

Aus der Klinik und Poliklinik für Radiologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktor: Prof. Dr. med. Jens Ricke

**Wissenschaftliche Analyse unterschiedlicher bildgebender
Diagnostikverfahren in der muskuloskelettalen Radiologie**

Habilitationsschrift

zur Erlangung der Venia Legendi
für das Fach Radiologie
der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Dr. med. Sophia Samira Goller

aus Münchberg

2024

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitende Zusammenfassung	1
2. Themenrelevante wissenschaftliche Arbeiten	3
2.1 MRT-Bildgebung bei degenerativen und entzündlichen Erkrankungen des Schultergelenkes	3
2.1.1 Assoziation des Schweregrades der Supraspinatus-Sehnenruptur mit dem Atrophiegrad	3
2.1.2 Beeinflussung der diagnostischen Sicherheit durch Kontrastmittelgabe in der MRT-Bildgebung der adhäsiven Kapsulitis	6
2.2 MRT-basierte Rezidivdiagnostik von Weichteilsarkomen	9
2.2.1 Einfluss dynamisch-kontrastverstärkter und diffusionsgewichteter MRT- Sequenzen auf die diagnostische Aussagekraft.....	9
2.2.2 Wertigkeit unterschiedlicher Bildgebungsparameter und des Vorhandenseins einer Voruntersuchung hinsichtlich der diagnostischen Sicherheit in der Rezidiverkennung	11
2.3 Deep Learning-unterstützte Bildgebung an der Wirbelsäule	13
2.3.1 Differenzierung von benignen und malignen Wirbelkörperfrakturen durch unterschiedliche Texturmerkmale in der CT-Bildgebung	13
2.3.2 Wertigkeit der automatisierten versus händischen opportunistischen Knochendichtemessung zur Vorhersage von osteoporotischen Wirbelkörperfrakturen	16
3. Abkürzungsverzeichnis	20
4. Abbildungsverzeichnis	21
5. Literaturverzeichnis	22

1. Einleitende Zusammenfassung

Dieses kumulative Habilitationsprojekt behandelt die wissenschaftliche Analyse unterschiedlicher bildgebender Diagnostikverfahren in der muskuloskelettalen Radiologie.

Bildgebende Verfahren des Bewegungsapparates haben in der Diagnostik muskuloskelettaler Erkrankungen einen hohen Stellenwert. Fragestellungen aus dem Bereich der muskuloskelettalen Bildgebung machen daher einen großen Anteil in der täglichen Routine in Klinik und Praxis aus.

Das diagnostische und therapeutische Spektrum im Bereich der muskuloskelettalen Radiologie ist breit gefächert und stützt sich insbesondere auf konventionelle sowie tomographische Untersuchungen mit dem Ziel die Qualität der Patientenversorgung in enger Zusammenarbeit mit den klinischen Fachkollegen der Orthopädie sowie Unfallchirurgie stetig zu verbessern.

Die verschiedenen Teilprojekte dieses kumulativen Habilitationsprojektes spiegeln die diagnostische Breite dieses radiologischen Teilgebietes in der klinischen Routine wider und behandeln unterschiedliche klinische Fragestellungen:

Teilprojekt 1 beschäftigte sich mit der Magnetresonanztomographie (MRT)-Bildgebung bei häufigen degenerativen und entzündlichen Erkrankungen des Schultergelenkes wie der Rotatorenmanschettensehnenruptur und der adhäsiven Kapsulitis der Schulter (ACS). Einerseits wurde die Assoziation des Schweregrades der Supraspinatus-Sehnenruptur mit dem Atrophiegrad analysiert, andererseits befasste sich das Projekt mit der Beeinflussung der diagnostischen Sicherheit durch Kontrastmittelgabe im Rahmen der MRT-Bildgebung der Frozen Shoulder.

Im **Teilprojekt 2** wurde die MRT-basierte Rezidivdiagnostik von Weichteilsarkomen evaluiert, um zum einen den Einfluss dynamisch-kontrastverstärkter und diffusionsgewichteter MRT-Sequenzen auf die diagnostische Aussagekraft zu untersuchen, sowie um zum anderen die Wertigkeit unterschiedlicher

Bildgebungsparameter und des Vorhandenseins einer Voruntersuchung hinsichtlich der diagnostischen Sicherheit in der Rezidiverkennung herauszuarbeiten.

Deep Learning (DL)-unterstützte Bildgebungsverfahren an der Wirbelsäule wurden im Rahmen des **Teilprojektes 3** thematisiert. Unterschiedliche Texturmerkmale wurden hinsichtlich ihrer Eignung zur Computertomographie (CT)-basierten Differenzierung von benignen und malignen Wirbelkörperfrakturen analysiert. Zudem wurde die Wertigkeit der Algorithmus-gestützten automatisierten versus der händischen opportunistischen Knochendichtemessung zur Vorhersage von osteoporotischen Wirbelkörperfrakturen untersucht.

2. Themenrelevante wissenschaftliche Arbeiten

2.1 MRT-Bildgebung bei degenerativen und entzündlichen Erkrankungen des Schultergelenkes

2.1.1 Assoziation des Schweregrades der Supraspinatus-Sehnenruptur mit dem Atrophiegrad

Goller SS, Erber B, Fink N, Rosenkranz T, Glaser C, Ricke J, Heuck A. Three-Dimensional Software- and MR-Imaging-Based Muscle Volumetry Reveals Overestimation of Supraspinatus Muscle Atrophy Using Occupation Ratios in Full-Thickness Tendon Tears. *Healthcare (Basel)*. 2022 Sep 28;10(10):1899. doi: 10.3390/healthcare10101899. PMID: 36292346; PMCID: PMC9601991.

Rupturen der Supraspinatussehne (SSP) sind mit einer verminderten Muskelqualität verbunden, die mit Atrophie und vermehrten Fetteinlagerungen einhergeht [22; 23; 40; 52]. Mit der MRT lassen sich sowohl partielle als auch transtendinöse Sehnenrupturen der Rotatorenmanschette (RC) erkennen und deren Ausmaß bestimmen.

Aufgrund technischer Einschränkungen bildet die klinische MRT den SSP-Muskel jedoch häufig nicht in seiner umfänglichen medialen bis lateralen Ausdehnung ab und ermöglicht daher keine dreidimensionale (3D) Abschätzung der Muskelatrophie durch Bestimmung des gesamten Muskelvolumens [14; 29; 54]. Stattdessen wird das Muskelvolumen bzw. der Grad der Muskelatrophie häufig entweder durch Verwendung des von Zanetti beschriebenen qualitativen Tangenzzeichens [55] oder durch die Bestimmung der von Thomazeau beschriebenen Occupation Ratio (OR) auf der Grundlage des Quotienten aus der Querschnittsfläche des SSP-Muskels und der Fossa supraspinata auf einem schräg-sagittalen MRT-Bild (sog. „Y-View“) geschätzt [52]. Beide Methoden liefern jedoch nur eine zweidimensionale (2D) Darstellung des dreidimensionalen (3D) Muskelvolumens und haben sich bereits in früheren Studien als weniger zuverlässig erwiesen als die 3D-Muskelvolumenanalyse [14; 53; 54].

Daher ist anzunehmen, dass die OR-Methode das SSP-Muskelvolumen insbesondere bei transtendinösen Sehnenrupturen nicht zuverlässig bestimmt, da die mediale Retraktion der myotendinösen Einheit die Messung beeinflusst. Mehrere Studien deuten darauf hin, dass ein signifikantes Ausmaß an SSP-Muskelatrophie mit einer

eingeschränkten Prognose nach RC-Reparaturverfahren verbunden ist, weshalb die präoperative Beurteilung der Muskelatrophie für orthopädische Chirurgen bei der Indikationsstellung von entscheidender Bedeutung ist [7; 12; 13; 17].

Diese Studie verfolgte zwei Hauptziele: Erstens sollte die Genauigkeit der auf 3D-Software und MR-Bildgebung basierenden SSP-Muskelvolumetrie im Ex-vivo Setting validiert werden, und zweitens sollte der Einfluss des SSP-Rupturmusters (partielle vs. transtendinöse Ruptur) auf die OR im Vergleich zur 3D-Muskelvolumetrie bewertet werden. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass die SSP-Muskelatrophie bei transtendinösen Sehnenrupturen aufgrund des oben erwähnten medialen Retraktion der rupturierten Sehne überschätzt wird.

Im Rahmen der zunächst durchgeführten Ex-vivo-Studie an zehn dem humanen SSP-Muskel ähnelnden spindelförmigen Schweinemuskelpräparaten wurde die Genauigkeit der auf 3D-Software und MR-Bildgebung basierenden SSP-Muskelvolumetrie-Messmethode validiert, welche in der darauffolgenden Patientenanalyse als Referenzstandard verwendet wurde. Innerhalb der Patientenkohorte (n=149) wurden Untergruppenanalysen durchgeführt, bei denen sowohl intakte Sehnen als auch partielle bzw. transtendinöse SSP-Sehnenrupturen untersucht wurden. Für die 3D-Volumenmessungen des SSP-Muskels in der Patientenkohorte wurde jeder SSP-Muskel manuell segmentiert. Die OR der Fossa supraspinata wurde durch Bildung des Quotienten aus der Querschnittsfläche des SSP-Muskels und der Fläche der Fossa supraspinata auf einer schräg-sagittalen T2-gewichteten Sequenz (sog. „Y-View“) berechnet. Jeder SSP-Muskel und jede Fossa supraspinata wurden hierbei manuell segmentiert. Die Volumina wurden jeweils automatisiert durch die verwendete Software errechnet.

In der Ex-vivo-Studie wurde eine sehr gute Korrelation für die Variablen „physikalische Volumetrie mit der Wasserverdrängungsmethode“ und „MR-basierte 3D-SSP-Muskelvolumetrie mit der Software“ festgestellt. Die von der Software ermittelten mittleren 3D-SSP-Muskelvolumina waren in der Gruppe der intakten Sehnen am größten (mittleres Volumen 56,9 cm³), in der Gruppe der partiellen Sehnenrupturen geringer (mittleres Volumen 43,6 cm³; p < 0,001) und in der Untergruppe der Patienten mit transtendinösen SSP-Sehnenrupturen am geringsten (mittleres Volumen 31,1 cm³; p < 0,001). Die Korrelation zwischen den 3D-Muskelvolumina und der OR war gut für intakte SSP-Sehnen (0,84) und partiell rupturierte Sehnen (0,93), jedoch deutlich geringer (0,68) für transtendinöse

Sehnenrupturen mit einem beliebigen Grad an medialer Retraktion der myotendinösen Einheit (Abbildung 1).

Abbildung 1. wurde aus Copyright Gründen entfernt.

Siehe Originalpublikation:

Three-Dimensional Software- and MR-Imaging-Based Muscle Volumetry Reveals Overestimation of Supraspinatus Muscle Atrophy Using Occupation Ratios in Full-Thickness Tendon Tears.

Goller SS, Erber B, Fink N, Rosenkranz T, Glaser C, Ricke J, Heuck A.

Healthcare (Basel), 2022 Sep 28;10(10):1899. doi: 10.3390/healthcare10101899. PMID: 36292346; PMCID: PMC9601991.

Abbildung 1. Korrelation der OR-Werte mit den Muskelvolumina.

Die Korrelation zwischen den OR-Werten und den Muskelvolumina war hoch für intakte SSP-Sehnen (0,84) und partielle Sehnenrupturen (0,93), jedoch deutlich geringer für transtendinöse Sehnenrupturen mit medialer Retraktion der myotendinösen Einheit (0,68).

Im Ex-vivo-Teil der Studie konnte gezeigt werden, dass die auf 3D-Software und MR-Bildern basierende Muskelvolumetrie zuverlässig und genau ist. Die Anwendung dieser Technik auf den SSP-Muskel bei Individuen mit und ohne Sehnenrupturen und ein Vergleich mit der entsprechenden OR-Methode ergab, dass die OR-Methode die SSP-Muskelatrophie bei transtendinösen Sehnenrupturen überschätzt. Dies ist höchstwahrscheinlich auf die mediale Retraktion der myotendinösen Einheit bei vollständig rupturierten Sehnen zurückzuführen und sollte berücksichtigt werden, wenn MRT-Untersuchungen von Patienten mit transtendinösen SSP-Rupturen im Hinblick auf eine relevante Muskelatrophie im präoperativen Setting bewertet werden. Es erscheint deshalb zielführend, eine T1-gewichtete (T1w) parakoronale Sequenz, die den SSP-Muskel in seiner medialen bis lateralen sowie seiner anterioren bis posterioren Extension vollständig abdeckt und somit die dreidimensionale Bestimmung des SSP-Muskelvolumens ermöglicht, in klinische Schulter-Routineprotokolle zu integrieren.

2.1.2 Beeinflussung der diagnostischen Sicherheit durch Kontrastmittelgabe in der MRT-Bildgebung der adhäsiven Kapsulitis

Erber B, Hesse N, Glaser C, Baur-Melnyk A, **Goller S**, Ricke J, Heuck A. MR imaging detection of adhesive capsulitis of the shoulder: impact of intravenous contrast administration and reader's experience on diagnostic performance. *Skeletal Radiol.* 2022 Sep;51(9):1807-1815. doi: 10.1007/s00256-022-03994-x. Epub 2022 Feb 28. PMID: 35224657; PMCID: PMC9283172.

Die adhäsive Kapsulitis (AC) ist eine häufige Erkrankung der Schulter [56]. Die AC tritt meist in mittlerem Lebensalter auf wobei Frauen häufiger betroffen sind als Männer [4, 5]. Die Erkrankung wird in eine idiopathische primäre Form und eine sekundäre Form unterteilt, die durch ein vorangegangenes Trauma, eine Operation oder andere Erkrankungen verursacht wird [37]. Der Verlauf der AC wird in vier Stadien unterteilt, wobei die primäre Form der AC in der Regel selbstlimitierend sowie mit einer mittleren Symptombdauer von 18 bis 24 Monaten verläuft [41; 42; 50]. Obwohl es keine eindeutigen Kriterien gibt, wird die Diagnose einer AC in erster Linie anhand des klinischen Befunds einer Einschränkung des aktiven und passiven Bewegungsumfanges des Schultergelenkes gestellt [56]. Eine wichtige Rolle der Bildgebung besteht darin, andere Ursachen für eine schmerzhafte Bewegungseinschränkung der Schulter wie beispielsweise eine Arthrose oder eine Erkrankung der Rotatorenmanschette auszuschließen [3; 20; 56].

Mehrere Studien analysierten unterschiedliche diagnostische Kriterien für eine AC im MRT [45]. Vier anatomische Regionen sind für die MRT-Diagnostik einer AC von entscheidender Bedeutung: das Rotatorenintervall, der axilläre Recessus, das Ligamentum coracohumeralis und das subcoracoidale Fettdreieck [3; 10; 20; 44; 51]. Bei zusätzlicher intravenöser (IV) Verabreichung von gadoliniumhaltigem Kontrastmittel wurde eine erhöhte Sensitivität und Spezifität in der Erkennung der AC berichtet [3; 44]. Aufgrund ihres invasiveren Charakters hat sich die kontrastmittelverstärkte CE (contrast enhanced)-MRT in der Diagnostik der AC jedoch noch nicht umfassend durchgesetzt.

Ziel dieser Studie war es, den Einfluss von CE-Sequenzen zusätzlich zu nicht-verstärkten Sequenzen auf die MRT-gestützte Entscheidung über das Vorliegen oder Nichtvorliegen einer AC bei Patienten mit Schultersymptomen und die

Diagnosesicherheit des Radiologen zu untersuchen. Darüber hinaus wurde evaluiert, wie die Erfahrung des individuellen Untersuchers die Ergebnisse beeinflusst.

Alle MRT-Untersuchungen wurden von drei unabhängigen und verblindeten Radiologen mit unterschiedlicher Erfahrung in der muskuloskelettalen Bildgebung ausgewertet. In einem ersten Schritt wurden ausschließlich nicht-verstärkte Sequenzen ausgewertet, und in einem zweiten Schritt (fünf Wochen später) nicht-verstärkte und CE-Sequenzen zusammen interpretiert. In beiden Auswertungsschritten wurden die Reader gebeten, zu entscheiden, ob die Untersuchung eines Patienten MR-Bildgebungszeichen einer AC aufweist oder nicht. Die Entscheidungsfindung für nicht-verstärkte und CE-Sequenzen basierte auf MR-Bildgebungsmerkmalen, die sich entsprechend der aktuellen Literatur als relevant für die Diagnose einer AC erwiesen haben [3; 15; 20; 33; 51] (Abbildung 2).

Abbildung 2. wurde aus Copyright Gründen entfernt.

Siehe Originalpublikation:

MR imaging detection of adhesive capsulitis of the shoulder: impact of intravenous contrast administration and reader's experience on diagnostic performance.

Erber B, Hesse N, Glaser C, Baur-Melnyk A, Goller S, Ricke J, Heuck A.

Skeletal Radiol. 2022 Sep;51(9):1807-1815. doi: 10.1007/s00256-022-03994-x. Epub 2022 Feb 28. PMID: 35224657; PMCID: PMC9283172.

Abbildung 2. Linke Schulter eines 57-jährigen männlichen Patienten mit klinischen Anzeichen einer AC.

A Fettgesättigte coronare PDw-Aufnahme mit unauffälliger Darstellung des axillären Kapselrecessus (Pfeil). B T2w schräg-sagittales Bild mit minimal obliteriertem subcoracoidalem Fett (Pfeil) sowie einem nicht verdickten coracohumeralem Ligament (gestrichelter Pfeil). Die Kapsel im Rotatorenintervall (Pfeilspitze) ist mit bis zu 5 mm leicht verdickt, überschreitet aber nicht den Schwellenwert von 7 mm, der auf eine AC hinweist [39]. C T1w fettgesättigtes schräg-sagittales Bild nach IV-Kontrastmittelgabe mit starker Anreicherung im Rotatorenintervall (Pfeil) und mäßiger Anreicherung im axillären Recessus (gestrichelter Pfeil).

60 von 180 Patienten wiesen klinische Anzeichen einer AC gemäß der Definition des Referenzstandards für diese Studie und dementsprechend verschiedene bildgebende Merkmale einer AC auf. Das Durchschnittsalter betrug 58 (SD ± 12,1) Jahre in der Kontrollgruppe und 59 (SD ± 10,8) Jahre in der AC-Kohorte. Das Verhältnis zwischen

Frauen und Männern betrug in der Kontrollgruppe 51 zu 49 % (61 weibliche und 59 männliche Patienten) und in der AC-Kohorte 48 zu 52 % (29 weibliche und 31 männliche Patienten). In der AC-Kohorte hatten 96,7 % (58/60) Schmerzen in der Schulter, 96,7 % (58/60) eine eingeschränkte Außenrotation, 88,3 % (53/60) eine eingeschränkte Abduktion und Anteflexion und 96,7 % (58/60) eine eingeschränkte Innenrotation. Die MRT wurde in einem Zeitraum von 1 bis 48 Wochen (im Mittel 13,4 Wochen) nach Auftreten der Symptome durchgeführt. Reader 1 stellte die Diagnose einer AC bei 37 von 60 Patienten (61,7 %) mit klinischen Krankheitsanzeichen auf der Grundlage von nicht-verstärkten Bildern allein und bei 50 von 60 Patienten (83,3 %) auf der Grundlage von nicht-verstärkten und zusätzlichen CE-Bildern. Bei Reader 2 waren die Ergebnisse 33 von 60 (55,0 %) für nicht-verstärkte Bilder und 51 von 60 (85,0 %) für nicht-verstärkte und zusätzliche CE-Bilder. Reader 3 entdeckte 45 von 60 Patienten mit AC (75,0 %) auf nicht-verstärkten Untersuchungen und 53 von 60 Patienten (88,3 %) auf nicht-verstärkten und CE-Untersuchungen. Die Sensitivität bei der Erkennung der AC verbesserte sich bei Reader 1 von 61,7 % mit nicht-verstärkten Bildern auf 83,3 % mit zusätzlichen CE-Bildern, bei Reader 2 von 55,0 auf 85,0 % und bei Reader 3 von 75,0 auf 88,3 %. Die mittlere Sensitivität stieg signifikant von 63,9 % mit nicht-verstärkten Bildern auf 85,5 % mit zusätzlichen CE-Sequenzen ($p = 0,046$). Die ermittelte mittlere Spezifität zeigte keinen signifikanten Unterschied für die Verwendung von nicht-verstärkten Bildern allein (86,4 %) und für die Verwendung von nicht-verstärkten Bildern und CE-Bildern zusammen (91,9 %; $p > 0,05$). Reader 3 mit mehr als 20 Jahren Erfahrung in der muskuloskelettalen Bildgebung erzielte höhere Werte für Sensitivität und Spezifität sowohl für nicht-verstärkte Bilder allein als auch für die Kombination aus nicht-verstärkten und CE-Bildern als die weniger erfahrenen Reader 1 und 2.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass zusätzliche CE-Sequenzen die Sensitivität der MRT sowie das Vertrauen des Radiologen in die Diagnose einer AC signifikant erhöhen können. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Erfahrung des Untersuchers die Genauigkeit der MRT bei der Erkennung einer AC verbessert. Für die Spezifität der MRT bei der Diagnosestellung einer AC bieten zusätzliche CE-Bilder möglicherweise keinen klinisch relevanten Nutzen. Insgesamt stellte sich die Anwendung zusätzlicher CE-Sequenzen als hilfreich in der MRT-Bildgebung der AC heraus, insbesondere bei Beurteilung durch in der muskuloskelettalen Diagnostik weniger erfahrenen Radiologen.

2.2 MRT-basierte Rezidivdiagnostik von Weichteilsarkomen

2.2.1 Einfluss dynamisch-kontrastverstärkter und diffusionsgewichteter MRT-Sequenzen auf die diagnostische Aussagekraft

Erber BM, Reidler P, **Goller SS**, Ricke J, Dürr HR, Klein A, Lindner L, Di Gioia D, Geith T, Baur-Melnyk A, Armbruster M. Impact of Dynamic Contrast Enhanced and Diffusion-Weighted MR Imaging on Detection of Early Local Recurrence of Soft Tissue Sarcoma. *J Magn Reson Imaging*. 2022 May 18. doi: 10.1002/jmri.28236. Epub ahead of print. PMID: 35582900.

Bisherige Arbeiten konnten zeigen, dass die dynamische Kontrastverstärkung (DCE, dynamic contrast enhancement) in der Rezidivdiagnostik von Weichteilsarkomen vorteilig sein kann, wenn es darum geht, ein Lokalrezidiv von möglichen posttherapeutischen Veränderungen abzugrenzen [16; 26]. In vorliegender Studie wurde untersucht, ob die quantitative DCE-MRT, welche grundsätzlich unabhängig von der subjektiven Beurteilung des Radiologen ist, in der Detektion eines Lokalrezidivs in Abgrenzung zu posttherapeutischen Veränderungen bei Patienten mit Weichteilsarkomen behilflich ist.

Retrospektiv wurden 64 Patienten mit Weichteilsarkomen der Extremitäten eingeschlossen. Ein Großteil der Patienten erhielt eine neoadjuvante Chemotherapie (ChT) und Radiotherapie/Hyperthermie (RHT) vor der operativen Entfernung des Tumors, gefolgt von adjuvanter Radiotherapie (RT), ChT und RHT (40/64). Die routinemäßige Nachuntersuchung (klinische Untersuchung, MRT, DCE-MRT) der Tumorexzisionsstelle wurde in den ersten drei Jahren nach Diagnosestellung alle drei Monate sowie im vierten und fünften Jahr alle sechs Monate durchgeführt. Referenzstandard war die Histologie in den elf Fällen eines Lokalrezidivs sowie die MRT-Nachuntersuchung bei den 53 Patienten ohne klinische oder radiologische Anzeichen eines Lokalrezidivs. Die quantitativen DCE-MRT-Parameter relativer Plasmafluss (rPF) und relative mittlere Transitzeit (rMTT, relative mean transit time) wurden berechnet. Ein Apparent Diffusion Coefficient (ADC)-Mapping wurde zur Quantifizierung der Diffusionseinschränkung verwendet. Die interessierenden Regionen wurden im Konsens von zwei Experten im Bereich der Diffusions- und

Perfusionsanalyse festgelegt. Zudem wurde eine morphologische Beurteilung von drei unabhängigen und verblindeten Radiologen durchgeführt.

Abbildung 3. wurde aus Copyright Gründen entfernt.

Siehe Originalpublikation:

Impact of Dynamic Contrast Enhanced and Diffusion-Weighted MR Imaging on Detection of Early Local Recurrence of Soft Tissue Sarcoma.

Erber BM, Reidler P, Goller SS, Ricke J, Dürr HR, Klein A, Lindner L, Di Gioia D, Geith T, Baur-Melnyk A, Armbruster M.

J Magn Reson Imaging. 2023 Feb;57(2):622-630. doi: 10.1002/jmri.28236. Epub 2022 May 18. PMID: 35582900.

Abbildung 3. MRT-Bilder eines 70-jährigen Patienten mit einem G3-Liposarkom und einem Lokalrezidiv des Weichteilsarkoms in der Leiste.

(A) Kontrastverstärktes T1-gewichtetes Bild. Geringe Kontrastmittelaufnahme der Läsion (Pfeil). (B) ADC-Bild. (C) Plasmafluss. Bei einem Lokalrezidiv ist der Plasmafluss im Vergleich zum umgebenden Gewebe deutlich erhöht. (D) Die mittlere Transitzeit ist bei einem Lokalrezidiv leicht verringert.

Bei Vorliegen eines Lokalrezidivs war der rPF signifikant höher als in Fällen ohne Lokalrezidiv (61,1 vs. 4,5), während die rMTT bei Lokalrezidiven geringfügig niedriger war (Abbildung 3). Die ROC-Analyse ergab eine AUC von 0,95 (SEM \pm 0,05) für rPF (Abbildung 4), wobei im Regressionsmodell eine hohe diagnostische Genauigkeit des rPF gezeigt werden konnte ($R^2 = 0,71$). Im Vergleich mit der qualitativen morphologischen Beurteilung wies die rPF eine deutlich höhere Spezifität und einen höheren positiven Wert hinsichtlich des Nachweises von Lokalrezidiven auf.

Abbildung 4. wurde aus Copyright Gründen entfernt.

Siehe Originalpublikation:

Impact of Dynamic Contrast Enhanced and Diffusion-Weighted MR Imaging on Detection of Early Local Recurrence of Soft Tissue Sarcoma.

Erber BM, Reidler P, Goller SS, Ricke J, Dürr HR, Klein A, Lindner L, Di Gioia D, Geith T, Baur-Melnyk A, Armbruster M.

J Magn Reson Imaging. 2023 Feb;57(2):622-630. doi: 10.1002/jmri.28236. Epub 2022 May 18. PMID: 35582900.

Abbildung 4. ROC-Analyse.

ROC-Analyse mit area under the curves (AUCs) für den relativen Plasmafluss (schwarz), die relative mittlere Transitzeit (rot) und die mittlere ADC (blau) auf der Grundlage des Vorhandenseins/Nichtvorhandenseins eines Lokalrezidivs.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Auswertung des rPF mittels DCE-MRT eine vielversprechende quantitative Methode zur Differenzierung von Lokalrezidiven und benignen posttherapeutischen Veränderungen nach multimodaler Therapie bei Weichteilsarkomen der Extremitäten darstellt. Insbesondere hinsichtlich der Spezifität ist die DCE-MRT bei der Erkennung von Lokalrezidiven der ausschließlich morphologischen Beurteilung überlegen. Die Diffusionsbildgebung mittels ADC-Mapping konnte hingegen in dieser Analyse keinen signifikanten Vorteil nachweisen.

2.2.2 Wertigkeit unterschiedlicher Bildgebungsparameter und des Vorhandenseins einer Voruntersuchung hinsichtlich der diagnostischen Sicherheit in der Rezidiverkennung

Goller SS, Reidler P, Rudolph J, Rückel J, Hesse N, Schmidt VF, Dürr HR, Klein A, Lindner LH, Di Gioia D, Kuhn I, Ricke J, Erber B. Impact of postoperative baseline MRI on diagnostic confidence and performance in detecting local recurrence of soft-tissue sarcoma of the limb. *Skeletal Radiol.* 2023 May 2. doi: 10.1007/s00256-023-04341-4. Epub ahead of print. PMID: 37129611.

Der Nutzen von Follow-up MRT Untersuchungen bei multimodal behandelten Weichteilsarkomen ist bisher nicht vollständig geklärt. Posttherapeutische Veränderungen wie beispielsweise muskuläre und subkutane Ödeme sowie Narbengewebe im Situs können die Erkennungsrate eines Lokalrezidivs deutlich beeinträchtigen [9; 31]. Insbesondere ist in diesem Kontext bisher nicht untersucht worden, ob die Verfügbarkeit einer „MRT-Ausgangsuntersuchung“ unmittelbar nach Abschluss der Primärbehandlung die diagnostische Treffsicherheit späterer MRT-Nachuntersuchungen erhöhen kann, indem sie hilft zwischen posttherapeutischen Veränderungen und lokalem Rezidiv des Weichteilsarkoms zu differenzieren [30]. Ziel dieser Studie war es, den Nutzen einer Voruntersuchung (PE, previous examination) hinsichtlich der diagnostischen Performance und Treffsicherheit bei der

Erkennung eines Lokalrezidivs (LR) in der MRT zu untersuchen. Darüber hinaus wurden verschiedene MRT-Standardparameter im zeitlichen Verlauf qualitativ bewertet. Insgesamt wurden 72 Patienten (8 mit LR, 64 ohne LR) mit primärem Weichteilsarkom der Extremitäten eingeschlossen. Die routinemäßigen MRT-Nachuntersuchungen (1,5 T) zum Zeitpunkt sechs und 24 Monate nach multimodaler Therapie bzw. zum Zeitpunkt des Auftretens eines Lokalrezidivs wurden von drei unabhängigen Readern anhand einer Likert-Skala bewertet. Zudem wurden die folgenden MRT-Parameter bewertet: Vorhandensein einer Masse, Signalcharakteristik in T2- und T1-gewichteten Bildern, Kontrastverstärkung (CE) und in einigen Fällen die Signalintensität in der ADC. U-Test, McNemar-Test und ROC-Analyse wurden zur statistischen Auswertung angewandt. Die Interobserver-Reliabilität wurde anhand der Fleiss-Kappa-Statistik berechnet. Das Vorhandensein einer MRT-Voruntersuchung erhöhte die diagnostische Sicherheit in der Erkennung eines LR signifikant und verbesserte die Spezifität leicht (mittlere Spezifität ohne PE 74,1 % und mit Vorhandensein einer PE 81,2 %), allerdings nicht zu einem signifikanten Level (Abbildung 5). Das Vorhandensein einer Masse zeigte die höchste diagnostische Performance und die höchste Übereinstimmung zwischen den Readern (AUC [%]; κ : 73,1-83,6; 0,34), gefolgt von T2-Hyperintensität (50,8-66,7; 0,08), CE (52,4-62,5; 0,13) und T1-Hypointensität (54,7-77,3; 0,23). Die ADC zeigte eine AUC von 65,6-96,6 % und ein κ von 0,55.

Abbildung 5. wurde aus Copyright Gründen entfernt.

Siehe Originalpublikation:

Impact of postoperative baseline MRI on diagnostic confidence and performance in detecting local recurrence of soft-tissue sarcoma of the limb.

Goller SS, Reidler P, Rudolph J, Rückel J, Hesse N, Schmidt VF, Dürr HR, Klein A, Lindner LH, Di Gioia D, Kuhn I, Ricke J, Erber B.

Skeletal Radiol. 2023 Oct;52(10):1987-1995. doi: 10.1007/s00256-023-04341-4. Epub 2023 May 2. PMID: 37129611; PMCID: PMC10449988.

Abbildung 5. Säulendiagramme zur Visualisierung der diagnostischen Sicherheit der einzelnen Reader.

Die Diagramme veranschaulichen die diagnostische Sicherheit der drei Reader ohne sowie mit Vorhandensein einer Voruntersuchung. Dies wurde anhand einer Likert-Skala bestimmt (1= sicher; 2= wahrscheinlich, 3= unsicher).

Schlussfolgernd kann zusammengefasst werden, dass das Vorhandensein einer PE die diagnostische Sicherheit bei der Erkennung eines LR eines Weichteilsarkoms der Extremitäten in der MRT-Bildgebung erhöht. Zudem stieg durch das Vorhandensein einer PE die Spezifität geringfügig, jedoch nicht signifikant. Nach derzeitigem Kenntnisstand scheint das Vorhandensein einer Masse der zuverlässigste MRT-Parameter für den Nachweis eines LR bei Weichteilsarkomen der Extremitäten zu sein.

2.3 Deep Learning-unterstützte Bildgebung an der Wirbelsäule

2.3.1 Differenzierung von benignen und malignen Wirbelkörperfrakturen durch unterschiedliche Texturmerkmale in der CT-Bildgebung

Goller SS, Foreman SC, Rischewski JF, Weißinger J, Dietrich AS, Schinz D, Stahl R, Luitjens J, Siller S, Schmidt VF, Erber B, Rieke J, Liebig T, Kirschke JS, Dieckmeyer M, Gersing AS. Differentiation of benign and malignant vertebral fractures using a convolutional neural network to extract CT-based texture features. *Eur Spine J.* 2023 Jul 4. doi: 10.1007/s00586-023-07838-7. Epub ahead of print. PMID: 37401945.

Die CT-basierte Texturanalyse (TA, texture analysis) ist ein wachsender und repräsentativer Radiomics Teilbereich und stellt eine nicht-invasive und quantitative Methode für die Bewertung medizinischer Bilder dar. Texturmerkmale (TFs, texture features) ermöglichen die quantitative Charakterisierung von Bildeigenschaften wie beispielsweise Gleichförmigkeit, Heterogenität und Zufälligkeit sowie von sich wiederholenden Bildmustern [18]. Somit ermöglicht die TA die Extraktion zusätzlicher diagnostischer, prädiktiver und prognostischer Informationen, die über die rein visuelle Bildwahrnehmung hinausgehen [11; 32].

So fanden TA-Methoden zuletzt in verschiedenen radiologischen Teilbereichen wie der Neurobildgebung oder der muskuloskelettalen Bildgebung Einsatz, um zusätzliche Informationen hinsichtlich der Diagnose oder des Verlaufs verschiedener

Krankheitsbilder zu gewinnen [11; 36]. Die ausschließlich CT-basierte Unterscheidung zwischen benignen (osteoporotischen) Wirbelfrakturen (VFs, vertebral fractures) einerseits und malignen VFs aufgrund von Metastasen andererseits ist in der klinischen Praxis oft herausfordernd und von wachsender Bedeutung in der alternden Bevölkerung. So entwickeln bis zu 10 % aller Tumorpatienten im Laufe ihrer Erkrankung symptomatische Knochenmetastasen [43]. Sowohl benigne als auch maligne VFs kennzeichnen sich durch eine Mikroarchitekturstörung des Knochengewebes und eine verringerte Knochendichte (BMD) mit entsprechendem Frakturrisiko [1; 19; 27; 34; 35]. Außerdem sind maligne Grunderkrankungen häufig entweder mit einer tumor- oder behandlungsbedingten BMD-Reduktion assoziiert, und sowohl die Grunderkrankung als auch antitumorale Therapien können zu einer erhöhten Knochenbrüchigkeit führen und infolgedessen benigne VFs bei Patienten mit einer Tumoranamnese verursachen [46; 48].

Die morphologische Standard-CT ist das am besten geeignete bildgebende Verfahren für die klinische Routineuntersuchung von Knochengewebe im Allgemeinen, da sie eine hohe räumliche Auflösung und die Möglichkeit der dreidimensionalen Reformation bietet [48], während die CT-basierte TA eine detaillierte Analyse der trabekulären Knochenmikroarchitektur ermöglicht [18].

Ziel dieser Studie war es, die diagnostische Wertigkeit von CT-basierten 3D-TFs in der klinischen Routine unter Verwendung eines DL-basierten automatisierten Segmentierungssystems zu untersuchen, um benigne und maligne thorakolumbale VFs zu unterscheiden. Insgesamt wurden 409 Patienten in die Auswertung eingeschlossen, die sich in zwei unterschiedlichen Einrichtungen einer Routine-CT der Wirbelsäule unterzogen hatten. VFs wurden als benigne oder maligne eingestuft, wobei entweder eine Biopsie oder eine bildgebende Nachuntersuchung von mindestens drei Monaten als Referenzstandard verwendet wurde. Die automatische Erkennung, Kennzeichnung und Segmentierung der Wirbel wurden mit einem DL-basierten Algorithmus durchgeführt (<https://andu.in.bonescreen.de>) (Abbildung 6).

Abbildung 6. wurde aus Copyright Gründen entfernt.

Siehe Originalpublikation:

Differentiation of benign and malignant vertebral fractures using a convolutional neural network to extract CT-based texture features.

Goller SS, Foreman SC, Rischewski JF, Weißinger J, Dietrich AS, Schinz D, Stahl R, Luitjens J, Siller S, Schmidt VF, Erber B, Ricke J, Liebig T, Kirschke JS, Dieckmeyer M, Gersing AS.

Eur Spine J. 2023 Dec;32(12):4314-4320. doi: 10.1007/s00586-023-07838-7. Epub 2023 Jul 4. PMID: 37401945.

Abbildung 6. Exemplarische Darstellung des automatisierten Segmentierungsprozesses.

(a, d) Sagittale Reformationen der thorakolumbalen Wirbelsäule (BWK 1-LWK 5) mit einer Schichtdicke von 2 mm bei (a) einem Patienten mit multiplen osteoporotischen Frakturen von BWK 7, BWK 9, BWK 10, BWK 12 und LWK 1 und (d) einem Patienten mit einer metastatischen Fraktur von LWK 5. (b, e) Annotation aller Wirbelkörper von BWK 1 bis LWK 5. (c, f) Annotation und Segmentierung der Wirbelkörper und posterioren Wirbelelemente BWK 1 bis LWK 5 unter Verwendung des DL-basierten Algorithmus.

Es wurden insgesamt acht verschiedene TFs extrahiert: $Variance_{global}$, $Skewness_{global}$, Energy, Entropy, Short-run emphasis (SRE), Long-run emphasis (LRE), Run-length non-uniformity (RLN) und Run percentage (RP). Multivariable lineare Regressionsmodelle dienten dem Vergleich der TFs zwischen benignen und malignen VFs. $Variance_{global}$ zeigte einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen der Gruppe der benignen und der Gruppe der malignen Frakturen bei der Analyse der nicht frakturierten Wirbelkörper LWK 1 bis LWK 4 (Mittelwert [95% Konfidenzintervall], Gruppe benigner Frakturen: 64,28 [62,80-65,76]; Gruppe maligner Frakturen: 62,51 [61,27-63,75]; $p=0,002$), was auf eine größere Varianz der Knochentextur bei Patienten mit benignen VFs im Vergleich zu Patienten mit malignen VFs hinweist. $Skewness_{global}$ zeigte in der Analyse der frakturierten Wirbelkörper von BWK 1 bis LWK 6 einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen (benigne Frakturgruppe: 0,70 [0,64-0,76]; Gruppe mit malignen Frakturen: 0,59 [0,56-0,63]; $p = 0,017$).

3D CT-basierte TFs, die mit Hilfe eines DL-basierten Algorithmus extrahiert wurden, zeigten signifikante Unterschiede zwischen benignen und malignen thorakolumbalen VFs und können daher zur korrekten Diagnosestellung bei Patienten mit VFs beitragen.

2.3.2 Wertigkeit der automatisierten versus händischen opportunistischen Knochendichtemessung zur Vorhersage von osteoporotischen Wirbelkörperfrakturen

Goller SS, Rischewski JF, Liebig T, Ricke J, Siller S, Schmidt VF, Stahl R, Kulozik J, Baum T, Kirschke JS, Foreman SC, Gersing AS. Automated Opportunistic Trabecular Volumetric Bone Mineral Density Extraction Outperforms Manual Measurements for the Prediction of Vertebral Fractures in Routine CT. *Diagnostics* (Basel). 2023 Jun 20;13(12):2119. doi: 10.3390/diagnostics13122119. PMID: 37371014; PMCID: PMC10296803.

Die Osteoporose ist eine systemische Knochenerkrankung, die durch eine Abnahme der Knochenmasse und eine Mikroarchitekturstörung des Knochengewebes gekennzeichnet ist und ein erhöhtes Risiko für Knochenfrakturen birgt [2; 24]. Die Osteoporose tritt weltweit vor allem in der älteren Bevölkerungsschicht gehäuft auf [28], wobei die Prävalenz osteoporotischer VFs zwischen 18 und 26 % bei Europäern über 50 Jahren beträgt [4]. VFs sind neben hüftgelenksnahen Frakturen die häufigsten und zugleich folgenschwersten Osteoporose-assoziierten Frakturen, da sie eine eingeschränkte Lebensqualität [25], ein zweifach erhöhtes Mortalitätsrisiko [5] und ein dreifach erhöhtes Risiko für die Entwicklung weiterer Frakturen im Vergleich zur Normalbevölkerung [38] zur Folge haben. Aus diesen Gründen wird eine frühzeitige medikamentöse Behandlung von Osteoporosepatienten mit hohem Frakturrisiko dringend empfohlen [8]. Problematisch ist jedoch, dass Osteoporosepatienten in der Regel bis zum Eintreten einer Fraktur asymptomatisch sind [21].

Die Dual-X-ray-absorptiometry (DXA) zur Messung der Flächenknochendichte (aBMD, areal bone mineral density) gilt derzeit als Standard-Screeningmethode für Osteoporose [1]. Allerdings ist diese Methode mit Einschränkungen behaftet; so wiesen in einer großen Beobachtungsstudie nur 44 % der Frauen und 21 % der Männer mit osteoporotischen Frakturen eine erniedrigte aBMD auf [47]. Daher rückten in den letzten Jahren zunehmend opportunistische tomographische Messverfahren in den Fokus des Osteoporose-Screenings, welche aus klinischen Routine-CT Datensätzen volumetrische Dichtewerte (vBMD, volumetric bone mineral density) zur Einschätzung des Frakturrisikos extrahieren [6; 35]. Ein DL-basierter Ansatz ermöglicht hierbei eine zeitsparende automatische Extraktion der vBMD aus CT-Datensätzen [49].

Ziel dieser Studie war es, opportunistische CT-basierte trabekuläre vBMD-Messungen, die mit Hilfe des DL-basierten Algorithmus extrahiert wurden, mit manuellen vBMD-Messungen zu vergleichen, um das zukünftige Auftreten von osteoporotischen VFs vorherzusagen. 157 Patienten (84 Frauen, 73 Männer; Alter $65,7 \pm 11,8$ Jahre) mit einer routinemäßigen CT-Untersuchung der thorakolumbalen Wirbelsäule zum Zeitpunkt Baseline, die im Verlauf eine osteoporotische inzidentelle VF entwickelt hatten ($n=53$), wurden hinsichtlich Alter, Geschlecht und Nachbeobachtungsdauer mit Patienten ohne inzidentelle VF ($n=104$) verglichen, die bei einer Nachuntersuchung mittels CT nach $18,3 \pm 14,8$ Monaten untersucht wurden. Die automatisierte vBMD-Analyse umfasste die automatische Segmentierung der thorakolumbalen Wirbel mit Hilfe des DL-basierten Algorithmus und die Extraktion der trabekulären vBMD der Wirbelkörper durch asynchrone Kalibrierung (Abbildung 7). Darüber hinaus wurde der trabekuläre Knochen der Wirbelkörper manuell von zwei Radiologen beurteilt (manuelle vBMD) (Abbildung 8).

Abbildung 7. wurde aus Copyright Gründen entfernt.

Siehe Originalpublikation:

Automated Opportunistic Trabecular Volumetric Bone Mineral Density Extraction Outperforms Manual Measurements for the Prediction of Vertebral Fractures in Routine CT.

Goller SS, Rischewski JF, Liebig T, Ricke J, Siller S, Schmidt VF, Stahl R, Kulozik J, Baum T, Kirschke JS, Foreman SC, Gersing AS.

Diagnostics (Basel). 2023 Jun 20;13(12):2119. doi: 10.3390/diagnostics13122119. PMID: 37371014; PMCID: PMC10296803.

Abbildung 7. Repräsentatives Beispiel zur Veranschaulichung der automatisierten Annotation, Segmentierung und vBMD-Extraktion.

CT-Scan (**b**) eines 42-jährigen Mannes, dargestellt als virtuelles Röntgenbild in seitlicher Projektion **a** und gekrümmter planarer Rekonstruktion in jeweils sagittaler Schichtführung (**c,d**). Anduin (<https://anduin.bonescreen.de>) wurde zur Lokalisierung, Annotation und Segmentierung der Wirbelkörper verwendet **c**. Um kortikalen Knochen auszuschließen, wurden die Wirbelkörper von den hinteren Wirbelelementen separiert und die Segmentierungsmasken entsprechend erodiert (**d**).

Abbildung 8. wurde aus Copyright Gründen entfernt.

Siehe Originalpublikation:

Automated Opportunistic Trabecular Volumetric Bone Mineral Density Extraction Outperforms Manual Measurements for the Prediction of Vertebral Fractures in Routine CT.

Goller SS, Rischewski JF, Liebig T, Ricke J, Siller S, Schmidt VF, Stahl R, Kulozik J, Baum T, Kirschke JS, Foreman SC, Gersing AS.

Diagnostics (Basel). 2023 Jun 20;13(12):2119. doi: 10.3390/diagnostics13122119. PMID: 37371014; PMCID: PMC10296803.

Abbildung 8: CT-Scan eines 42-jährigen Mannes zur Veranschaulichung der manuellen trabekulären vBMD-Extraktion.

Volumetrische regions of interest (ROIs) wurden manuell in der ventralen Spongiosa der Wirbelkörper LWK 1 bis LWK 4 (**a-e**) platziert. Unter Verwendung einer asynchronen Kalibrierung wurde die mittlere trabekuläre vBMD nach Umrechnung der HU- in BMD-Werte bestimmt (nicht abgebildet).

Multivariable lineare Regressionsmodelle wurden zur Bewertung der Zusammenhänge zwischen der automatisch und manuell ermittelten vBMD und dem Frakturstatus bei der Nachuntersuchung verwendet.

Patienten mit inzidentellen VFs zeigten bei der Nachuntersuchung signifikant niedrigere automatisch extrahierte vBMD-Werte im Vergleich zu Patienten ohne inzidentelle VFs zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung ($83,6 \pm 29,4 \text{ mg/cm}^3$ versus $102,1 \pm 27,7 \text{ mg/cm}^3$, $p < 0,001$), jedoch war dieser Vergleich für die manuell erfasste vBMD nicht signifikant ($99,2 \pm 37,6 \text{ mg/cm}^3$ versus $107,9 \pm 33,9 \text{ mg/cm}^3$, $p = 0,30$). Der VF-Status war signifikant mit der automatisiert gemessenen vBMD assoziiert ($\beta = -0,32$; 95% Konfidenzintervall (CI): -20,10, 4,35; $p < 0,001$), während auch ein signifikanter, aber weniger starker Zusammenhang zwischen dem VF-Status und der manuell gemessenen vBMD festgestellt wurde ($\beta = -0,15$; 95% CI: -11,16, 5,16; $p < 0,03$). Der VF-Status war signifikant assoziiert mit der automatisierten vBMD-Analyse sowohl für einzelne Wirbelkörperhöhen von LWK 1 bis LWK 4, für Kombinationen von konsekutiven Wirbelkörperhöhen von LWK 1-LWK 2 bis LWK 3-LWK 4 ($p < 0,001$) als auch für die manuelle trabekuläre vBMD-Analyse auf einzelnen Wirbelkörperrniveaus LWK 1 und LWK 2 ($p = 0,006$ bzw. $p = 0,029$) und konsekutiven Ebenen LWK 1-LWK 2 und LWK 2-LWK 3 ($p < 0,001$ bzw. $p = 0,007$).

Zusammenfassend zeigte diese Studie, dass die automatisierte DL-basierte Messung der opportunistischen trabekulären vBMD in der klinischen Routine durchführbar ist und signifikante Assoziationen mit dem Auftreten von zukünftigen osteoporotischen VFs an der thorakolumbalen Wirbelsäule aufweist. Daher ist die automatisierte der manuellen vBMD-Analyse potenziell überlegen.

3. Abkürzungsverzeichnis

AC	Adhäsive Kapsulitis („Frozen Shoulder“)
ADC	Apparent Diffusion Coefficient
AUC	Area under the curve
aBMD	Flächenknochendichte (areal bone mineral density)
BMD	Knochendichte (bone mineral density)
BWK	Brustwirbelkörper
CE	Kontrastmittelverstärkt (contrast enhanced)
ChT	Chemotherapie
CT	Computertomographie
DCE	Dynamische Kontrastverstärkung (dynamic contrast enhancement)
DL	Deep Learning
DXA	Dual-X-Ray-absorptiometry
IV	Intravenös
LR	Lokalrezidiv
LRE	Long-run emphasis
LWK	Lendenwirbelkörper
MRT	Magnetresonanztomographie
OR	Occupation Ratio
PDw	Protonendichte-gewichtet
PE	Voruntersuchung (previous examination)
RC	Rotatorenmanschette
RHT	Radiotherapie/Hyperthermie
RLN	Run-length non-uniformity
rMTT	Relative mittlere Transitzeit (relative mean transit time)
ROC	Receiver operating characteristic
RP	Run percentage
rPF	Relativer Plasmafluss
RT	Radiotherapie
SD	Standardabweichung (standard deviation)
SRE	Short-run emphasis
SSP	Supraspinatussehne
TA	Texturanalyse (texture analysis)
TF	Texturmerkmale (texture features)
T1w	T1-gewichtet
T2w	T2-gewichtet
VF	Wirbelkörperfraktur (vertebral fracture)
vBMD	Volumenknochendichte (volumetric bone mineral density)
3D	Dreidimensional
2D	Zweidimensional

4. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Korrelation der OR-Werte mit den Muskelvolumina. (S. 5)

Abbildung 2. Linke Schulter eines 57-jährigen männlichen Patienten mit klinischen Anzeichen einer AC. (S. 7)

Abbildung 3. MRT-Bilder eines 70-jährigen Patienten mit einem G3-Liposarkom und einem Lokalrezidiv des Weichteilsarkoms in der Leiste. (S. 10)

Abbildung 4. ROC-Analyse. (S. 10)

Abbildung 5. Säulendiagramme zur Visualisierung der diagnostischen Sicherheit der einzelnen Reader. (S. 12)

Abbildung 6. Exemplarische Darstellung des automatisierten Segmentierungsprozesses. (S. 15)

Abbildung 7. Repräsentatives Beispiel zur Veranschaulichung der automatisierten Annotation, Segmentierung und vBMD-Extraktion. (S. 17)

Abbildung 8. CT-Scan eines 42-jährigen Mannes zur Veranschaulichung der manuellen trabekulären vBMD-Extraktion. (S. 18)

5. Literaturverzeichnis

- 1 (1993) Consensus development conference: diagnosis, prophylaxis, and treatment of osteoporosis. *Am J Med* 94:646-650
- 2 (2001) NIH Consensus Development Panel on Osteoporosis Prevention, Diagnosis, and Therapy, March 7-29, 2000: highlights of the conference. *South Med J* 94:569-573
- 3 Ahn KS, Kang CH, Kim Y, Jeong WK (2015) Diagnosis of adhesive capsulitis: comparison of contrast-enhanced MRI with noncontrast-enhanced MRI. *Clin Imaging* 39:1061-1067
- 4 Ballane G, Cauley JA, Luckey MM, El-Hajj Fuleihan G (2017) Worldwide prevalence and incidence of osteoporotic vertebral fractures. *Osteoporos Int* 28:1531-1542
- 5 Bliuc D, Nguyen ND, Milch VE, Nguyen TV, Eisman JA, Center JR (2009) Mortality risk associated with low-trauma osteoporotic fracture and subsequent fracture in men and women. *JAMA* 301:513-521
- 6 Bolotin HH (2007) DXA in vivo BMD methodology: an erroneous and misleading research and clinical gauge of bone mineral status, bone fragility, and bone remodelling. *Bone* 41:138-154
- 7 Burkhart SS (1991) Arthroscopic treatment of massive rotator cuff tears. Clinical results and biomechanical rationale. *Clin Orthop Relat Res*:45-56
- 8 Center JR (2017) Fracture Burden: What Two and a Half Decades of Dubbo Osteoporosis Epidemiology Study Data Reveal About Clinical Outcomes of Osteoporosis. *Curr Osteoporos Rep* 15:88-95
- 9 Cheney MD, Giraud C, Goldberg SI et al (2014) MRI surveillance following treatment of extremity soft tissue sarcoma. *J Surg Oncol* 109:593-596
- 10 Chi AS, Kim J, Long SS, Morrison WB, Zoga AC (2017) Non-contrast MRI diagnosis of adhesive capsulitis of the shoulder. *Clin Imaging* 44:46-50
- 11 Choi JY (2018) Radiomics and Deep Learning in Clinical Imaging: What Should We Do? *Nucl Med Mol Imaging* 52:89-90
- 12 Chung SW, Kim JY, Kim MH, Kim SH, Oh JH (2013) Arthroscopic repair of massive rotator cuff tears: outcome and analysis of factors associated with healing failure or poor postoperative function. *Am J Sports Med* 41:1674-1683
- 13 Chung SW, Kim SH, Tae SK, Yoon JP, Choi JA, Oh JH (2013) Is the supraspinatus muscle atrophy truly irreversible after surgical repair of rotator cuff tears? *Clin Orthop Surg* 5:55-65
- 14 Chung SW, Oh KS, Moon SG et al (2017) Serial Changes in 3-Dimensional Supraspinatus Muscle Volume After Rotator Cuff Repair. *Am J Sports Med* 45:2345-2354
- 15 Connell D, Padmanabhan R, Buchbinder R (2002) Adhesive capsulitis: role of MR imaging in differential diagnosis. *Eur Radiol* 12:2100-2106
- 16 Del Grande F, Subhawong T, Weber K, Aro M, Magera C, Fayad LM (2014) Detection of soft-tissue sarcoma recurrence: added value of functional MR imaging techniques at 3.0 T. *Radiology* 271:499-511
- 17 Deniz G, Kose O, Tugay A, Guler F, Turan A (2014) Fatty degeneration and atrophy of the rotator cuff muscles after arthroscopic repair: does it improve, halt or deteriorate? *Arch Orthop Trauma Surg* 134:985-990

- 18 Dieckmeyer M, Sollmann N, El Hussein M et al (2021) Gender-, Age- and Region-Specific Characterization of Vertebral Bone Microstructure Through Automated Segmentation and 3D Texture Analysis of Routine Abdominal CT. *Front Endocrinol (Lausanne)* 12:792760
- 19 Drake MT, Clarke BL, Lewiecki EM (2015) The Pathophysiology and Treatment of Osteoporosis. *Clin Ther* 37:1837-1850
- 20 Fields BKK, Skalski MR, Patel DB et al (2019) Adhesive capsulitis: review of imaging findings, pathophysiology, clinical presentation, and treatment options. *Skeletal Radiol* 48:1171-1184
- 21 Fink HA, Milavetz DL, Palermo L et al (2005) What proportion of incident radiographic vertebral deformities is clinically diagnosed and vice versa? *J Bone Miner Res* 20:1216-1222
- 22 Gerber C, Meyer DC, Fluck M, Benn MC, von Rechenberg B, Wieser K (2015) Anabolic Steroids Reduce Muscle Degeneration Associated With Rotator Cuff Tendon Release in Sheep. *Am J Sports Med* 43:2393-2400
- 23 Goutallier D, Postel JM, Gleyze P, Leguilloux P, Van Driessche S (2003) Influence of cuff muscle fatty degeneration on anatomic and functional outcomes after simple suture of full-thickness tears. *J Shoulder Elbow Surg* 12:550-554
- 24 Griffith JF (2015) Identifying osteoporotic vertebral fracture. *Quant Imaging Med Surg* 5:592-602
- 25 Hallberg I, Bachrach-Lindstrom M, Hammerby S, Toss G, Ek AC (2009) Health-related quality of life after vertebral or hip fracture: a seven-year follow-up study. *BMC Musculoskelet Disord* 10:135
- 26 Hirschmann A, van Praag VM, Haas RL, van de Sande MAJ, Bloem JL (2020) Can we use MRI to detect clinically silent recurrent soft-tissue sarcoma? *Eur Radiol* 30:4724-4733
- 27 Holzer G, Hobusch G, Hansen S, Fischer L, Patsch JM (2021) Is There an Association Between Bone Microarchitecture and Fracture in Patients who were Treated for High-grade Osteosarcoma? A Controlled Study at Long-term Follow-up Using High-resolution Peripheral Quantitative CT. *Clin Orthop Relat Res* 479:2493-2501
- 28 Johnell O, Kanis JA (2006) An estimate of the worldwide prevalence and disability associated with osteoporotic fractures. *Osteoporos Int* 17:1726-1733
- 29 Jost B, Pfirrmann CW, Gerber C, Switzerland Z (2000) Clinical outcome after structural failure of rotator cuff repairs. *J Bone Joint Surg Am* 82:304-314
- 30 Kwee RM, Kwee TC (2022) Diagnostic performance of MRI in detecting locally recurrent soft tissue sarcoma: systematic review and meta-analysis. *Eur Radiol*. 10.1007/s00330-021-08457-w
- 31 Labarre D, Aziza R, Filleron T et al (2009) Detection of local recurrences of limb soft tissue sarcomas: is magnetic resonance imaging (MRI) relevant? *Eur J Radiol* 72:50-53
- 32 Lee SB, Cho YJ, Hong Y et al (2022) Deep Learning-Based Image Conversion Improves the Reproducibility of Computed Tomography Radiomics Features: A Phantom Study. *Invest Radiol* 57:308-317
- 33 Lefevre-Colau MM, Drape JL, Fayad F et al (2005) Magnetic resonance imaging of shoulders with idiopathic adhesive capsulitis: reliability of measures. *Eur Radiol* 15:2415-2422

- 34 Link TM (2012) Osteoporosis imaging: state of the art and advanced imaging. *Radiology* 263:3-17
- 35 Loffler MT, Sollmann N, Mei K et al (2020) X-ray-based quantitative osteoporosis imaging at the spine. *Osteoporos Int* 31:233-250
- 36 Lubner MG, Smith AD, Sandrasegaran K, Sahani DV, Pickhardt PJ (2017) CT Texture Analysis: Definitions, Applications, Biologic Correlates, and Challenges. *Radiographics* 37:1483-1503
- 37 Lundberg J (1969) The frozen shoulder. Clinical and radiographical observations. The effect of manipulation under general anesthesia. Structure and glycosaminoglycan content of the joint capsule. Local bone metabolism. *Acta Orthop Scand:Suppl* 119:111-159
- 38 Melton LJ, 3rd, Atkinson EJ, Cooper C, O'Fallon WM, Riggs BL (1999) Vertebral fractures predict subsequent fractures. *Osteoporos Int* 10:214-221
- 39 Mengiardi B, Pfirrmann CW, Gerber C, Hodler J, Zanetti M (2004) Frozen shoulder: MR arthrographic findings. *Radiology* 233:486-492
- 40 Meyer DC, Wieser K, Farshad M, Gerber C (2012) Retraction of supraspinatus muscle and tendon as predictors of success of rotator cuff repair. *Am J Sports Med* 40:2242-2247
- 41 Neviasser JS (1962) Arthrography of the shoulder joint: study of the findings in adhesive capsulitis of the shoulder. Study of the findings in adhesive capsulitis of the shoulder. *J Bone Joint Surg Am* 44-A:1321-1359
- 42 Neviasser RJ, Neviasser TJ (1987) The frozen shoulder. Diagnosis and management. *Clin Orthop Relat Res*:59-64
- 43 Perrin RG, Laxton AW (2004) Metastatic spine disease: epidemiology, pathophysiology, and evaluation of patients. *Neurosurg Clin N Am* 15:365-373
- 44 Pessis E, Mihoubi F, Feydy A et al (2020) Usefulness of intravenous contrast-enhanced MRI for diagnosis of adhesive capsulitis. *Eur Radiol* 30:5981-5991
- 45 Polster JM, Schickendantz MS (2010) Shoulder MRI: what do we miss? *AJR Am J Roentgenol* 195:577-584
- 46 Roodman GD (2004) Mechanisms of bone metastasis. *Discov Med* 4:144-148
- 47 Schuit SC, van der Klift M, Weel AE et al (2004) Fracture incidence and association with bone mineral density in elderly men and women: the Rotterdam Study. *Bone* 34:195-202
- 48 Schwaiger BJ, Gersing AS, Baum T, Krestan CR, Kirschke JS (2016) Distinguishing Benign and Malignant Vertebral Fractures Using CT and MRI. *Semin Musculoskelet Radiol* 20:345-352
- 49 Sekuboyina A, Husseini ME, Bayat A et al (2021) VerSe: A Vertebrae labelling and segmentation benchmark for multi-detector CT images. *Med Image Anal* 73:102166
- 50 Sofka CM, Ciavarra GA, Hannafin JA, Cordasco FA, Potter HG (2008) Magnetic resonance imaging of adhesive capsulitis: correlation with clinical staging. *HSS J* 4:164-169
- 51 Suh CH, Yun SJ, Jin W et al (2019) Systematic review and meta-analysis of magnetic resonance imaging features for diagnosis of adhesive capsulitis of the shoulder. *Eur Radiol* 29:566-577
- 52 Thomazeau H, Rolland Y, Lucas C, Duval JM, Langlais F (1996) Atrophy of the supraspinatus belly. Assessment by MRI in 55 patients with rotator cuff pathology. *Acta Orthop Scand* 67:264-268

- 53 Vidt ME, Santago AC, 2nd, Tuohy CJ et al (2016) Assessments of Fatty Infiltration and Muscle Atrophy From a Single Magnetic Resonance Image Slice Are Not Predictive of 3-Dimensional Measurements. *Arthroscopy* 32:128-139
- 54 Wieser K, Joshy J, Filli L et al (2019) Changes of Supraspinatus Muscle Volume and Fat Fraction After Successful or Failed Arthroscopic Rotator Cuff Repair. *Am J Sports Med* 47:3080-3088
- 55 Zanetti M, Gerber C, Hodler J (1998) Quantitative assessment of the muscles of the rotator cuff with magnetic resonance imaging. *Invest Radiol* 33:163-170
- 56 Zuckerman JD, Rokito A (2011) Frozen shoulder: a consensus definition. *J Shoulder Elbow Surg* 20:322-325