft lässt sich dadurch auch die Ausdauerleistung verbessern. Intensive alltägliche Aktivitäten (z. B. Haus- und Gartenarbeit) tragen außerdem zur Optimierung der Muskulatur und auch der Lebensqualität bei. Zur Minimierung des Sturzrisikos sollte das Training um ein Gleichgewichtstraining ergänzt werden [81]. Zur Verbesserung der Muskelproteinsynthese wird neben der individuell angepassten Proteinaufnahme ein ausreichend hoher Leucinanteil (z. B. vorhanden in Molkeprotein) empfohlen [82, 83].

Schlussfolgerung/Ausblick

Aufgrund des demografischen Wandels wird die Sarkopenie als chronische Erkrankung eine zunehmende Rolle einnehmen. Nicht nur für ältere Patienten ist die Sarkopenie verbunden mit einer negativen Beeinträchtigung des Verlaufs diverser Erkrankungen häufig in Kombination mit einer erhöhten Hospitalisierungsrate und Morbidität. Für zahlreiche Tumorerkrankungen konnte die Sarkopenie als negativer prognostischer Faktor identifiziert werden. Die Erfassung und die Verlaufsbeurteilung können durch verschiedene radiologische Verfahren erfolgen. Die CT nimmt dabei eine wichtige Rolle ein, da sie häufig im Rahmen anderer Fragestellungen durchgeführt wird, zum Beispiel beim Routine-Staging von Tumorpatienten. Dabei können begleitend Daten und Informationen zur Sarkopenie erfasst werden. Durch den wachsenden Einsatz KI-basierter Segmentierungen der Skelettmuskulatur kann zusätzlich der Zeitaufwand reduziert werden. Die Ergebnisse können dann ergänzend in den radiologischen Befund übernommen werden. Die Planung einer individuellen Therapie und die Verlaufsbeurteilung können in der Folge zur Verbesserung des Krankheitsverlaufs beitragen. Auch die Analyse von Radiomics-Daten der Skelettmuskulatur im Rahmen der Sarkopenie-Diagnostik wurde bei Patienten mit nicht kleinzelligem Bronchialkarzinom bereits untersucht [58, 84]. Zusammen mit den Techniken der Dual-Energy-CT und dem Photon-Counting-CT ergeben sich weitere Möglichkeiten für die Sarkopenie-Diagnostik.

Eine wesentliche Voraussetzung für allgemeingültige Aussagen zur Sarkopenie-Diagnostik in der klinischen Routine sind etablierte absolute Referenzwerte. Hierzu liegen bereits einige Studienergebnisse vor [23, 29–31]. Große Bevölkerungsstudien

können in diesem Zusammenhang einen Beitrag leisten, wie zum Beispiel die UK-Biobank-Studie oder die NAKO-Studie [85, 86]. So wurden im Rahmen der NAKO-Studie Ganzkörper-MRT-Untersuchungen von insgesamt etwa 30 000. Teilnehmern angefertigt, die zur Etablierung von Referenzwerten oder der Analyse der MR-Radiomics herangezogen werden können.

Es wird sicherlich nicht mehr lange dauern, bis die Sarkopenie-Diagnostik als feste Größe im therapeutischen Entscheidungsbaum zumindest bei Tumorpatienten etabliert ist. In der Zukunft wird möglicherweise nicht nur das Screening für das Vorliegen einer Sarkopenie einen höheren Stellenwert einnehmen, sondern auch die frühe Erfassung von Risikofaktoren. Bestimmte Radiomics-Auswertungen könnten hierbei insbesondere bei Tumorpatienten zum Beispiel als potenzielle Biomarker fungieren.

KERNAUSSAGEN

- Die Sarkopenie ist ein primär alterabhängiges Syndrom, welches sich verstärkt bei Patienten mit malignen Tumorerkrankungen manifestieren kann.
- Durch die Früherkennung und eine individuelle Therapie lassen sich negative Effekte auf den Krankheitsverlauf bei Tumorpatienten verhindern.
- Bei der radiologischen Diagnostik bietet sich die Computertomografie (CT) an mit dem Vorteil, zusätzliche Parameter zur Sarkopenie zu erfassen (opportunistische Verwendung).
- Für den flächendeckenden Einsatz bedarf es noch allgemeingültiger und etablierter Referenzwerte.
- Mittels künstlicher Intelligenz (KI) können die Daten schnell ausgewertet und in den radiologischen Befund implementiert werden.
- Die Analyse der Radiomics, die Dual-Energy-CT oder das Photon-Counting-CT bieten weitere Möglichkeiten bei der Sarkopenie-Diagnostik.

Interessenkonflikt

Die Autorinnen/Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- [1] Bauer JM, Wirth R, Volkert D et al. Malnutrition, sarcopenia and cachexia in the elderly: from pathophysiology to treatment. Conclusions of an international meeting of experts, sponsored by the BANSS Foundation. *Dtsch Med Wochenschr* 2008; 133: 305–310. doi:10.1055/s-2008-1046711
- [2] Rezende IFB, Conceição-Machado MEP, Souza VS et al. Sarcopenia in children and adolescents with chronic liver disease. *J Pediatr (Rio J)* 2020; 96: 439–446. doi:10.1016/j.jped.2019.02.005
- [3] Ritz A, Kolorz J, Hubertus J et al. Sarcopenia is a prognostic outcome marker in children with high-risk hepatoblastoma. *Pediatr Blood Cancer* 2021; 68: e28862. doi:10.1002/psc.28862

- [4] Triarico S, Rinninella E, Mele MC et al. Prognostic impact of sarcopenia in children with cancer: a focus on the psoas muscle area (PMA) imaging in the clinical practice. *Eur J Clin Nutr* 2022; 76: 783–788. doi:10.1038/s41430-021-01016-y
- [5] Berger MJ, Doherty TJ. Sarcopenia: prevalence, mechanisms, and functional consequences. *Interdiscip Top Gerontol* 2010; 37: 94–114. doi:10.1159/000319997
- [6] Morley JE, Anker SD, von Haehling S. Prevalence, incidence, and clinical impact of sarcopenia: facts, numbers, and epidemiology-update 2014. *J Cachexia Sarcopenia Muscle* 2014; 5: 253–259. doi:10.1007/s13539-014-0161-y
- [7] Kim M, Won CW. Sarcopenia in Korean Community-Dwelling Adults Aged 70 Years and Older: Application of Screening and Diagnostic Tools From the Asian Working Group for Sarcopenia 2019 Update. *J Am Med Dir Assoc* 2020; 21: 752–758. doi:10.1016/j.jamda.2020.03.018
- [8] Kang S, Oh TJ, Cho BL et al. Sex differences in sarcopenia and frailty among community-dwelling Korean older adults with diabetes: The Korean Frailty and Aging Cohort Study. *J Diabetes Investig* 2021; 12: 155–164. doi:10.1111/jdi.13348
- [9] Pickhardt PJ, Perez AA, Garrett JW et al. Fully Automated Deep Learning Tool for Sarcopenia Assessment on CT: L1 Versus L3 Vertebral Level Muscle Measurements for Opportunistic Prediction of Adverse Clinical Outcomes. *Am J Roentgenol* 2022; 218: 124–131. doi:10.2214/ajr.21.26486
- [10] Petermann-Rocha F, Ferguson LD, Gray SR et al. Association of sarcopenia with incident osteoporosis: a prospective study of 168,682 UK biobank participants. *J Cachexia Sarcopenia Muscle* 2021; 12: 1179–1188. doi:10.1002/jcsm.12757
- [11] Soh Y, Won CW. Sex differences in impact of sarcopenia on falls in community-dwelling Korean older adults. *BMC Geriatr* 2021; 21: 716. doi:10.1186/s12877-021-02688-8
- [12] Russo CR, Ricca M, Ferrucci L. True osteoporosis and frailty-related osteopenia: two different clinical entities. *J Am Geriatr Soc* 2000; 48: 1738–1739. doi:10.1111/j.1532-5415.2000.tb03895.x
- [13] Batsis JA, Villareal DT. Sarcopenic obesity in older adults: aetiology, epidemiology and treatment strategies. *Nat Rev Endocrinol* 2018; 14: 513–537. doi:10.1038/s41574-018-0062-9
- [14] Zembura M, Matusik P. Sarcopenic Obesity in Children and Adolescents: A Systematic Review. *Front Endocrinol (Lausanne)* 2022; 13: 914740. doi:10.3389/fendo.2022.914740
- [15] Fearon K, Strasser F, Anker SD et al. Definition and classification of cancer cachexia: an international consensus. *Lancet Oncol* 2011; 12: 489–495. doi:10.1016/s1470-2045(10)70218-7
- [16] Muscaritoli M, Anker SD, Argilés J et al. Consensus definition of sarcopenia, cachexia and pre-cachexia: joint document elaborated by Special Interest Groups (SIG) “cachexia-anorexia in chronic wasting diseases” and “nutrition in geriatrics”. *Clin Nutr* 2010; 29: 154–159. doi:10.1016/j.clnu.2009.12.004
- [17] Cruz-Jentoft AJ, Bahat G, Bauer J et al. Sarcopenia: revised European consensus on definition and diagnosis. *Age Ageing* 2019; 48: 16–31. doi:10.1093/ageing/afy169
- [18] Ali AM, Kunugi H. Screening for Sarcopenia (Physical Frailty) in the COVID-19 Era. *Int J Endocrinol* 2021; 2021: 5563960. doi:10.1155/2021/5563960
- [19] Gensous N, Bacalini MG, Franceschi C et al. Age-Related DNA Methylation Changes: Potenzial Impact on Skeletal Muscle Aging in Humans. *Front Physiol* 2019; 10: 996. doi:10.3389/fphys.2019.00996
- [20] Cruz-Jentoft AJ, Baeyens JP, Bauer JM et al. Sarcopenia: European consensus on definition and diagnosis: Report of the European Working Group on Sarcopenia in Older People. *Age Ageing* 2010; 39: 412–423. doi:10.1093/ageing/afq034
- [21] Giraudo C, Cavaliere A, Lupi A et al. Established paths and new avenues: a review of the main radiological techniques for investigating sarcopenia. *Quant Imaging Med Surg* 2020; 10: 1602–1613. doi:10.21037/qims.2019.12.15
- [22] Sergi G, Trevisan C, Veronese N et al. Imaging of sarcopenia. *Eur J Radiol* 2016; 85: 1519–1524. doi:10.1016/j.ejrad.2016.04.009
- [23] Amini B, Boyle SP, Boutin RD et al. Approaches to Assessment of Muscle Mass and Myosteatosis on Computed Tomography: A Systematic Review. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2019; 74: 1671–1678. doi:10.1093/gerona/glz034
- [24] Goodpaster BH, Kelley DE, Wing RR et al. Effects of weight loss on regional fat distribution and insulin sensitivity in obesity. *Diabetes* 1999; 48: 839–847. doi:10.2337/diabetes.48.4.839
- [25] Mitsiopoulos N, Baumgartner RN, Heymsfield SB et al. Cadaver validation of skeletal muscle measurement by magnetic resonance imaging and computerized tomography. *J Appl Physiol (1985)* 1998; 85: 115–122. doi:10.1152/jappl.1998.85.1.115
- [26] Derstine BA, Holcombe SA, Goulson RL et al. Quantifying Sarcopenia Reference Values Using Lumbar and Thoracic Muscle Areas in a Healthy Population. *J Nutr Health Aging* 2017; 21: 180–185. doi:10.1007/s12603-017-0983-3
- [27] Blauwhoff-Buskermolen S, Versteeg KS, de van derSchueren MA et al. Loss of Muscle Mass During Chemotherapy Is Predictive for Poor Survival of Patients With Metastatic Colorectal Cancer. *J Clin Oncol* 2016; 34: 1339–1344. doi:10.1200/jco.2015.63.6043
- [28] Cespedes Feliciano EM, Avrutin E, Caan BJ et al. Screening for low muscularity in colorectal cancer patients: a valid, clinic-friendly approach that predicts mortality. *J Cachexia Sarcopenia Muscle* 2018; 9: 898–908. doi:10.1002/jcsm.12317
- [29] Prado CM, Lieffers JR, McCargar LJ et al. Prevalence and clinical implications of sarcopenic obesity in patients with solid tumours of the respiratory and gastrointestinal tracts: a population-based study. *Lancet Oncol* 2008; 9: 629–635. doi:10.1016/s1470-2045(08)70153-0
- [30] Martin L, Birdsall L, Macdonald N et al. Cancer cachexia in the age of obesity: skeletal muscle depletion is a powerful prognostic factor, independent of body mass index. *J Clin Oncol* 2013; 31: 1539–1547. doi:10.1200/jco.2012.45.2722
- [31] Lurz E, Patel H, Lebovic G et al. Paediatric reference values for total psoas muscle area. *J Cachexia Sarcopenia Muscle* 2020; 11: 405–414. doi:10.1002/jcsm.12514
- [32] Derstine BA, Holcombe SA, Ross BE et al. Skeletal muscle cutoff values for sarcopenia diagnosis using T10 to L5 measurements in a healthy US population. *Sci Rep* 2018; 8: 11369. doi:10.1038/s41598-018-29825-5
- [33] Paris MT. Body Composition Analysis of Computed Tomography Scans in Clinical Populations: The Role of Deep Learning. *Lifestyle Genom* 2020; 13: 28–31. doi:10.1159/000503996
- [34] Strahlenschutzkommission (SSK), Strahlenhygienische Aspekte bei Röntgenuntersuchungen zur Bestimmung der Körperzusammensetzung (insbesondere Knochendichtemessungen) mittels Dual X-ray Absorptiometry (DXA) Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2015/DXA.pdf?__blob=publicationFile Zugegriffen: 04.08.2022
- [35] Strahlenschutzkommission (SSK), Orientierungshilfe für bildgebende Verfahren 3., überarbeitete Auflage; Empfehlung der Strahlenschutzkommission Verabschiedet in der 300. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 27. Juni 2019, https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2019/2019-06-27Orientie.pdf?__blob=publicationFile Zugegriffen: 04.08.2022
- [36] Messina C, Maffi G, Vitale JA et al. Diagnostic imaging of osteoporosis and sarcopenia: a narrative review. *Quant Imaging Med Surg* 2018; 8: 86–99. doi:10.21037/qims.2018.01.01

- [37] Pons C, Borotikar B, Garetier M et al. Quantifying skeletal muscle volume and shape in humans using MRI: A systematic review of validity and reliability. *PLoS One* 2018; 13: e0207847. doi:10.1371/journal.pone.0207847
- [38] Kallman DA, Plato CC, Tobin JD. The role of muscle loss in the age-related decline of grip strength: cross-sectional and longitudinal perspectives. *J Gerontol* 1990; 45: M82–M88. doi:10.1093/geronj/45.3.m82
- [39] Marcus RL, Addison O, Dibble LE et al. Intramuscular adipose tissue, sarcopenia, and mobility function in older individuals. *J Aging Res* 2012; 2012: 629637. doi:10.1155/2012/629637
- [40] Tuttle LJ, Sinacore DR, Mueller MJ. Intermuscular adipose tissue is muscle specific and associated with poor functional performance. *J Aging Res* 2012; 2012: 172957. doi:10.1155/2012/172957
- [41] Dixon WT. Simple proton spectroscopic imaging. *Radiology* 1984; 153: 189–194. doi:10.1148/radiology.153.1.6089263
- [42] Reeder SB. Emerging quantitative magnetic resonance imaging biomarkers of hepatic steatosis. *Hepatology* 2013; 58: 1877–1880. doi:10.1002/hep.26543
- [43] Reeder SB, Cruite I, Hamilton G et al. Quantitative Assessment of Liver Fat with Magnetic Resonance Imaging and Spectroscopy. *J Magn Reson Imaging* 2011; 34: 729–749. doi:10.1002/jmri.22775
- [44] Grimm A, Meyer H, Nickel MD et al. Repeatability of Dixon magnetic resonance imaging and magnetic resonance spectroscopy for quantitative muscle fat assessments in the thigh. *J Cachexia Sarcopenia Muscle* 2018; 9: 1093–1100. doi:10.1002/jcsm.12343
- [45] Grimm A, Meyer H, Nickel MD et al. A Comparison between 6-point Dixon MRI and MR Spectroscopy to Quantify Muscle Fat in the Thigh of Subjects with Sarcopenia. *J Frailty Aging* 2019; 8: 21–26. doi:10.14283/jfa.2018.16
- [46] Backens M. Technique of proton and phosphorous MR spectroscopy. *Radiologe* 2017; 57: 428–437. doi:10.1007/s00117-017-0240-0
- [47] Lanza IR, Bhagra S, Nair KS et al. Measurement of human skeletal muscle oxidative capacity by 31P-MR spectroscopy: a cross-validation with in vitro measurements. *J Magn Reson Imaging* 2011; 34: 1143–1150. doi:10.1002/jmri.22733
- [48] Schocke M, Esterhammer R, Greiner A. High-energy phosphate metabolism in the exercising muscle of patients with peripheral arterial disease. *Vasa* 2008; 37: 199–210. doi:10.1024/0301-1526.37.3.199
- [49] Phielix E, Mensink M. Type 2 diabetes mellitus and skeletal muscle metabolic function. *Physiol Behav* 2008; 94: 252–258. doi:10.1016/j.physbeh.2008.01.020
- [50] Ripley EM, Clarke GD, Hamidi V et al. Reduced skeletal muscle phosphocreatine concentration in type 2 diabetic patients: a quantitative image-based phosphorus-31 MR spectroscopy study. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2018; 315: E229–E239. doi:10.1152/ajpendo.00426.2017
- [51] Khan AI, Reiter DA, Sekhar A et al. MRI quantitation of abdominal skeletal muscle correlates with CT-based analysis: implications for sarcopenia measurement. *Appl Physiol Nutr Metab* 2019; 44: 814–819. doi:10.1139/apnm-2018-0473
- [52] Perkisas S, Baudry S, Bauer J et al. The SARCUS project: evidence-based muscle assessment through ultrasound. *Eur Geriatr Med* 2019; 10: 157–158. doi:10.1007/s41999-018-0141-4
- [53] Ticinesi A, Nouvenne A, Folesani G et al. An investigation of multimorbidity measures as risk factors for pneumonia in elderly frail patients admitted to hospital. *Eur J Intern Med* 2016; 28: 102–106. doi:10.1016/j.ejim.2015.11.021
- [54] Faron A, Opheys NS, Nowak S et al. Deep Learning-Based Body Composition Analysis Predicts Outcome in Melanoma Patients Treated with Immune Checkpoint Inhibitors. *Diagnostics (Basel)* 2021; 11. doi:10.3390/diagnostics1122314
- [55] Faron A, Sprinkart AM, Kuetting DLR et al. Body composition analysis using CT and MRI: intra-individual intermodal comparison of muscle mass and myosteatosis. *Sci Rep* 2020; 10: 11765. doi:10.1038/s41598-020-68797-3
- [56] Nowak S, Faron A, Luetkens JA et al. Fully Automated Segmentation of Connective Tissue Compartments for CT-Based Body Composition Analysis: A Deep Learning Approach. *Invest Radiol* 2020; 55: 357–366. doi:10.1097/rli.0000000000000647
- [57] Nowak S, Theis M, Wichtmann BD et al. End-to-end automated body composition analyses with integrated quality control for opportunistic assessment of sarcopenia in CT. *Eur Radiol* 2021. doi:10.1007/s00330-021-08313-x
- [58] Kim YJ. Machine Learning Models for Sarcopenia Identification Based on Radiomic Features of Muscles in Computed Tomography. *Int J Environ Res Public Health* 2021; 18. doi:10.3390/ijerph18168710
- [59] Suetta C, Haddock B, Alcazar J et al. The Copenhagen Sarcopenia Study: lean mass, strength, power, and physical function in a Danish cohort aged 20–93 years. *J Cachexia Sarcopenia Muscle* 2019; 10: 1316–1329. doi:10.1002/jcsm.12477
- [60] Gould H, Brennan SL, Kotowicz MA et al. Total and appendicular lean mass reference ranges for Australian men and women: the Geelong osteoporosis study. *Calcif Tissue Int* 2014; 94: 363–372. doi:10.1007/s00223-013-9830-7
- [61] Simonsen C, Kristensen TS, Sundberg A et al. Assessment of sarcopenia in patients with upper gastrointestinal tumors: Prevalence and agreement between computed tomography and dual-energy x-ray absorptiometry. *Clin Nutr* 2021; 40: 2809–2816. doi:10.1016/j.clnu.2021.03.022
- [62] McGovern J, Dolan RD, Horgan PG et al. Computed tomography-defined low skeletal muscle index and density in cancer patients: observations from a systematic review. *J Cachexia Sarcopenia Muscle* 2021; 12: 1408–1417. doi:10.1002/jcsm.12831
- [63] Shachar SS, Williams GR, Muss HB et al. Prognostic value of sarcopenia in adults with solid tumours: A meta-analysis and systematic review. *Eur J Cancer* 2016; 57: 58–67. doi:10.1016/j.ejca.2015.12.030
- [64] Aleixo GFP, Shachar SS, Nyrop KA et al. Myosteatosis and prognosis in cancer: Systematic review and meta-analysis. *Crit Rev Oncol Hematol* 2020; 145: 102839. doi:10.1016/j.critrevonc.2019.102839
- [65] Kim IH, Choi MH, Lee IS et al. Clinical significance of skeletal muscle density and sarcopenia in patients with pancreatic cancer undergoing first-line chemotherapy: a retrospective observational study. *BMC Cancer* 2021; 21: 77. doi:10.1186/s12885-020-07753-w
- [66] Budui SL, Rossi AP, Zamboni M. The pathogenetic bases of sarcopenia. *Clin Cases Miner Bone Metab* 2015; 12: 22–26. doi:10.11138/ccmbm/2015.12.1.022
- [67] Jo E, Lee SR, Park BS et al. Potential mechanisms underlying the role of chronic inflammation in age-related muscle wasting. *Aging Clin Exp Res* 2012; 24: 412–422. doi:10.3275/8464
- [68] An HJ, Tizaoui K, Terrazzino S et al. Sarcopenia in Autoimmune and Rheumatic Diseases: A Comprehensive Review. *Int J Mol Sci* 2020; 21. doi:10.3390/ijms21165678
- [69] Modesto AE, Stuart CE, Cho J et al. Psoas muscle size as a magnetic resonance imaging biomarker of progression of pancreatitis. *Eur Radiol* 2020; 30: 2902–2911. doi:10.1007/s00330-019-06633-7
- [70] van Grinsven J, van Vugt JLA, Gharbharan A et al. The Association of Computed Tomography-Assessed Body Composition with Mortality in Patients with Necrotizing Pancreatitis. *J Gastrointest Surg* 2017; 21: 1000–1008. doi:10.1007/s11605-016-3352-3
- [71] Gualtieri P, Falcone C, Romano L et al. Body Composition Findings by Computed Tomography in SARS-CoV-2 Patients: Increased Risk of Muscle Wasting in Obesity. *Int J Mol Sci* 2020; 21. doi:10.3390/ijms21134670
- [72] Ufuk F, Demirci M, Sagtas E et al. The prognostic value of pneumonia severity score and pectoralis muscle Area on chest CT in adult COVID-19 patients. *Eur J Radiol* 2020; 131: 109271. doi:10.1016/j.ejrad.2020.109271

- [73] Jang M, Park HW, Huh J et al. Predictive value of sarcopenia and visceral obesity for postoperative pancreatic fistula after pancreaticoduodenectomy analyzed on clinically acquired CT and MRI. *Eur Radiol* 2019; 29: 2417–2425. doi:10.1007/s00330-018-5790-7
- [74] Tee YS, Cheng CT, Wu YT et al. The psoas muscle index distribution and influence of outcomes in an Asian adult trauma population: an alternative indicator for sarcopenia of acute diseases. *Eur J Trauma Emerg Surg* 2021; 47: 1787–1795. doi:10.1007/s00068-020-01360-x
- [75] Zumsteg DM, Chu CE, Midwinter MJ. Radiographic assessment of sarcopenia in the trauma setting: a systematic review. *Trauma Surg Acute Care Open* 2020; 5: e000414. doi:10.1136/tsaco-2019-000414
- [76] Volpi E, Kobayashi H, Sheffield-Moore M et al. Essential amino acids are primarily responsible for the amino acid stimulation of muscle protein anabolism in healthy elderly adults. *Am J Clin Nutr* 2003; 78: 250–258. doi:10.1093/ajcn/78.2.250
- [77] Anthony JC, Anthony TG, Kimball SR et al. Signaling pathways involved in translational control of protein synthesis in skeletal muscle by leucine. *J Nutr* 2001; 131: 856s–860s. doi:10.1093/jn/131.3.856S
- [78] Moro T, Brightwell CR, Deer RR et al. Muscle Protein Anabolic Resistance to Essential Amino Acids Does Not Occur in Healthy Older Adults Before or After Resistance Exercise Training. *J Nutr* 2018; 148: 900–909. doi:10.1093/jn/nxy064
- [79] Deutz NE, Bauer JM, Barazzoni R et al. Protein intake and exercise for optimal muscle function with aging: recommendations from the ESPEN Expert Group. *Clin Nutr* 2014; 33: 929–936. doi:10.1016/j.clnu.2014.04.007
- [80] Lichtenberg T, von Stengel S, Sieber C et al. The Favorable Effects of a High-Intensity Resistance Training on Sarcopenia in Older Community-Dwelling Men with Osteosarcopenia: The Randomized Controlled FrOST Study. *Clin Interv Aging* 2019; 14: 2173–2186. doi:10.2147/cia.S225618
- [81] Landi F, Liperoti R, Russo A et al. Sarcopenia as a risk factor for falls in elderly individuals: results from the iSIRENTE study. *Clin Nutr* 2012; 31: 652–658. doi:10.1016/j.clnu.2012.02.007
- [82] Paddon-Jones D, Campbell WW, Jacques PF et al. Protein and healthy aging. *Am J Clin Nutr* 2015; 101: 1339s–1345s. doi:10.3945/ajcn.114.084061
- [83] Breen L, Phillips SM. Skeletal muscle protein metabolism in the elderly: Interventions to counteract the “anabolic resistance” of ageing. *Nutr Metab (Lond)* 2011; 8: 68. doi:10.1186/1743-7075-8-68
- [84] Dong X, Dan X, Yawen A et al. Identifying sarcopenia in advanced non-small cell lung cancer patients using skeletal muscle CT radiomics and machine learning. *Thorac Cancer* 2020; 11: 2650–2659. doi:10.1111/1759-7714.13598
- [85] Schlett CL, Hendel T, Weckbach S et al. Population-Based Imaging and Radiomics: Rationale and Perspective of the German National Cohort MRI Study. *Rofo* 2016; 188: 652–661. doi:10.1055/s-0042-104510
- [86] Petersen SE, Matthews PM, Bamberg F et al. Imaging in population science: cardiovascular magnetic resonance in 100,000 participants of UK Biobank – rationale, challenges and approaches. *J Cardiovasc Magn Reson* 2013; 15: 46. doi:10.1186/1532-429x-15-46