

## **Die Diagnostik histomorphologischer Veränderungen bei Muskelatrophie und Sarkopenie.**

Schedler, Olaf<sup>1</sup>; Mejzlik, Zdenek; Pobijak, Michal; Adamaszek, Michael; Laube, Wolfgang

<sup>1</sup> Institut für Höhen- und Überdruckmedizin, Fürstenwalder Chaussee 27H, 15526 Bad Saarow, extremmedizin@me.com

### **Abstract:**

Sarkopenie bezeichnet den alters- oder krankheitsbedingten Verlust von Muskelmasse, Muskelkraft und Muskelfunktion. Die morphologischen Veränderungen zeigen sich in einer Abnahme der Muskelmasse (CruzJentoft 2019), einer Reduktion der Muskelfaserzahl (Lexell 1988) sowie einer Myosteatose (Goodpaster 2001). Histologische Veränderungen der Sarkopenie sind die Atrophie der Muskel-Typ-II-Fasern (Lexell 1988), der Verlust von Satellitenzellen (Verdijk 2007) sowie die vermehrte Kollageneinlagerung (Narici & Maffulli 2010). Als pathophysiologische Ursache der Sarkopenie wird eine vaskuläre Einschränkung der Kapillarisation diskutiert (Kellum 2020).

Die Muskelelastographie misst zur Detektion sarkopenischer Veränderungen, die mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit/Elastizität) von Geweben. Sarkopenische Muskeln weisen als Folge einer reduzierten Muskelmasse eine Abnahme der Steifigkeit auf (Eby 2015). Durch Fibrosierung und Fettinfiltration entstehen Areale mit unterschiedlicher Steifigkeit (Akagi 2015).

Wir untersuchten 9 Patienten mit einer Muskelatrophie bei einer Critical illness Polyneuromyopathie (CIPM) sowie 9 Patienten mit einer Muskelatrophie bei einer Querschnittlähmung (QS) mittels Muskelelastographie (SWE, STE, STQ) mit je 24 Messungen. Als Vergleichsgruppe wurden 9 muskelgesunde Probanden, untersucht. Im Ergebnis lag der Body Mass Index (BMI) in der Probandengruppe bei 23,1, in der CIPM-Gruppe bei 19,0 und der QS Gruppe bei 17,5, als Hinweis auf eine Abnahme der Muskelmasse. In den Untersuchungsgruppen unterschieden sich die Werte der Elastographie in den Parametern (Cs, E, G) zwischen der Probandengruppe und der QS-Gruppe (E=16,9 kPa vs 11,93 kPa) signifikant. In der CIPM-Gruppe (E=14,3 kPa) zeigten sich im Vergleich zur Probandengruppe (E=16,9 kPa) als auch zur QS-Gruppe (E=11,9 kPa) signifikante Unterschiede. Zur Referenzmuskelgruppe gab es zwischen den Untersuchungsgruppen in der Shear wave propagation velocity keine signifikanten Unterschiede.

Unsere Ergebnisse weisen auf klare Vorteile der Muskelelastographie im klinischen Kontext hin. Mit der schnellen Echtzeitdiagnostik sind die Ergebnisse sofort verfügbar und stellen quantitative Messungen durch die exakten Werte der Gewebesteifigkeit dar. Die Elastographie

kann somit als ergänzendes Verfahren zur Diagnostik der Muskelmasse und zur Früherkennung von Sarkopenie eingesetzt werden.

Abstract: Sarcopenia refers to the age- or disease-related loss of muscle mass, muscle strength, and muscle function. The morphological changes are manifested by a decrease in muscle mass (Cruz-Jentoft 2019), a reduction in muscle fiber count (Lexell 1988), and myosteatosis (Goodpaster 2001). Histological changes in sarcopenia include atrophy of type II muscle fibers (Lexell 1988), the loss of satellite cells (Verdijk 2007), and increased collagen deposition (Narici & Maffulli 2010). A vascular restriction of capillaryization is discussed as a pathophysiological cause of sarcopenia (Kellum 2020).

Muscle elastography measures the mechanical properties (stiffness/elasticity) of tissues to detect sarcopenic changes. Sarcopenic muscles exhibit a decrease in stiffness as a result of reduced muscle mass (Eby 2015). Fibrosis and fatty infiltration result in areas of varying stiffness (Akagi 2015).

We examined nine patients with muscle atrophy due to critical illness polyneuromyopathy (CIPM) and nine patients with muscle atrophy due to spinal cord injury (SCI) using muscle elastography (SWE, STE, STQ) with 24 measurements each. Nine subjects with normal muscle function were examined as a comparison group. The body mass index (BMI) was 23.1 in the control group, 19.0 in the CIPM group, and 17.5 in the SCI group, indicating a decrease in muscle mass. In the study groups, the elastography values for the parameters (Cs, E, G) differed significantly between the volunteer group and the QS group (E=16.9 kPa vs. 11.93 kPa). Significant differences were observed in the CIPM group (E=14.3 kPa) compared to both the volunteer group (E=16.9 kPa) and the QS group (E=11.9 kPa). Compared to the reference muscle group, there were no significant differences in shear wave propagation velocity between the study groups.

Our results indicate clear advantages of muscle elastography in a clinical context. With rapid, real-time diagnostics, the results are immediately available and represent quantitative measurements through precise tissue stiffness values. Elastography can therefore be used as a complementary method for diagnosing muscle mass and for the early detection of sarcopenia.

### **Einleitung:**

Sarkopenie bezeichnet den alters- oder krankheitsbedingten Verlust von Muskelmasse, Muskelkraft und Muskelfunktion. Die wichtigsten morphologischen Veränderungen sind die Abnahme der Muskelmasse, die Reduktion der Muskelfaserzahl sowie die Zunahme des intramuskulären Fettgewebes. Histomorphologisch finden sich keine zellulären Defekte.

Muskelatrophie geht mit einer verminderten Muskelmasse und häufig auch mit einer veränderten Muskelsteifigkeit einher. Studien zeigen, dass eine abnehmende Muskelmasse (quantifiziert z. B. durch MRT, CT oder Dual-Energy-X-Ray-Absorptiometrie [DXA]) mit einer Reduktion der Muskelsteifigkeit korreliert (Eby 2015). Die morphologischen Veränderungen zeigen sich in Detail in einer Abnahme der Muskelmasse, wobei das Gesamtvolumen und die Querschnittsfläche der Skelettmuskulatur abnehmen kann (CruzJentoft 2019). Darüber hinaus kommt es bei der Muskelatrophie zur Reduktion der Muskelfaserzahl. Besonders davon betroffen sind der Muskelfasertyp-II und damit der schnell kontrahierenden Fasern (Lexell 1988). Dies wird histologisch (Muskelbiopsie) oder indirekt durch bildgebende Verfahren (z. B. MRT-Querschnittsfläche) erfasst. Untersuchungen zeigen, dass eine reduzierte Muskelfaserzahl mit einer Abnahme der Muskelmasse und einer Zunahme von Binde- und Fettgewebe einhergeht, was sich in veränderten Elastizitätswerten widerspiegelt (Eby 2015, Berko 2022). Die Zunahme des intramuskulären Fettgewebes wird als Myosteatose bezeichnet, welche durch Fett- und Bindegewebseinlagerungen in die Muskulatur gekennzeichnet wird (Goodpaster 2001). Eine Myosteatose nimmt bei Sarkopenie, Alterung und metabolischen Erkrankungen zu, was wiederum in einer Abnahme in der Muskelqualität und -funktion resultiert (Berko 2022, Akagi 2015). Die Zunahme von Fett im Muskel kann durch bildgebende Verfahren wie MRT, CT und Ultraschall (Echogenität) erfasst werden (Chen 2019). Fettgewebe weist im Vergleich zum Muskelgewebe einen geringeren Steifigkeitsgrad auf, was wiederum eine Zunahme des intramuskulären Fetts die Elastizitätswerte des Muskels folgert (Alfuraih 2019).

Histologische Veränderungen der Sarkopenie sind die Atrophie der Muskel-Typ-II-Fasern, der Verlust von Satellitenzellen sowie die vermehrte Fibrosierung. Typ-II-Muskelfasern (fast-twitch) sind besonders anfällig für Sarkopenie, insbesondere bei Inaktivität. Eine Atrophie dieser Muskelfasern führt zu einer Verringerung des Muskelvolumens, der Kraft und zu strukturellen Veränderungen im Muskel (Lexell 1988). Studien konnten eine Korrelation der Elastizitätswerte mit dem Anteil und der Größe der Typ-II-Fasern aufzeigen, was wiederum auf einen höheren Steifigkeitsgrad gegenüber Typ-I-Fasern schließen lässt (Akagi 2015, Eby 2015, Lexell 1988). Bei der veränderten Muskelfaserzusammensetzung kommt es schließlich zur Verschiebung zu einem höheren Anteil an Typ-I-Fasern (Lang 2010).

Satellitenzellen sind Muskelstammzellen, die für die Regenerationsfähigkeit und das Wachstum von Muskelfasern essentiell sind (Snijders 2015, Fry 2015). Ihr Verlust oder ihre Funktionsstörung trägt wesentlich zur Muskelatrophie bei (Verdijk 2007). Die Fibrosierung wiederum beschreibt eine Zunahme von Kollagen, wie sie bei chronischen Muskelerkrankungen (z. B. Muskeldystrophien, Myopathien), nach Verletzungen oder im Alter auftritt (Lacourpaille 2015, Brandenburg 2016, Narici & Maffulli 2010). Eine Muskelfibrose führt

folgerichtig zu einer Zunahme der Steifigkeit und einer Funktionsabnahme des Muskels (Berko 2022, Alfuraih 2019).

Als pathophysiologische Ursache der Sarkopenie wird die vaskuläre Einschränkung der Kapillarisation diskutiert und ist in der wissenschaftlichen Literatur gut dokumentiert (Kellum 2020). Studien haben gezeigt, dass eine reduzierte Kapillarisation und damit eine eingeschränkte mikrovaskuläre Versorgung zu einer verringerten Muskelmasse und -funktion führen können (Bennett 2016). Die Kapillaren versorgen das Muskelgewebe mit Nährstoffen, Sauerstoff und Wachstumsfaktoren und sind entscheidend für die Aufrechterhaltung der Muskelfunktion und die Reparatur nach Belastung. Bei einer vaskulären Einschränkung, wie sie zum Beispiel bei einer altersbedingten Veränderung der Mikrozirkulation auftritt, kommt es zu einer verminderten Kapillarisation mit negativen Auswirkungen auf die betroffene Muskulatur (Kaji 2018). Eine verminderte Kapillarisation führt durch Hypoxie und damit Abnahme der regionalen muskulären Sauerstoffversorgung, was insbesondere für den sauerstoffabhängigen Muskelstoffwechsel einschließlich der Proteinsynthese nach Belastung problematisch ist (Török 2019). Infolge der niedrigeren Kapillardichte verringert sich die Regenerationsfähigkeit des Muskels nach mechanischer Belastung, was wiederum in einer Abnahme der Muskelmasse resultiert. Die vaskuläre Einschränkung trägt auf verschiedene Weisen zur Entwicklung und zum Fortschreiten der Sarkopenie bei (Sanchez-Rodriguez 2015). Vaskuläre Veränderungen sind mit einer erhöhten Entzündung im Körper assoziiert, was wiederum zu einer verstärkten Freisetzung von proinflammatorischen Zytokinen wie Tumornekrosefaktor- $\alpha$  (TNF- $\alpha$ ) und Interleukin-6 führt, die den Muskelabbau fördern (Studer 2022).

Die Muskelelastographie ist eine spezielle Ultraschalltechnik, mit der die Elastizität (Steifigkeit) von Muskelgewebe gemessen und bildlich dargestellt werden kann. Die Muskelelastographie (insbesondere die Shear-Wave-Elastographie) misst die Steifigkeit des Gewebes, in Kilopascal (kPa) und in Meter pro Sekunde (m/s). Dabei spiegelt der Druck in kPa den direkten Wert für die Steifigkeit (Elastizitätsmodul) wieder, während die Geschwindigkeit der Scherwellen in m/s die Gewebestruktur reflektiert.

Es gibt grundsätzlich zwei Hauptmethoden der Elastographie. Die Strain-Elastographie und die Shear-Wave-Elastographie (SWE). Bei der Shear-Wave-Elastographie (SWE) werden Scherwellen erzeugt, in dem kurze, fokussierte Impulse in das Muskelgewebe gesendet werden. Diese Impulse erzeugen laterale Scherwellen (Querwellen) im Gewebe. Die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit erfolgt durch diese Scherwellen im Gewebe. Aus der Geschwindigkeit der Scherwellen berechnet das Gerät die Elastizitätsmoduli, deren Werte farblich kodiert und als Elastogramm dargestellt werden. Bei der Strain-Elastographie wird das Gewebe durch leichten Druck mit dem Schallkopf komprimiert. Die resultierende

Verformung (Strain) wird gemessen und in Relation zur aufgebrauchten Kraft gesetzt. Auch hier entsteht ein farbkodiertes Bild mit Darstellung der relativen Steifigkeit. Die Interpretation der Messwerte der Muskelelastographie erfolgt anhand der gemessenen Elastizitätswerte des Muskelgewebes. Die Werte sind abhängig vom untersuchten Muskel, der Lokalisation, dem Alter, Trainingszustand und eventuellen Pathologien.

Mit der vorliegenden Arbeit soll die Methode der Elastographie an ausgesuchten klinischen Patientengruppen einer spezifischen Muskelatrophie untersucht werden.

### **Material und Methoden:**

Wir untersuchten nach Information, Aufklärung und Einwilligung mittels einem Ultraschallgerät (Consona N9 mindray) mit einer Linearsonde 12 L-A (3-17 MHz) jeweils 9 Patienten im Rahmen einer Diagnostik zur Muskelatrophie infolge einer Critical illness Polyneuromyopathie (CIPM) und 9 Patienten mit einer Diagnostik zur Muskelatrophie infolge einer Querschnittlähmung (QS). Als Vergleichsgruppe wurden 9 Probanden ohne anamnestische und klinische Merkmale einer Muskelerkrankung eingeschlossen. Alle Teilnehmer wurden über den Hintergrund und Anlass der Untersuchungen informiert und deren Einverständniserklärung eingeholt (informed consent). Die Untersuchungen wurden in Rückenlage durchgeführt. Eine Spastik lag bei den QS-Patienten klinisch nicht vor. In den Untersuchungen wurden jeweils 3 US-Messverfahren zur Erfassung der Dehnung Elastizität, des Sound-touch-Elastographie (STE) und der Sound-Touch-Quantification (STQ) durchgeführt. Die Dehnung Elastographie entsprach der Shear-Wave-Elastographie (SWE), wobei E den elastischen Young's Modulus wiedergab. Für die Messungen wurden transversale und longitudinale Muskeluntersuchungen des M. rectus femoralis und des M. tibialis anterior an beiden Körperseiten durchgeführt. Als Referenzmuskel diente der M. abductor pollicis brevis.

### **Ergebnisse:**

Das Alter der Probandengruppe lag bei  $45,5 \pm 16,6$ . Das Alter der CIPM-Gruppe lag bei  $69,4 \pm 14,5$  und das Alter der QS-Gruppe bei  $51,7 \pm 23,1$  Jahren. Der BMI der Probandengruppe lag bei 23,1, der CIPM-Gruppe bei 19,0 und der QS Gruppe bei 17,5.

Es wurde in jeweils zwei Achsen gemessen, so dass pro Untersuchung an den unteren Extremitäten 24 Messungen durchgeführt wurden. Aus den 24 Einzelmessungen wurden die in der Tabelle 1 aufgezeigten Werte ermittelt. Zur messtechnischen Interpretation wurde der IQR (IQR *interquartile range* = Interquartilsabstand) als ein Kriterium zur Beurteilung der Qualität der Messergebnisse herangezogen. Gemäß den Qualitätskriterien wurden Messungen mit einem IQR-Wert  $\sim 30$  % des Median als valide anerkannt. Der IQR der gesamten Untersuchungsgruppe betrug  $5,49 \pm 2,3$  kPa und entsprach  $32,6 \pm 10,8$ %.



**Tabelle 1: Messergebnisse Elastographie (Comprehensive elasticity tools Cs, E, G)**

	E (kPa)				Cs (m/s)				G (kPa)			
	Median	IQR	Mean	STD	Median	IQR	Mean	STD	Median	IQR	Mean	STD
<b>Proband</b>	16,09	8,30	17,81	5,50	2,27	0,52	2,36	0,43	5,36	2,77	5,94	1,83
<b>CIP</b>	14,30	19,08	19,58	14,41	2,16	1,19	2,36	0,85	4,73	6,36	6,53	4,80
<b>QS</b>	11,93	6,17	14,31	4,66	1,99	0,48	2,14	0,34	3,98	2,06	4,77	1,55

E= Elastischer Young Modus; Cs=Shear wave propagation velocity; G= Shear modulus

In der Tabelle 1 finden sich die Messergebnisse, welche als STQ Gesamtstatistik, am Ende der 24 Muskeluntersuchungen der Muskelgruppe der unteren Extremität angegeben wurden. Bezogen auf die mathematische Relevanz wurden zur weiterführenden Analytik die Medianwerte verwendet.

**Tabelle 2: Statistische Testergebnisse aus den Medianwerten der Einzelmessungen**

<b>t-Test</b>	<b>E in kPa</b>	<b>Cs in m/s</b>	<b>G in kPa</b>
Proband vs QS	0,05*	0,03*	0,05*
Proband vs CIP	0,35	0,35	0,35
CIP vs QS	0,65	0,63	0,65

E= Elastischer Young Modus; Cs=Shear wave propagation velocity; G= Shear modulus

Die Messergebnisse wurden wegen der kleinen Stichproben mit unbekannter Varianz in der analytischen Auswertung mittels eines t-Tests ausgewertet. Die Tabelle 2 zeigt zwischen der Probandengruppe und der Gruppe der querschnittgelähmten Patientengruppe (QS) in den Elastischer Young Modus, der Shear wave propagation velocity und der Shear modulus signifikante Ergebnisse. Im Vergleich zwischen der Patientengruppe mit einer Critical illness Polyneuromyopathie (CIPM) zeigen sich zur Probanden- und zur QS-Gruppe keine signifikanten Unterschiede.

**Abbildung 7-10: Beispielbilder aus der Muskelelastographie von Proband und Patient (M. abduktor pollicis brevis)**



Abbildung 7: Strain Elastographie (Proband)



Abbildung 8: Strain Elastographie (Patient)

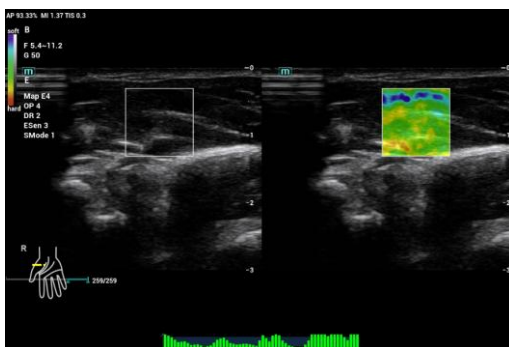


Abbildung 9: Strain Elastographie (Proband)

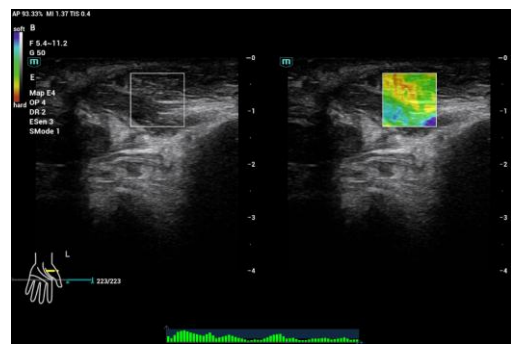


Abbildung 10: Strain Elastographie (Patient)

In der Übersicht der Bilder 7 bis 10 wurde der M. abductor pollicis brevis dargestellt, welche hinsichtlich seiner muskelelastographischen Messwerte keine signifikanten Unterschiede im Median der Shear wave propagation velocity (Cs) zeigten. Auffällig war, dass sich der Interquartilsabstand (IQR) und der Wert der Standardabweichungen (STD) signifikant unterschieden, was auf eine größere Variabilität der Muskelgruppe in der Probandengruppe hinweisen könnte. Die Ergebnisse werden in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle3: Statistische Auswertung für die Referenzmuskulatur (M. abduktor pollicis brevis)**

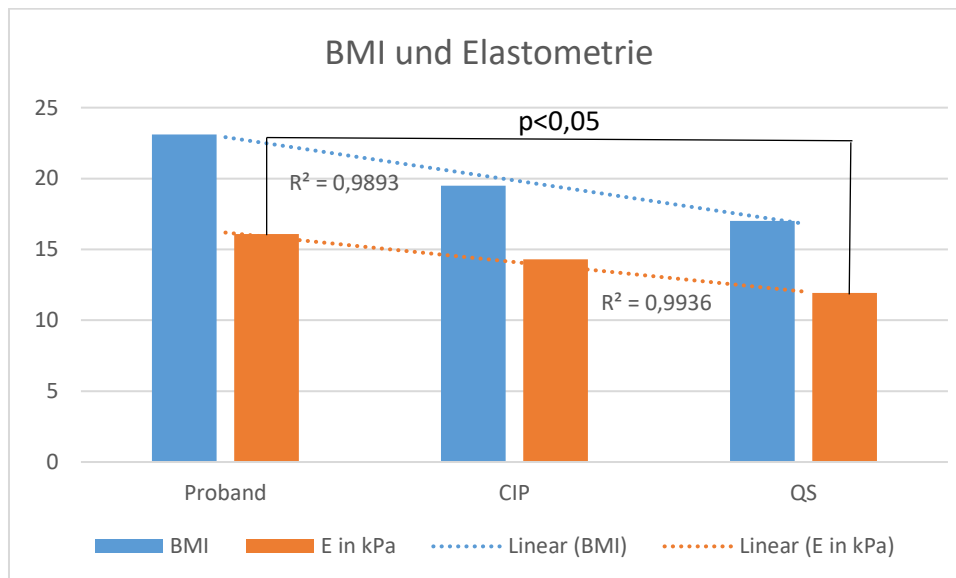
Cs in m/s	Median	IQR	STD
Proband	3,43	0,27	0,22
Patienten	3,33	0,14	0,12
t-Test	0,908	0,034*	0,036*

Cs in m/s= Shear wave propagation velocity

Bezogen auf die Muskelmasse gilt die bioelektrische Impedanz Messung (BIA) als Referenzmethode. Der Body mass index (BMI) stellt insgesamt keinen verlässlichen Indikator

für die Korrelation zwischen Muskelmasse und Körpermasse dar, weswegen wir in Abbildung 12 den in unserer Beobachtung analysierten Zusammenhang darstellen.

### **Abbildung 11: Zusammenhang zwischen Body Mass Index (BMI) und Elastographie (SWE)**



In Abbildung 11 wird eine lineare Korrelation zwischen den mittels Muskelelastographie gemessenen Steifigkeitswerten (E) und der Körpergröße und -masse (Pearson=0,98;  $R^2 = 0,97$ ) dargestellt.

### **Diskussion:**

Typische Referenzwerte für eine gesunde Skelettmuskulatur (M. biceps brachii, M. vastus lateralis, M. gastrocnemius, M. tibialis anterior, M. trapezius) liegen in der Literatur im entspannten Zustand bei 10–25 kPa. Im kontrahierten Zustand steigt der Elastizitätswert auf bis zu 80 - 100 kPa oder mehr an (Eby 2013, Lacourpaille 2012, Alfuraih 2019). In einer Untersuchung wurden Werte von 20 - 40 kPa als typisch für die gesunde Muskulatur ermittelt (Gilbert 2017, Silva 2015). In allen Studien wurde die Shear-Wave Elastography (SWE) verwendet. Mit unseren Untersuchungswerten für die Muskelelastographie konnten die Referenzwerte bestätigt werden (E=12-16 kPa, Cs=2-2,3 m/s, G=4-5,4 kPa). Im unteren Referenzbereich fanden sich die Werte für die querschnittgelähmten Patienten, die der Probandengruppe im oberen Normwertbereich. Elastizitätswerte außerhalb des Referenzwertbereiches fanden wir nicht.

Erste Hinweise auf eine Muskelatrophie können aus einer Muskelmassenmessung oder im Vergleich zur Elastographie aus dem BMI abgeleitet werden. In unseren Untersuchungsgruppen war der BMI in den Patientengruppen (19,5/17,0) geringer als zur

Probandengruppe (23,1), was auf eine Reduktion der Muskelmasse, bezogen auf die Körpermasse, hinweisen kann. Es gab keine direkte, quantitative Korrelation zwischen Muskelelastographie und der exakten Muskelfaserzahl, da die Elastographie die Gewebeelastizität als Summenparameter misst. Die Reduktion der Muskelfaserzahl führt jedoch zu strukturellen Veränderungen, die wiederum die Elastizität des Muskels beeinflussen (Pillen 2015).

In den Untersuchungsgruppen unterschieden sich die Werte der Elastographie in den comprehensive elasticity tools (Cs, E, G) zwischen der Probandengruppe und der QS-Gruppe (E=16,9 kPa vs 11,93 kPa) signifikant. In dem Patientenkollektiv mit einer CIPM- (E=14,3 kPa) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede gegenüber gesunden Probanden- (E=16,9 kPa) als auch gegenüber Patienten mit einem Querschnittssyndrom (E=11,9 kPa). Zur Referenzmuskelgruppe gab es zwischen den Untersuchungsgruppen in der Shear wave propagation velocity keine signifikanten Unterschiede (Tabelle 3).

### **Zusammenfassung:**

Die Forschung zeigt, dass eine reduzierte Kapillarisation ein zentraler Mechanismus bei der Entwicklung von Sarkopenie sein kann. Eine verminderte Mikrozirkulation führt zu einer Abnahme der muskulären Versorgung mit Sauerstoff und Nährstoffen, was sowohl die Muskelregeneration als auch den Erhalt der Muskelmasse beeinträchtigt. Zudem fördern vaskuläre Dysfunktionen entzündliche Prozesse, die den Muskelabbau weiter beschleunigen. Die Muskelelastographie ist eine bildgebende Methode, mit der die mechanischen Eigenschaften (v. a. Steifigkeit/Elastizität) von Muskelgewebe quantitativ erfasst werden. Typische Verfahren sind die Ultraschall-Shear-Wave-Elastographie (SWE) und die Strain-Elastographie. Die Elastographie kann als nichtinvasiver Biomarker für die Quantifizierung von Muskelmasse und -qualität genutzt werden und korreliert indirekt mit einer Reduktion der Muskelfaserzahl, da sie die daraus resultierenden strukturellen Veränderungen (Atrophie, Fibrose, Fettinfiltration) abbildet (Lexell 1988). Eine direkte, quantitative Bestimmung der Muskelfaserzahl ist mit der Elastographie jedoch nicht möglich. Die Muskelelastographie kann auch nicht direkt zwischen Typ-I- und Typ-II-Fasern unterscheiden oder die spezifische Atrophie von Typ-II-Fasern quantifizieren. Sie misst einen Summenparameter der Gewebeelastizität, der von allen strukturellen Veränderungen beeinflusst wird (Akagi 2015, Eby 2015, Lexell 1988, Lang 2010). Die Atrophie der Typ-II-Fasern führt zu einer Reduktion der Muskelsteifigkeit, was sich in niedrigeren Elastizitätswerten der Muskelelastographie widerspiegelt.

Die Zunahme von intramuskulärem Fett führt zu niedrigeren Elastizitätswerten. Es besteht eine signifikante negative Korrelation zwischen Elastizitätswerten und dem Anteil an intramuskulärem Fett. Die Elastographie kann daher als nichtinvasives Surrogat für die

Beurteilung der Myosteatose genutzt werden, ist aber am aussagekräftigsten in Kombination mit anderen bildgebenden Verfahren (Berko 2022, Alfuraih 2019).

Weiterhin gibt es keine direkte, quantitative Korrelation zwischen den Elastizitätswerten der Muskelelastographie und der Anzahl und Funktion von Satellitenzellen, da die Elastographie keine zelluläre Auflösung besitzt (Snijders 2015, Fry 2015). Der Verlust von Satellitenzellen kann nur durch invasive Methoden wie Muskelbiopsie und immunhistochemische Analysen (z. B. Pax7-Färbung) direkt nachgewiesen werden. Anwendungen zeigen, dass die Elastographie als Marker für Muskelqualität und -strukturveränderungen genutzt werden kann, die auch Folge eines Satellitenzellverlusts sind (Berko 2022, Alfuraih 2019).

Die Zunahme der Fibrosierung führt zu erhöhten Elastizitätswerten im Elastogramm, wobei eine signifikante positive Korrelation zwischen dem Grad der Fibrosierung und den Elastizitätswerten in der Muskelelastographie aufgezeigt werden konnte (Lacourpaille 2015, Brandenburg 2016, Narici & Maffulli 2010). Die Muskelelastographie ist schließlich ein sensitiver, nicht-invasiver Marker für die Detektion und Quantifizierung der Muskelfibrose. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse stellen die Vorteile der Muskelelastographie im klinischen Kontext in ihrer schnellen Echtzeitdiagnostik sowie die sofortige Verfügbarkeit heraus, womit die Wertigkeit des Einsatzes der Elastographie als ergänzendes Verfahren zur Diagnostik der Muskelmasse und zur Früherkennung von Sarkopenie verdeutlicht wird.

#### **Literatur:**

Alfuraih AM et al. (2019). The effect of ageing on shear wave elastography muscle stiffness in adults. *Aging Clin Exp Res*, 31(12):1755-1763.

Akagi R et al. (2015). Muscle hardness of the triceps brachii before and after a resistance exercise session: a comparison between young and elderly men. *Clin Interv Aging*, 10:177-177

Eby SF et al. (2015). Shear wave elastography of passive skeletal muscle stiffness: Influences of sex and age throughout adulthood. *Clin Biomech*, 30(1):227.

Bennett, B. C., et al. (2016). Reduced skeletal muscle capillary density contributes to muscle atrophy in old age. *Experimental Gerontology*, 83, 98-107.

Berko NS et al. (2022). Ultrasound elastography in the assessment of sarcopenia: A systematic review. *J Ultrasound Med*, 41(2):413-426.

Brandenburg JE et al. (2016). Muscle ultrasound and elastography as biomarkers of muscle tissue composition in Duchenne muscular dystrophy. *Muscle Nerve*, 54(5):829-35.

Chen D et al. (2019). Quantitative evaluation of skeletal muscle fatty infiltration by shear wave elastography in patients with chronic stroke. *Ultrasound Med Biol*, 45(7):1736-1744.

Eby, S. F., et al. (2013). Validation of shear wave elastography in skeletal muscle. *Journal of Biomechanics*, 46(14), 2381–2387

Eby SF et al. (2015). Shear wave elastography of passive skeletal muscle stiffness: Influences of sex and age throughout adulthood. *Clin Biomech*, 30(1):227.

Fry CS, et al. (2015). Aging impairs contraction-induced human skeletal muscle satellite cell proliferation. *Skeletal Muscle*, 5:35.

Gilbert F, Klein D, Weng AM, Köstler H, Schmitz B, Schmalzl J, Böhm D. Supraspinatus muscle elasticity measured with real time shear wave ultrasound elastography correlates with MRI spectroscopic measured amount of fatty degeneration. *BMC Musculoskelet Disord*. 2017 Dec 28;18(1):549.

Goodpaster BH et al. (2001). Skeletal muscle attenuation determined by computed tomography is associated with skeletal muscle lipid content. *J Appl Physiol*, 90(1): 126–134.

Cruz-Jentoft AJ et al. (2019). Sarcopenia: revised European consensus on definition and diagnosis. *Age Ageing*, 48(1):1631.

Kaji, S., et al. (2018). Capillary rarefaction in skeletal muscle: A factor contributing to muscle weakness and loss of function in the elderly. *Ageing Research Reviews*, 45, 35-45.

Kellum, J. A., & Song, X. (2020). Vascular contributions to muscle wasting in aging. *Journal of the American Geriatrics Society*, 68(6), 1371-1377.

Lacourpaille, L., et al. (2012). Non-invasive assessment of muscle stiffness in humans using shear wave elastography: The effect of muscle contraction. *Journal of Biomechanics*, 45(15), 2849–2853

Lacourpaille L et al. (2015). Non-invasive assessment of muscle stiffness in patients with Duchenne muscular dystrophy. *Muscle Nerve*, 51(2):284-6.

Lexell J, Taylor CC, Sjöström M. (1988). What is the cause of the ageing atrophy? *J Neurol Sci*, 84(23):27594.

Narici MV, Maffulli N. (2010). Sarcopenia: characteristics, mechanisms and functional significance. *Br Med Bull*, 95:13959.

Pillen S, van Alfen N. (2015). Skeletal muscle ultrasound. *Neurol Res*, 37(4):3319.

Török, M., et al. (2019). The role of endothelial dysfunction and inflammation in the development of sarcopenia. *Molecular Medicine Reports*, 20(2), 979-988.

Sanchez-Rodriguez, R., et al. (2015). The role of microvascular alterations in sarcopenia. *European Journal of Translational Myology*, 25(3), 113-117.

Silva AM, Grimm RC, Glaser KJ, Fu Y, Wu T, Ehman RL, Silva AC. Magnetic resonance elastography: evaluation of new inversion algorithm and quantitative analysis method. *Abdom Imaging*. 2015 Apr;40(4):810-7

Snijders T, et al. (2015). Satellite cells in human skeletal muscle; from birth to old age. *Age (Dordr)*, 37(2):9793.

Studer, R., et al. (2022). Vascular aging and muscle aging: A review on their intersection in sarcopenia. *Journal of Aging and Physical Activity*, 30(3), 349-357.

Verdijk LB et al. (2007). Satellite cell content is specifically reduced in type II skeletal muscle fibers in the elderly. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 292(1):E1517.