

MR-Enterografie bei Morbus Crohn: Vergleich der Kontrastbildgebung mit diffusionsgewichteter Bildgebung und einer besonderen Form der Farbcodierung

MR Enterography in Crohn's Disease: Comparison of Contrast Imaging with Diffusion-weighted Imaging and a special Form of Color Coding




Autoren

Maja Jakob¹, Maik Backes², Christian Schaefer³, Joerg Albert³, Angela Geissler²

Institute

- 1 Molecular Oncology, Robert Bosch Hospital, Stuttgart, Germany
- 2 Radiology, Robert Bosch Hospital, Stuttgart, Germany
- 3 Gastroenterology, Robert Bosch Hospital, Stuttgart, Germany

Key words

MR enterography, MR-diffusion/perfusion, inflammation bowel, color coding, MaRIA Score

eingereicht 11.06.2021

akzeptiert 16.03.2022

online publiziert 15.06.2022

Bibliografie

Fortschr Röntgenstr 2022; 194: 1119–1131

DOI 10.1055/a-1826-0049

ISSN 1438-9029

© 2022. The Author(s).

This is an open access article published by Thieme under the terms of the Creative Commons Attribution-NonDerivative-NonCommercial License, permitting copying and reproduction so long as the original work is given appropriate credit. Contents may not be used for commercial purposes, or adapted, remixed, transformed or built upon. (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

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

Korrespondenzadresse

Frau Prof. Angela Geissler
Department of Radiology, Robert Bosch Hospital,
Auerbachstr. 110, 70376 Stuttgart, Germany
Tel.: +49/7 11/81 01 34 36
Fax: +49/7 11/81 01 37 76
Angela.Geissler@rbk.de

 Zusätzliches Material finden Sie unter:
<https://doi.org/10.1055/a-1826-0049>

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel Vergleich der entzündlichen Aktivität verschiedener Darmabschnitte in der kontrastmittelgestützten MR-Enterografie mit diffusionsgewichteten Sequenzen und dem endoskopischen Befund. Eine neue farbcodierte Bildnachverarbeitung wurde im Vergleich zu den Standardsequenzen und der Endoskopie untersucht.

Material und Methoden Eingeschlossen wurden 197 MR-Enterografien aus den Jahren 2015–2017. Der Darm wurde in 7 Segmente unterteilt, die separat verglichen wurden. Die Treffsicherheit der MR-Untersuchungen bezüglich entzündlicher Darmwandveränderungen wurde mittels Endoskopie sowie Seo- und MaRIA-Scores validiert. Zusätzlich wurden die Bilddaten mithilfe eines farbcodierten Auswerteverfahrens (DCE-Tool auf OsiriX) nachverarbeitet.

Ergebnisse Der Vergleich zwischen kontrastgestützten und diffusionsgewichteten Sequenzen ergab für alle Darmabschnitte eine hochsignifikante Korrelation mit einem mittleren Korrelationskoeffizienten nach Spearman von 0,876 (0,809–0,928). Die farbcodierte Bildnachverarbeitung zeigte im Vergleich mit dem MaRIA-Score eine Sensitivität von 83,2% und eine Spezifität von 70,5%. Im Vergleich zur Endoskopie fand sich eine Sensitivität von 81,3% und eine Spezifität von 70,5%. Der MaRIA-Score zeigte im Vergleich mit der Endoskopie beim Cut-Off von 7 eine Sensitivität von 80,2% bei einer Spezifität von 84,0%. Der visuelle Score nach Seo zeigte bei der kontrastgestützten Untersuchung eine Sensitivität 85,7% bei einer Spezifität von 77,0%, bei der diffusionsgewichteten Sequenz eine Sensitivität von 87,9% und einer Spezifität von 71,8%.

Schlussfolgerung Diffusionsgewichtete Sequenzen sind zur Beurteilung der Entzündungsaktivität bei Morbus Crohn ebenso gut geeignet wie kontrastgestützte Sequenzen. Zur Beurteilung von Komplikationen ist eine Kontrastmittelgabe oft hilfreich. Die Darstellung mittels farbcodierter Datensätze konnte Entzündungen ähnlich gut nachweisen und könnte die Befunddemonstration in der interdisziplinären Zusammenarbeit verbessern helfen.

Kernaussagen:

- Die MR-Enterografie ist auch ohne Kontrastmittel mittels diffusionsgewichteter Bildgebung mit vergleichbar hoher Aussagekraft möglich.
- Die Entzündungsaktivität in der MRT korreliert ausreichend gut mit dem endoskopischen Befund.
- Die verwendeten Scores MaRIA und Seo sind in ihrer Aussage vergleichbar.
- Die farbige Darstellung entzündeter Darmabschnitte kann eine rasche Einschätzung der regionären Verteilung einer Crohn-Manifestation ‚auf einen Blick‘ erleichtern und könnte die Befunddemonstration in der interdisziplinären Zusammenarbeit verbessern.

Zitierweise

- Jakob M, Backes M, Schaefer C et al. MR Enterography in Crohn's Disease: Comparison of Contrast Imaging with Diffusion-weighted Imaging and a special Form of Color Coding. Fortschr Röntgenstr 2022; 194: 1119–1131

ABSTRACT

Purpose We compared contrast-enhanced MR enterography with diffusion-weighted sequences to evaluate the validity of diffusion-weighted sequences for activity assessment in Crohn's disease compared to endoscopy. In addition, we investigated a new color-coded image post-processing technique in comparison with standard sequences and endoscopy.

Materials and Methods Included were 197 MR enterographies (2015–2017) performed by using standardized examination protocols. The intestine was divided into 7 segments, which were compared separately. The accuracy of the MR examinations with regard to disease activity was validated using the Seo and MaRIA score and endoscopy findings. In addition, the image data were post-processed using a color-coded evaluation method (DCE tool on OsiriX).

Results The comparison between contrast-enhanced and diffusion-weighted sequences showed a highly significant correlation for all bowel sections with a mean Spearman correlation coefficient of 0.876 (0.809–0.928). The color-coded image post-processing showed a sensitivity of 83.2% and a specificity of 70.5% in comparison with the MaRIA score. In comparison to endoscopy, a sensitivity of 81.3% and a specificity of 70.5%. In comparison with endoscopy, the MaRIA score showed a sensitivity of 80.2% and a specificity of 84.0% at a cut-off of 7. The visual score according to Seo showed a sensitivity of 85.7% with a specificity of 77.0% in the contrast-weighted examination and a sensitivity of 87.9% and a specificity of 71.8% for diffusion weighted images.

Conclusion Diffusion-weighted sequences are as good as contrast-weighted sequences for assessing inflammatory activity in Crohn's disease. Contrast is often helpful for assessing complications, but this was not the purpose of this study. Visual imaging using color-coded data sets was similarly good at detecting inflammation.

Einleitung

Die Magnetresonanz-Enterografie hat die Dünndarm-Doppelkontrastuntersuchung mittels Röntgenbildgebung zur Detektion und Beurteilung der Krankheitsaktivität bei Morbus Crohn abgelöst [1–3]. Bezüglich des Nachweises einer Ileitis terminalis besitzt die MR-Enterografie-Untersuchung eine vergleichbare Genauigkeit wie die Ileokoloskopie oder die Kapselendoskopie [4, 5]. Lediglich bei der Detektion von entzündlichen Veränderungen des oberen Dünndarms erreichen die endoskopischen Verfahren eine höhere Sensitivität als die MR-Enterografie oder die Computertomografie [6].

Die Wertigkeit der diffusionsgewichteten MR-Enterografie im Vergleich zur kontrastmittelunterstützten MR-Enterografie ist nicht abschließend geklärt [7, 8] und die optimale Sequenzwahl und Vorbereitung des Patienten sowie der Vergleich zum endoskopischen Befund ist Gegenstand der derzeitigen Forschung [9–11].

Patienten mit Morbus Crohn müssen in ihrem Leben meist mehrfach mittels Schnittbilddiagnostik, aufgrund der Strahlungsfreiheit vorzugsweise MRT, untersucht werden. Das hierzu heute verwendete, gadoliniumhaltige MRT-Kontrastmittel kann jedoch in Körpergewebe akkumulieren [12, 13].

Auch weil die klinische Relevanz dieser Gadolinium-Ablagerungen derzeit noch unklar ist und die KM-Anwendung einen möglicherweise eliminierbaren Kostenfaktor darstellt, war es Ziel dieser

Untersuchung, die diffusionsgewichtete (DWI) MR-Enterografie und die kontrastmittelunterstützte (KM) MR-Enterografie statistisch miteinander sowie mit endoskopischen Befunden zu vergleichen.

Wir untersuchten außerdem, ob eine semiquantitative Auswertung sowie eine integrierte, farbcodierte Darstellung der KM-unterstützten MR-Sequenzen zur einfacheren Beurteilung der Krankheitsaktivität herangezogen werden kann. Die integrierte, farbcodierte Darstellung der KM-Dynamik ermöglicht eine einfachere Befunddemonstration und -diskussion im interdisziplinären Austausch.

Material und Methoden

Patientenkollektiv

Durch die Ethikkommission der Universität Tübingen wurde uns mitgeteilt, dass für die vorliegende, retrospektive Studie kein Ethikvotum benötigt wird. Die Studie wurde unter Einhaltung der Deklaration von Helsinki durchgeführt.

Das Studienkollektiv dieser retrospektiven Studie umfasste 197 Patienten mit vorbekanntem oder neu diagnostiziertem Morbus Crohn, welche zwischen dem 01.07.2015 und dem 31.12.2017 im Robert-Bosch-Krankenhaus in Stuttgart eine komplette MR-Enterografie-Untersuchung (inkl. kontrastmittelunterstützten und diffusionsgewichteten Sequenzen) und im zeitlichen

▶ **Tab. 1** Sequenzübersicht MR-Enterografie.

Sequenz-name	Beschreibung	Orien-tierung	TR [ms]	TE [ms]	Schicht-dicke [mm]	Distanz-faktor [%]	Schicht-anzahl	Flip-angle
T1_fl2d_tra_mbh	T1 - gewichtet	transversal	131	4	6	20	30	70°
T2_haste_tra_mbh	T2 - gewichtet	transversal	1000	107	6	20	30	180°
T2_haste_tirm_cor_mbh	T2 - gewichtet, Fettsättigung	coronal	1000	94	6	20	28	180°
T2_trufi_cor_bh	Nachweis von Adhärenzen	coronal	3,21	1,61	6	20	28	70°
Angio_3D_cor_bh 4 Durchläufe*	Sequenzen mit i. v. Kontrastmittel	coronal	3,29	1,12	1,2	20	104	25°
T1_vibe_fs_cor	dünnschichtig	coronal	3,3	1,26	1,3	20	120	11°
T1_fl2d_fs_tra_mbh	Spätvenöse Phase	transversal	122	2,34	6	20	30	80°
ep2d_diff_spair_b0_800_tra	Diffusions-gewichtet	transversal	8200	75	6	20	30	Je nach b-Wert

TE = Echozeit; TR = Repetitionszeit; i. v. = intravenös.

* insgesamt 4 Durchläufe, der erste nativ, die folgenden 3 nach intravenöser Kontrastmittelgabe, mit jeweils 60 s Abstand.

Zusammenhang von ± 30 Tagen außerdem eine endoskopische Untersuchung des Darmes erhielten.

Alle MR-Enterografie-Untersuchungen wurden an einem 1,5 Tesla MRT (Siemens Aera) durchgeführt. Eingeschlossen wurden 197 MR-Untersuchungen an 177 Patienten. Hiervon waren 88 Frauen im Alter von 17–76 Jahren (Mittelwert 40,1) und 90 Männer im Alter von 17–75 Jahren (Mittelwert 39,7 Jahre) mit 0 bis 46 Erkrankungsjahren seit der Erstdiagnose (Mittelwert 13,2 Jahre). Pro Patient wurden jeweils getrennt die Darmabschnitte Jejunum, Ileum, terminales Ileum, Colon ascendens, Colon transversum, Colon descendens und Sigma beurteilt. Es wurden nur die noch vorhandenen und zur Diagnostik ausreichend distendierten, beurteilbaren Darmabschnitte begutachtet.

Von allen 177 untersuchten Patienten waren 54 % (n = 96) bereits im Rahmen der Grunderkrankung am Darm voroperiert. In der MR-Bildgebung ließ sich bei 37 % (n = 66) der Untersuchungen eine Darmstenose feststellen, bei 12 % (n = 21) fand sich ein Abszess und bei 25 % (n = 44) lagen Fisteln vor (interenterisch oder perianal).

MR-Enterografie

Nach oraler Kontrastierung mit 1000 ml 2,5%-iger Mannitollösung vermischt mit 5 g Hydroxyethylcellulose erfolgte die Untersuchung nach intravenöser Gabe von Butylscopolamid (20 mg je 30 kg Körpergewicht) und dem MR-Kontrastmittel Gadotriol (0,2 ml pro kg Körpergewicht). Das oral applizierte Kontrastmittel wurde, ebenso wie das intravenös applizierte Kontrastmittel, von allen Studienpatienten gut vertragen.

Untersuchungssequenzen

Die verwendeten MRT-Sequenzen können der ▶ **Tab. 1** entnommen werden.

Bildauswertung

MaRIA-Score

Wie von Rimola et al. [14] beschrieben, wurde jeder Darmabschnitt separat ausgewertet. Der MaRIA-Score wurde mittels folgender Formel berechnet [14]:

$$\text{MaRIA} = 1,5 \times \text{Wanddicke in mm} + 0,02 \times \text{RCE} + 5 \times \text{Ödem} + 10 \times \text{Ulzeration}$$

$$\text{mit RCE} = \frac{(\text{WSI}_{\text{postgadolinium}} - \text{WSI}_{\text{pregadolinium}})}{\text{WSI}_{\text{postgadolinium}}} \times 100 \times \frac{(\text{SD}_{\text{noisepregadolinium}})}{(\text{SD}_{\text{noisepostgadolinium}})}$$

Ab einem Wert von $\text{MaRIA} \geq 7$ wird in der Studie von Rimola et al. [14] von einer akuten Entzündung ausgegangen; dieser Wert wurde auch von uns als Cut-Off-Wert für die Diagnose einer akuten Entzündung herangezogen.

Seo-Score

Von Seo et al. wurde ein Score entwickelt (in dieser Arbeit „Seo-Score“ genannt siehe ▶ **Tab. 2**), welcher einen Vergleich von diffusionsgewichteten (DWI) und kontrastmittelgestützten MR-Sequenzen bei Morbus Crohn gestattet [15]. Der Seo-Score kommt der klinischen Routineauswertung von MR-Bildern am

► **Tab. 2** Übersicht über die Parameter des Seo-Scores [15].

Parameter	Score = 0	Score = 1	Score = 2	Score = 3
Wanddicke in mm	1–3	>3–5	>5–7	>7
Murale Signalintensität in T2-gewichteten Bildern	Äquivalent zur gesunden Darmwand	Leichte Erhöhung der Signalintensität: Darmwand erscheint dunkelgrau auf fett-gesättigten Aufnahmen.	Moderate Erhöhung der Signalintensität, bei der die Darmwand hellgrau auf fett-gesättigten Aufnahmen erscheint.	Starke Erhöhung der Signalintensität, bei der Areale der Darmwand die des Darmlumens erreichen.
Perimurale Signalintensität in T2-gewichteten Bildern	Äquivalent zu normalem Mesenterium	Erhöhtes Signal des Mesenteriums, aber keine freie Flüssigkeit	freie Flüssigkeit (<= 2 mm)	freie Flüssigkeit (> 2 mm)
Signalverstärkung in T1-gewichteten Bildern (nur DCE)	Äquivalent zur gesunden Darmwand	Leichte Signalverstärkung der Darmwand im Vergleich zur gesunden, aber deutlich schwächer als nahegelegene Gefäßstrukturen	Moderate Erhöhung der Signalintensität der Darmwand, dezent geringer als bei nahen Gefäßstrukturen.	Starke Erhöhung der Signalintensität der Darmwand, ähnlich die der nahen Gefäßstrukturen.
Signalintensität in diffusionsgewichteter Bildgebung (DWI)	Keine erhöhte Diffusionsrestriktion	Erhöhte DWI-Signalintensität, die ähnlich, aber geringer ist als die der Lymphknoten.	Erhöhte DWI-Signalintensität, welche nicht von der der Lymphknoten zu unterscheiden ist.	Erhöhte DWI-Signalintensität, welche höher als die der Lymphknoten und der Milz ist.

DCE = dynamic contrast enhancement, dieser Parameter wird nur für den Seo-Score inklusive Kontrastmittelgestützter Bildgebung verwendet (Seo DCE)
 DWI = diffusion weighted imaging, dieser Parameter findet nur für den Seo-Score inklusive diffusionsgewichteter Bildgebung Verwendung (Seo DWI)
 Die Summe der pro Parameter ermittelten Werte ergibt den Seo-Score des entsprechenden Darmabschnittes. Für den Seo-Score DCE sind die ersten 4 Werte, für den Seo-Score DWI die ersten 3 Werte und der fünfte Wert relevant.

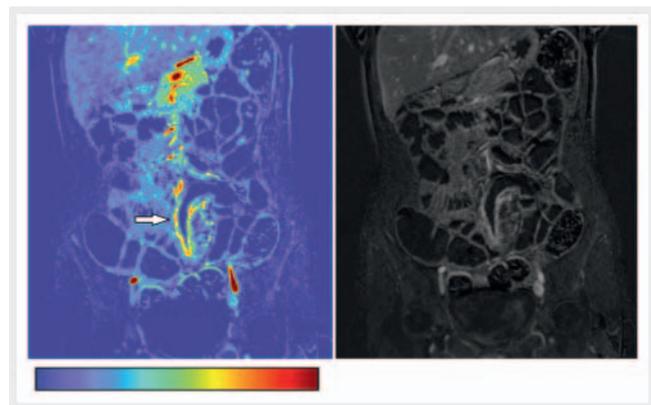
nächsten und ist einer der wenigen verfügbaren Scoring-Systeme für die Beurteilung von DWI-Sequenzen.

Bildnachverarbeitung (Generierung integrierter farbcodierter Perfusionskarten)

Das von Kyung Sung entwickelte Plug-in „DCE Tool“ wurde für den DICOM Viewer OsiriX entwickelt und ermöglicht die Verarbeitung und Auswertung dynamischer, Kontrastmittelunterstützter Sequenzen [16]. Die ursprünglich für zerebrale Anwendungen programmierte Software wurde von uns erstmals zur Beurteilung von chronisch-entzündlichen Darmerkrankungen genutzt.

Das Plug-in bietet verschiedene Möglichkeiten parametrische Karten zu erstellen, in der vorliegenden Arbeit wurde die farbige Darstellung des Integralwertes (Parameter „area under the curve“) verwendet. Dies wird in dem beigefügten Appendix genauer geschrieben. Im vorliegenden Fall wurde die Farbskala „jet“ (s. ► **Abb. 1**) gewählt.

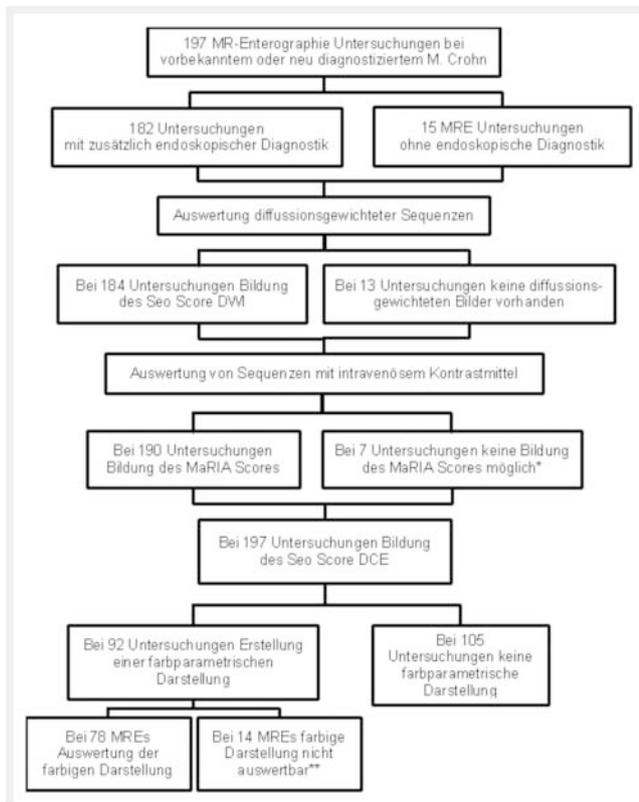
Nach Subtraktion der nativen von den Kontrastmittelunterstützten Sequenzen (Reduktion des Farbrauschens der parametrischen Auswertung) (► **Abb. 16**), erfolgte die Auswertung mit dem „DCE Tool“. Die integrierten Farbparameterkarten wurden zur visuellen Befundung mit einer Farbskalabreite von 5 % bis 50 % ausgespielt. Hierdurch gelang eine durchgängige bessere Visualisierung stark entzündeter Darmsegmente. ► **Abb. 1** zeigt exemplarisch die semiquantitative Darstellung eines entzündeten Darmabschnitts mit kleinen stark entzündeten Arealen.



► **Abb. 1** KM Aufnahme und parametrische Darstellung der „area under the curve“ mit erfolgter Bildersubtraktion. Darunter der Farbverlauf der Farbskala „jet“.

Auswertung der integrierten, parametrischen Perfusionskarten

In einem repräsentativen Abschnitt der Darmwand wurde mittels ROI ein Integralwert bestimmt. Als externe Referenz wurde bei allen Patienten eine ROI in die Aorta gelegt. Auf den höchsten bei einem Patienten gemessenen Wert wurden alle anderen gemessenen Darmabschnitte referenziert, um die Vergleichbarkeit der Integralwerte zu gewährleisten.



► **Abb. 2** Übersicht über die erfolgte Auswertung. * Fehlen der nativen Angio-Sequenz; daher keine Berechnung des MaRIA-Scores möglich. In weiteren 2 Fällen konnte lediglich das Colon transversum nicht mitbeurteilt werden, da dieser Darmabschnitt außerhalb des gewählten FOV lag. ** In 10 Fällen Fehlen einer der 4 benötigten Sequenzen (nativ oder post-KM), wobei nicht eruiert war, ob diese nicht gemessen wurden oder beim Übertrag ins Archiv verloren gingen; in 2 Fällen waren die Bewegungsartefakte zu stark und die Bilderüberlagerung nicht auswertbar; bei 2 Fällen wurde während den Angio-Aufnahmen die Position des FOV verändert und eine Überlagerung bzw. Berechnung der parametrischen Karte war nicht möglich.

Endoskopische Untersuchung

Alle im Zeitraum von ± 30 Tage im Bezug zur MRT durchgeführten endoskopischen Untersuchungen wurden zum Vergleich herangezogen.

Es wurden insgesamt 169 Koloskopien durchgeführt. 137 Untersuchungen des terminalen und zusätzlich 10 Untersuchungen bis in das präterminale Ileum wurden eingeschlossen. Bei 12 Patienten wurde eine Push-Enteroskopie des Dünndarms durchgeführt.

Insgesamt wurden 525 Darmsegmente endoskopisch beurteilt. 162 Dünndarmsegmente (davon 142 terminales Ileum) und 363 Dickdarmsegmente.

Es wurde anhand der im Befund erwähnten pathologischen Veränderungen ein modifizierter SES-CD (simple endoscopic score for Crohn's disease) verwendet [17]. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Endoskopie-Ergebnisse untereinander zu erreichen, klassifizierten wir die Darmabschnitte entweder als unauffällig (Score 0) oder entzündet (Score 1), unabhängig vom durch den Untersucher subjektiv dokumentierten Schweregrad der Entzündung.

Bildauswertung

Alle Bilddaten wurden 3-fach im Abstand von 4 Wochen von einer hierin trainierten Ärztin ausgewertet. Im dritten Durchlauf erfolgte die farbige, parametrische Darstellung. Der Ablauf der standardisierten Auswertung ist in ► **Abb. 2** zu sehen.

Statistik

Alle erfassten Parameter und Ergebnisse wurden mithilfe der Statistik-Software SPSS, IBM Statistics, Version 20.0.0 ausgewertet.

Die Werte der beiden Seo-Scores wurden in einem Scatterplot gegeneinander aufgetragen und in Subtraktionshistogrammen dargestellt (► **Abb. 3–9**).

Die Auswertung der Darmsegmente mittels Seo-Score wurde mittels der Rangkorrelation nach Spearman korreliert (► **Tab. 3**).

Außerdem wurden die verschiedenen Auswertungsmethoden der MR-Enterografie mithilfe von Receiver Operating Characteristic Kurven (ROC-Kurven) gegenüber den endoskopischen Ergebnissen dargestellt, mögliche Cut-Off-Werte und deren Sensitivität und Spezifität dargestellt sowie die Fläche unter der Kurve bestimmt, die ein weiteres Kriterium für die Trennschärfe der verschiedenen Diagnoseverfahren ist.

Ergebnisse

Vergleich Seo-Scores (DWI vs. Kontrastmittel)

Die Scatterplots in ► **Abb. 3–9** zeigen visuell eine gute Korrelation zwischen diffusionsgewichteter und KM-unterstützter MRT im Hinblick auf die Entzündungsausprägung der Darmsegmente, wobei der Score 12 der schwersten Entzündungsausprägung eines Darmsegmentes entspricht.

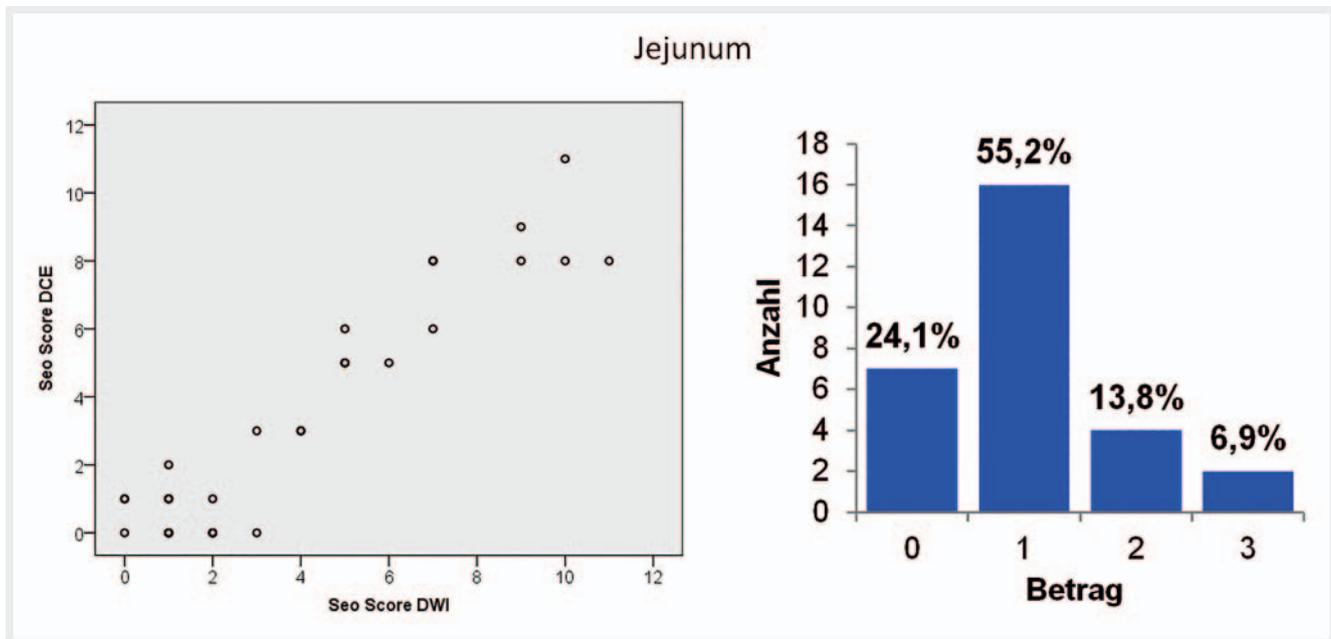
Vergleicht man diffusionsgewichtete und KM-unterstützte MRT statistisch, so ergibt sich für jedes Darmsegment eine signifikante Korrelation nach Spearman, siehe ► **Tab. 3**. Das Jejunum zeigt einen Korrelationskoeffizienten von 0,854, das Ileum 0,822 und das terminale Ileum 0,928. Für den Dickdarm ergeben sich für das Colon descendens ein Wert von 0,809, für das Colon transversum 0,892, für das Colon descendens 0,913 und für das Sigma ebenfalls 0,913. Der p-Wert ist für alle Darmsegmente $< 0,05$.

Vergleich MaRIA-Score versus Seo-Score

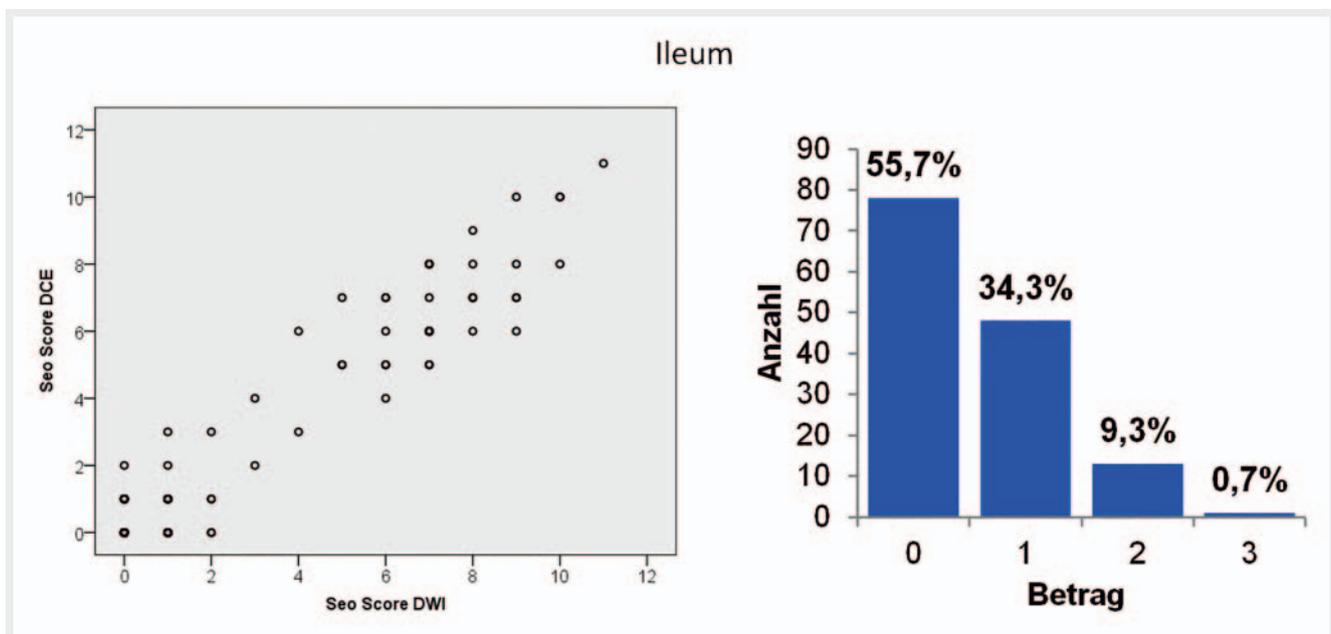
Die beiden verwendeten Scoring-Systeme unterscheiden sich in ihrer Treffsicherheit nicht signifikant. Es ergaben sich 284 positive, 427 negative und 87 fehlende Werte. ► **Abb. 10** zeigt hierzu die Grenzwertoptimierungskurve (im Folgenden ROC-Kurve genannt) mit entsprechender Auswertung.

Auswertung der Endoskopien

Bei insgesamt 798 mittels MR-Enterografie untersuchten Darmsegmenten konnte bei 551 ein korrespondierender endoskopischer Befund ermittelt werden. Bei den fehlenden 247 Segmenten waren 169 Darmsegmente endoskopisch nicht erreichbar, bei 17 ließ sich eine Stenose nicht passieren, bei 10 lag eine zu starke Verschmutzung vor und bei 51 Segmenten konnte eine Endoskopie wegen schlechter Patientenvorbereitung nicht durchgeführt werden.



► **Abb. 3** Scatterplot und Histogramm der Auswertung für den Darmabschnitt Jejunum. Seo DCE = Seo-Score inklusive kontrastmittelgestützter Bildgebung. Seo DWI = Seo-Score inklusive diffusionsgewichteter Bildgebung.



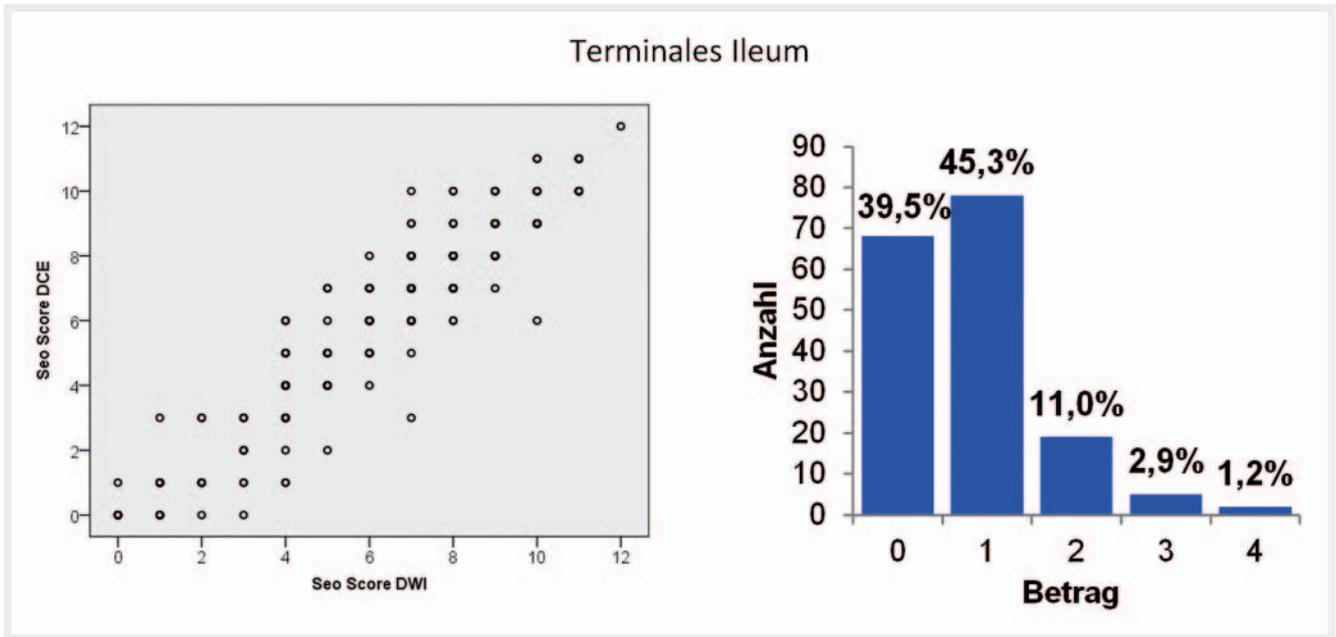
► **Abb. 4** Scatterplot und Histogramm der Auswertung für den Darmabschnitt Ileum. Seo DCE = Seo-Score inklusive kontrastmittelgestützter Bildgebung. Seo DWI = Seo-Score inklusive diffusionsgewichteter Bildgebung.

Insgesamt zeigten sich 229 positive, also entzündete, und 322 entzündungsfreie Darmabschnitte.

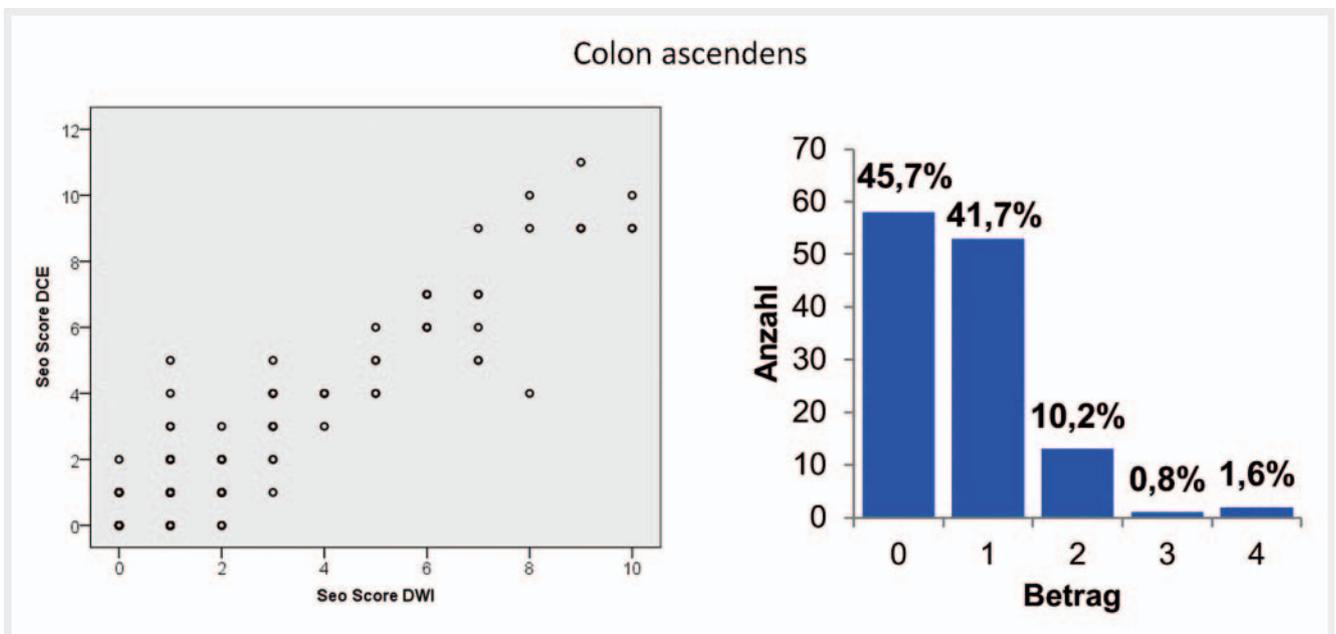
Vergleich Seo-Score (Kontrastmittel) versus Endoskopie

In dieser Betrachtung ergaben sich 227 positive (entzündete Segmente), 322 negative (nicht entzündete Segmente) und 249 fehlende Werte (nicht vorhandene/nicht auswertbare Segmente).

Im Vergleich der endoskopisch erhobenen Befunde mit den kontrastmittelunterstützten MR-Aufnahmen zeigte sich eine gute Korrelation (► **Abb. 11**). Die Fläche unter der Kurve beträgt 0,883 mit einem Konfidenzintervall von 0,853–0,912. Betrachtet man hier mögliche Cut-Off-Werte mit den dazugehörigen Werten der Sensitivität und Spezifität, so findet sich bei einem Cut-Off-Wert von 3,5 das beste Verhältnis zwischen Sensitivität und Spezifität (Sensitivität 85,7 %, Spezifität 77,0 %).



► **Abb. 5** Scatterplot und Histogramm der Auswertung für den Darmabschnitt terminales Ileum. Seo DCE = Seo-Score inklusive kontrastmittelgestützter Bildgebung. Seo DWI = Seo-Score inklusive diffusionsgewichteter Bildgebung.



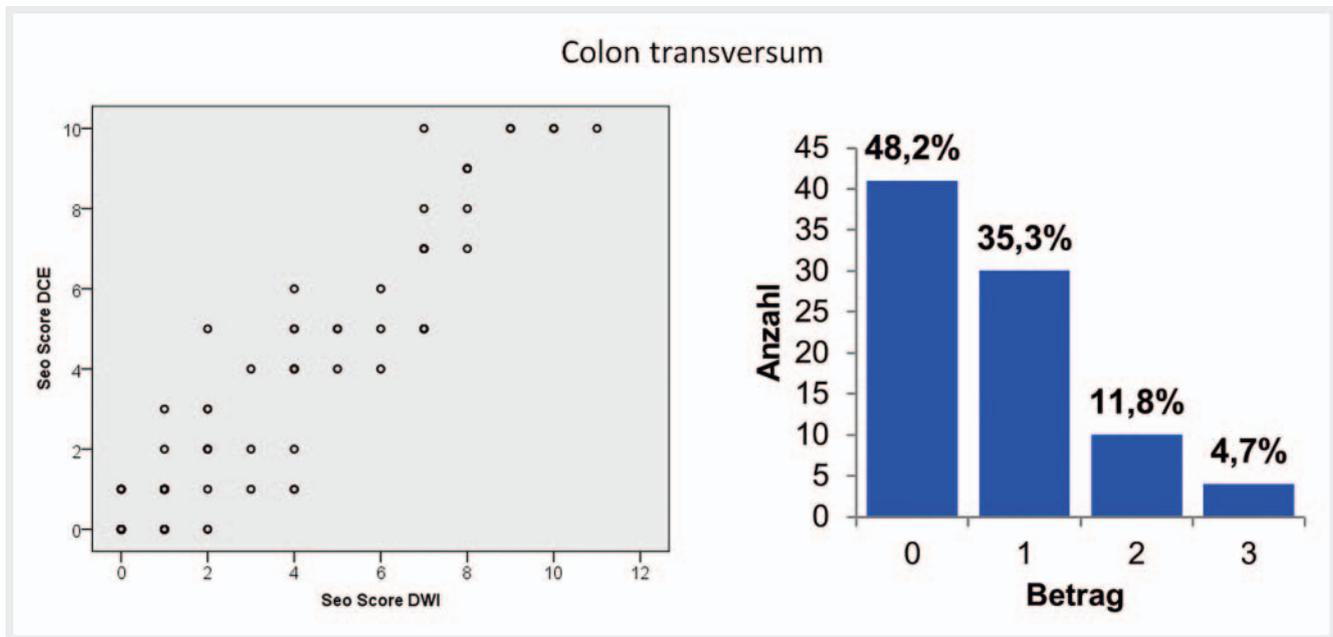
► **Abb. 6** Scatterplot und Histogramm der Auswertung für den Darmabschnitt Colon ascendens. Seo DCE = Seo-Score inklusive kontrastmittelgestützter Bildgebung. Seo DWI = Seo-Score inklusive diffusionsgewichteter Bildgebung.

Vergleich Seo-Score (DWI) versus Endoskopie

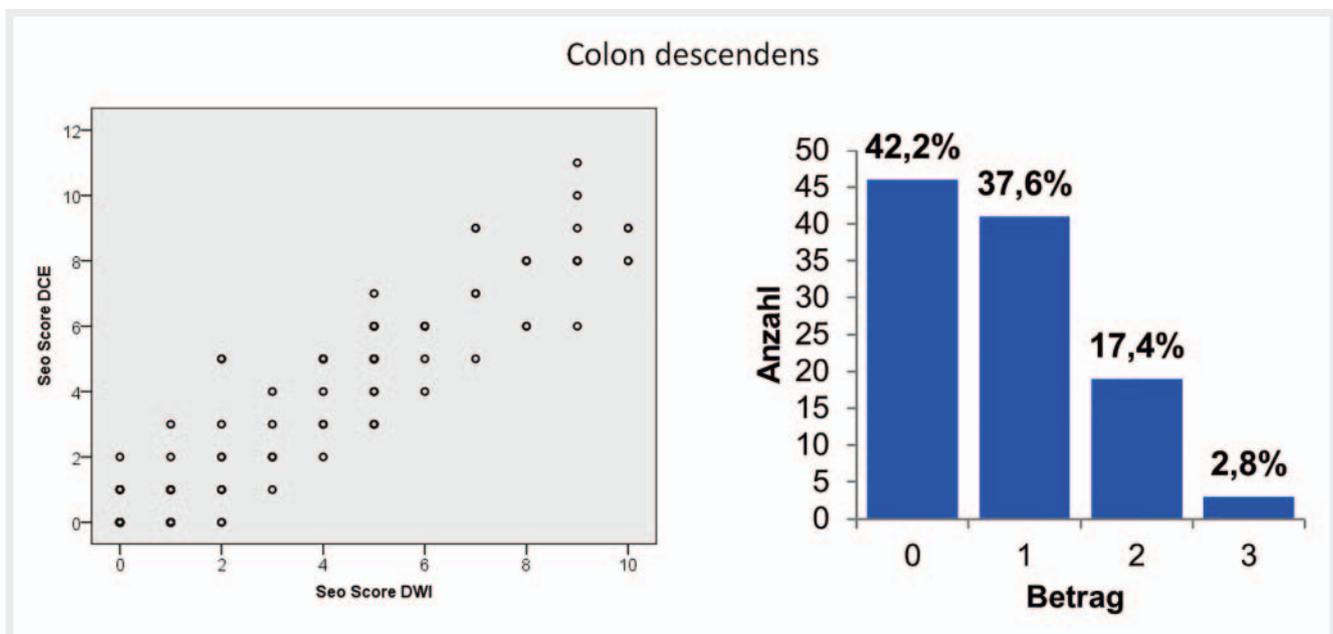
Es ergaben sich 218 positive (entzündete Segmente), 298 negative (nicht entzündete Segmente) und 282 fehlende Werte (nicht vorhandene/nicht auswertbare Segmente). Betrachtet man die ROC-Kurve in ► **Abb. 12** und die errechnete Fläche unter der Kurve, dann zeigt diese einen Wert von 0,871 bei einem Konfidenzintervall von 0,839–0,902. Bei einem Cut-Off-Wert von 3,5 ergeben sich eine Sensitivität von 87,9% und eine Spezifität

von 71,8%. Die optimalen Cut-Off-Werte sind bei KM- und diffusionsgewichteter Bildgebung identisch.

► **Abb. 13** zeigt einen spannenden Fall, in welchem die diffusionsgewichtete Bildgebung einen gegensätzlichen Befund zur Endoskopie zeigt.



► **Abb. 7** Scatterplot und Histogramm der Auswertung für den Darmabschnitt Colon transversum. Seo DCE = Seo-Score inklusive kontrastmittelgestützter Bildgebung. Seo DWI = Seo-Score inklusive diffusionsgewichteter Bildgebung.



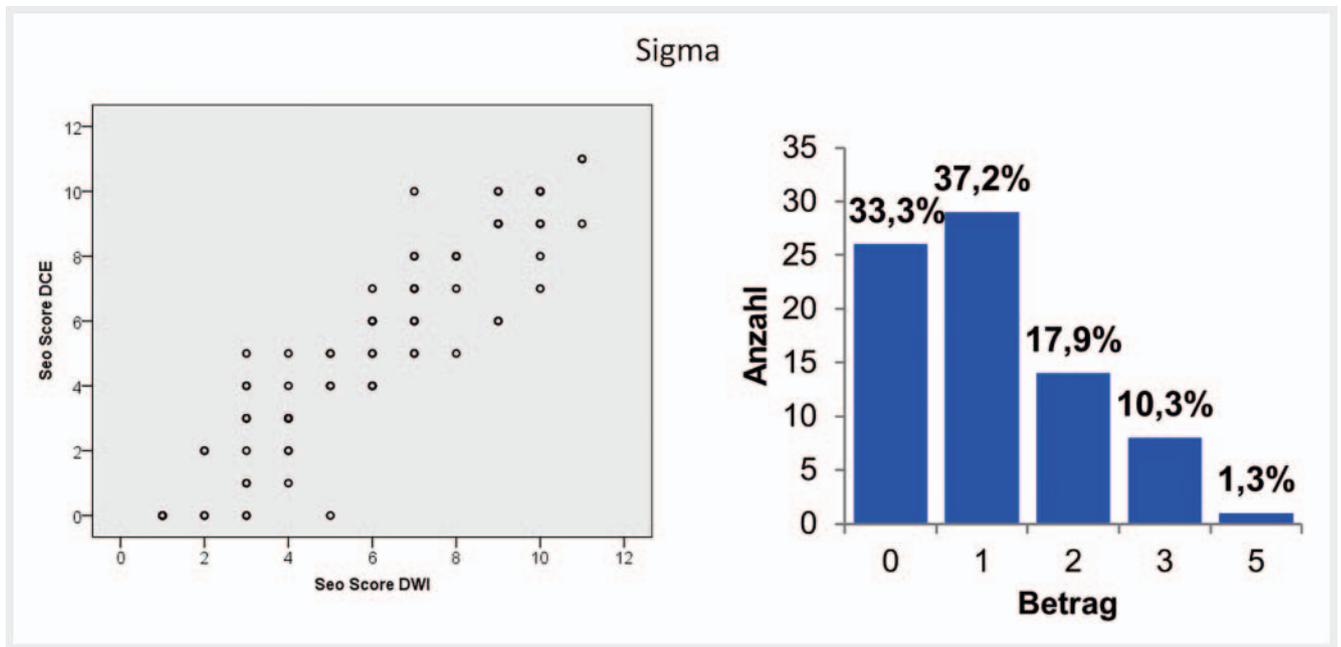
► **Abb. 8** Scatterplot und Histogramm der Auswertung für den Darmabschnitt Colon descendens. Seo DCE = Seo-Score inklusive kontrastmittelgestützter Bildgebung. Seo DWI = Seo-Score inklusive diffusionsgewichteter Bildgebung.

Vergleich MaRIA-Score versus Endoskopie

Für den Vergleich mit dem Ergebnis des MaRIA-Scores ergeben sich 215 positive (entzündete Segmente) und 313 negative (nicht entzündete Segmente), sowie 270 fehlende Werte (nicht vorhandene/auswertbare Segmente).

Es ergibt sich eine Fläche unter der Kurve von 0,871 (► **Abb. 14**) mit einem Konfidenzintervall von 0,839–0,904.

In der Literatur [14] wird ein Cut-Off-Wert von 7 für eine vorhandene Entzündung vorgeschlagen. In dieser Studie ergibt sich bei einem Cut-Off-Wert von 7,0 eine Sensitivität von 80,2% und eine Spezifität von 84,0%.



► **Abb. 9** Scatterplot und Histogramm der Auswertung für den Darmabschnitt Sigma. Seo DCE = Seo-Score inklusive kontrastmittelgestützter Bildgebung. Seo DWI = Seo-Score inklusive diffusionsgewichteter Bildgebung.

ROC-Korrelation des Farbindegralwertes mit dem MaRIA-Score

Der Vergleich der integrierten kontrastmittelunterstützten, farbcodierten Auswertung mit dem MaRIA-Score ergab eine gute Übereinstimmung. Zur Optimierung der Sensitivität und Spezifität definierten wir auswertungsspezifische Cut-Off-Werte. Da für die klinische Verlaufsbeurteilung die Sensitivität bei bekannter chronischer Darmerkrankung wichtiger ist, wurde der Cut-Off im Hinblick auf diese gewählt.

Die Fläche unter der Kurve beträgt 0,84. Das Konfidenzintervall liegt bei 0,795–0,888. Der gewählte Cut-Off-Wert von 21 245 erreicht eine Sensitivität von 83,2%, und eine Spezifität von 70,5%. Bei einem Cut-Off-Wert von 27 569 beträgt die Spezifität 85,0% bei einem deutlichen Verlust der Sensitivität (70,6%).

ROC-Korrelation des Farbindegralwertes mit der Endoskopie

Es zeigt sich eine gute Korrelation zwischen den farbcodierten Bildern und den Endoskopiebefunden. Die Fläche unter der Kurve beträgt 0,82. Das Konfidenzintervall liegt bei 0,76–0,88. Die Sensitivität beträgt bei einem Cut-Off-Wert von 22 760 81,3% bei einer Spezifität von 70,5%. ► **Abb. 15** zeigt die entsprechende ROC-Kurve.

Zusammenfassung der wichtigsten Studienergebnisse

Betrachtet man die verschiedenen Auswertungen der diffusionsgewichteten und kontrastmittelgestützten Bildgebung, so lässt sich zusammenfassend sagen, dass sich beide hinsichtlich der Beurteilung des Vorhandenseins einer Entzündung von Darmabschnitten nicht wesentlich unterscheiden. Geht es allein um diese Fragestellung, ist es also möglich, auf eine intravenöse Kontrastmittelapplikation bei der MRT zu verzichten.

Die für diese Studie entwickelte Methode zur semiquantitativen, farbparametrischen Darstellung der Darmwandentzündung zeigt, auch bei wenigen dynamischen Messzeitpunkten, eine gute Sensitivität und Spezifität verglichen mit dem etablierten MaRIA-Score und den endoskopischen Untersuchungen.

Diskussion

Vergleich MR-Scores versus Endoskopie

Seo et al. [15] verglichen bereits die KM-unterstützte mit der diffusionsgewichteten MR-Bildgebung. Über alle Darmabschnitte gemittelt fand sich hier eine gute Korrelation von 0,937. Allerdings wurde die Untersuchung mit 3 Tesla durchgeführt und vor allem das terminale Ileum untersucht.

Wir fanden in unserer Studie im Jejunum einen Korrelationskoeffizienten von 0,854, für das Ileum von 0,822 und für das terminale Ileum von 0,928. Damit sind unsere Ergebnisse mit der Arbeitsgruppe von Seo vergleichbar. Die Studie von Cansu [7] zeigte ebenfalls eine gute Übereinstimmung von DWI und KM-unterstützter MRT. Die Spezifität lag dort etwas höher als in unserer Studie (97,9%), allerdings wurde die Untersuchung mit 3 Tesla durchgeführt und es wurden lediglich Kolon und das terminale Ileum untersucht [7].

Der von Rimola beschriebene MaRIA-Score [14] wurde zum Vergleich mit endoskopischen Befunden entwickelt und korreliert gut mit diesen. Für den MaRIA-Score betrug die Spezifität in unserer Studie 84% und die Sensitivität 80%. Bei einem Cut-Off von 7 waren unsere Daten etwas schlechter als in der Publikation von Rimola (Sensitivität 88%, Spezifität 82%) [14].

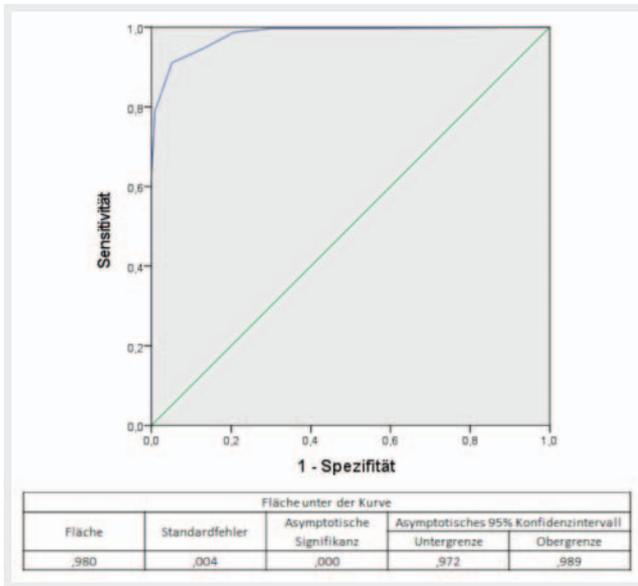
In unserer retrospektiven Auswertung der Endoskopiebefunde nutzten wir einen abgewandelten SES-CD-Score, um eine größere

► **Tab. 3** Korrelationen der einzelnen Darmabschnitte.

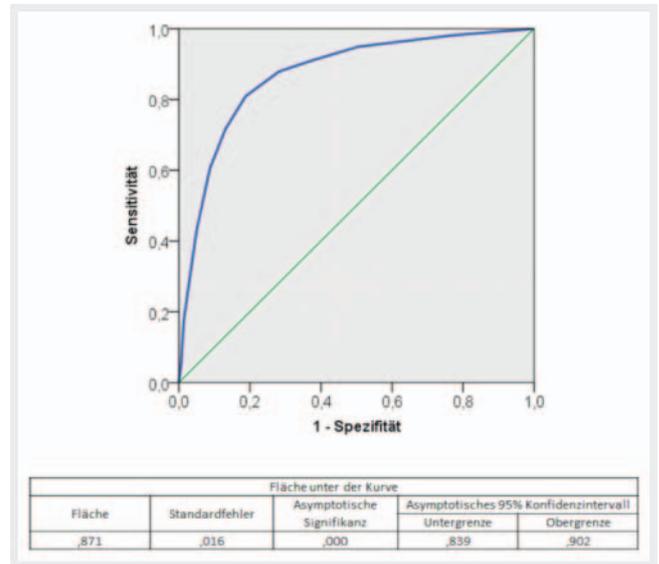
Jejunum			Seo-Score DCE	Seo-Score DWI
Spearman- Rho	Seo-Score DCE	Korrelations-koeffizient	1	0,854**
		Sig. (2-seitig)	.	,000
		N	33	29
	Seo-Score DWI	Korrelations-koeffizient	0,854**	1
		Sig. (2-seitig)	,000	.
		N	29	29
Ileum			Seo-Score DCE	Seo-Score DWI
Spearman- Rho	Seo-Score DCE	Korrelations-koeffizient	1,000	0,822**
		Sig. (2-seitig)	.	,000
		N	151	140
	Seo-Score DWI	Korrelations-koeffizient	0,822**	1,000
		Sig. (2-seitig)	,000	.
		N	140	140
Terminales Ileum			Seo-Score DCE	Seo-Score DWI
Spearman- Rho	Seo-Score DCE	Korrelations-koeffizient	1,000	0,928**
		Sig. (2-seitig)	.	,000
		N	184	172
	Seo-Score DWI	Korrelations-koeffizient	0,928**	1,000
		Sig. (2-seitig)	,000	.
		N	172	172
Colon transversum			Seo-Score DCE	Seo-Score DWI
Spearman- Rho	Seo-Score DCE	Korrelations-koeffizient	1,000	0,892**
		Sig. (2-seitig)	.	,000
		N	93	85
	Seo-Score DWI	Korrelations-koeffizient	0,892**	1,000
		Sig. (2-seitig)	,000	.
		N	85	87
Colon descendens			Seo-Score DCE	Seo-Score DWI
Spearman-Rho	Seo-Score DCE	Korrelations-koeffizient	1,000	0,913**
		Sig. (2-seitig)	.	,000
		N	118	109
	Seo-Score DWI	Korrelations-koeffizient	0,913**	1,000
		Sig. (2-seitig)	,000	.
		N	109	109
Sigma			Seo-Score DCE	Seo-Score DWI
Spearman-Rho	Seo-Score DCE	Korrelations-koeffizient	1,000	0,913**
		Sig. (2-seitig)	.	,000
		N	80	78
	Seo-Score DWI	Korrelations-koeffizient	0,913**	1,000
		Sig. (2-seitig)	,000	.
		N	78	78

** . Korrelation ist signifikant bei 0,01 (2-seitig)

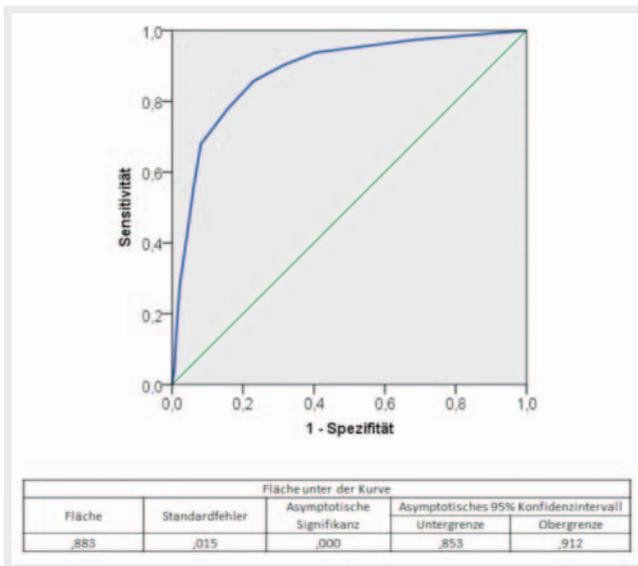
N = Anzahl; Sig. = Signifikanz; Seo-Score DCE = errechneter Seo-Score inklusive kontrastmittelgestützter Aufnahmen; Seo-Score DWI = errechneter Seo-Score inklusive diffusionsgewichteter Aufnahmen



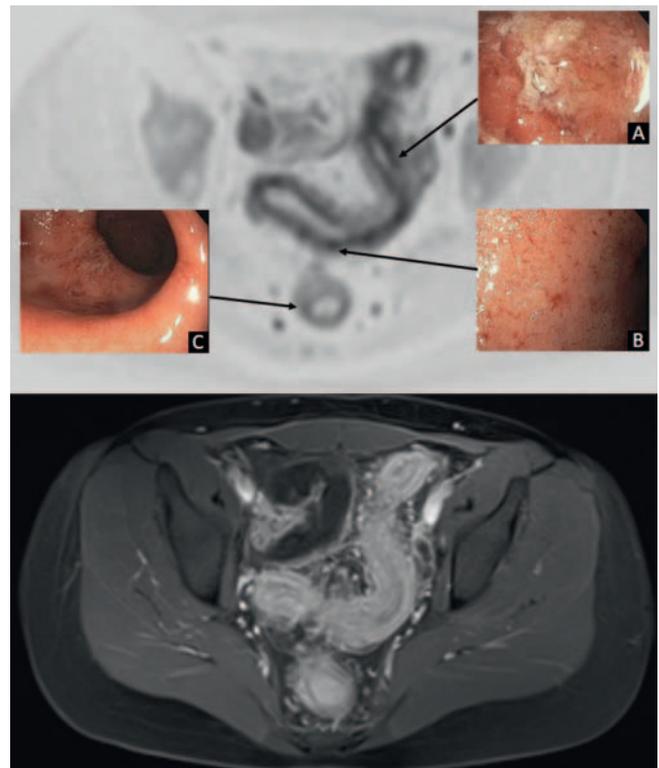
► **Abb. 10** Fläche unter der Kurve ROC-Wert: Seo-Score DCE gegen MaRIA.



► **Abb. 12** ROC-Kurve: Seo DWI gegen Endoskopie.



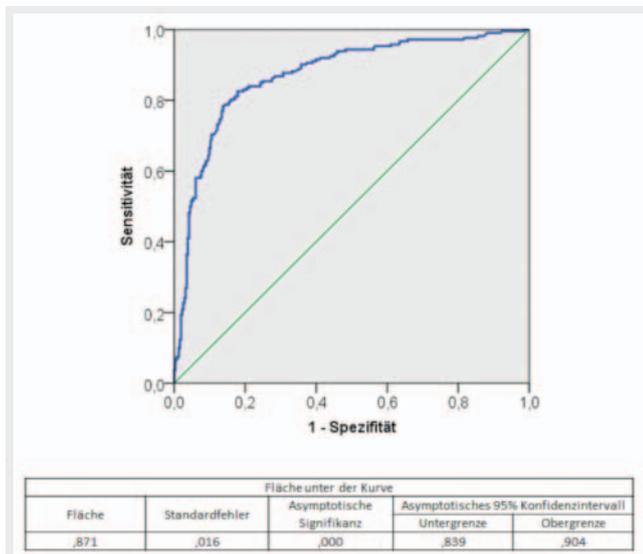
► **Abb. 11** ROC-Kurve: Seo-Score DCE gegen Endoskopie.



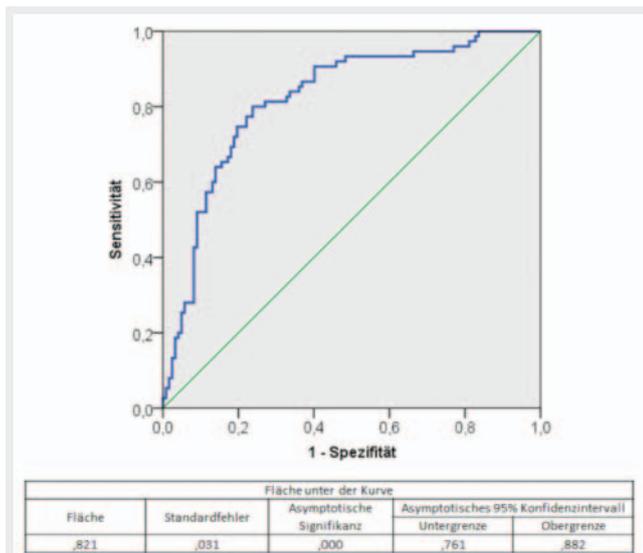
► **Abb. 13** Crohn-Colitis bei einer 23-jährigen Patientin: Vergleich Endoskopie vs. Diffusionsaufnahme: A. proximales Sigma, B. distales Sigma, C. Rectum. Bei A und B in beiden Verfahren deutliche Hinweise auf Entzündung, bei Lokalisation C endoskopisch blanderes Erscheinungsbild im Vergleich zu der deutlich erkennbaren transmuralen Entzündung in der Diffusionsaufnahme. In der kontrastmittelgestützten Aufnahme zeigt sich die massive Entzündung und eindrucksvoller eine kleine Abszedierung.

Konsistenz der Daten zu erreichen [17]. Zusätzlich zu den Koloskopien zogen wir auch Doppelballonendoskopien und Kapselendoskopien zum Vergleich heran, während in den anderen Studien nur das terminale Ileum in die Auswertung einfluss. Zieht man aus unseren Studiendaten nur das terminale Ileum zur Auswertung heran, entsprechen unsere Ergebnisse in etwa den genannten publizierten Ergebnissen. Bei 1,5 Tesla sind Ulzerationen oft schwierig zu erkennen, sodass wir hier die Entzündungsschwere vielleicht unterschätzt haben. 1,5 Tesla-Geräte sind allerdings weiterhin weit verbreitet und spiegeln die im klinischen Alltag genutzten Möglichkeiten gut wider.

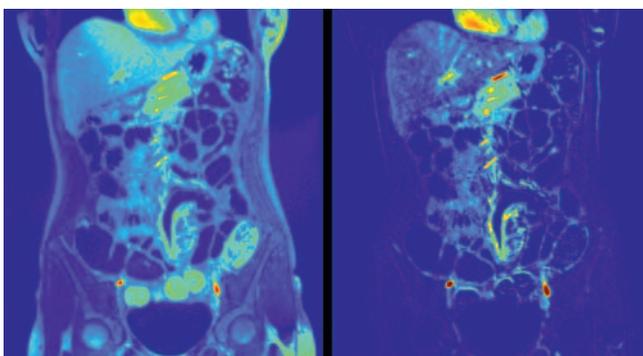
Wir verwendeten den MaRIA-Score zum Vergleich mit Seo, da dieser die höchste Treffsicherheit aufwies [18, 19].



► **Abb. 14** ROC-Kurve: MaRIA-Score gegen Endoskopie.



► **Abb. 15** ROC-Kurve: Farbintegral gegen Endoskopie.



► **Abb. 16** Links parametrische Darstellung der „area under the curve“ ohne Bildersubtraktion. Rechts parametrische Darstellung derselben Strukturen nach erfolgter Bildersubtraktion.

In einem Reviewartikel von Minordi et al. [20] fand sich, beim Vergleich der verschiedenen Studien, eine Bandbreite der Sensitivität im Vergleich zur Endoskopie zwischen 87 % und 64 % und einer Spezifität von 85 % – 81 % ähnlich wie in unserer Untersuchung.

Vergleichsweise lag die Spezifität der DWI-MRT in unserer Studie bei 72 %, die Sensitivität bei etwa 88 %, für die kontrastmittelunterstützte MRT betrug die Spezifität 77 %, die Sensitivität 86 %. Die integrierte kontrastmittelunterstützte, farbcodierte Auswertung zeigte eine Spezifität von 71 % und eine Sensitivität von 81 %.

Trotz der nicht ganz idealen Sensitivität und Spezifität ist die MR-Enterografie aufgrund der kompletten Darstellung des Intestinaltraktes sowie der fehlenden Invasivität in der klinischen Routine für die Diagnostik und Verlaufsbeurteilung von entzündlichen Darmveränderungen eine valide Methode. Insbesondere wenn man die Arbeit von Lee et al. [21] heranzieht. Hier war der Nachweis von entzündlichen Veränderung in der MRT bei unauffälliger Endoskopie sogar mit einer schlechteren Prognose verbunden [21].

Für die Verlaufsbeurteilung entzündlicher Darmwandveränderungen zeigt unsere Studie, dass der Verzicht auf die Kontrastmittelgabe ohne wesentlichen Verlust der Sensitivität möglich ist. Die Detektion von Abszessen ist in Zusammenschau aller akquirierten nativen MRT-Sequenzen zusammen mit der diffusionsgewichteten Bildgebung ebenfalls möglich, war jedoch nicht Gegenstand der Studie.

Um die eine schnelle visuelle Auswertung der MRT-Studien zu vereinfachen, untersuchten wir die Wertigkeit einer Farbdarstellung mithilfe eines Farbintegrals zur semiquantitativen Beurteilung der Entzündungsaktivität. Diese farbparametrische Darstellung wurde unserer Kenntnis nach von uns zum ersten Mal zur Beurteilung von chronisch-entzündlichen Darmerkrankungen entwickelt und genutzt. Es zeigte sich eine gute Sensitivität und Spezifität verglichen mit dem schon etablierten MaRIA-Score und auch verglichen mit den endoskopischen Untersuchungen. Die Detektion von pathologischen Veränderungen wurde von den Untersuchern als einfacher beschrieben. Allerdings bedeutet dies einen erhöhten Arbeitsaufwand aufgrund der aktuell noch notwendigen, manuellen Bearbeitung der MRT-Datensätze. Die farbige Darstellung von entzündlichen Veränderungen könnte mithilfe von KI-Algorithmen sicher vereinfacht werden und wäre für die Verlaufsbeurteilung und Präsentation entzündlicher Veränderungen und deren Schwere im klinischen Alltag von Vorteil.

KLINISCHE RELEVANZ DER STUDIE

- Wir konnten für entzündliche Veränderungen bei M. Crohn eine gute Korrelation zwischen KM- und DWI-MRT-Sequenzen nachweisen.
- Die kontrastmittelfreie DWI-MRT ist besonders für Verlaufsbeurteilungen geeignet.
- Die etablierten MaRIA- und Seo-Scores und die Endoskopie korrelieren gut.
- Der Seo-Score ist in der klinischen Routine einfacher nutzbar, da dort eine visuelle Klassifikation erfolgt.
- Die von uns erstmals eingesetzte integrierte, kontrastmittelunterstützte, farbcodierte Auswertung der MRT-Studien

zeigte eine gute Korrelation mit den etablierten Verfahren und ist eine vielversprechende neue Methode zur semiquantitativen Auswertung von MR-Enterografien.

Interessenkonflikt

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

Literatur

- [1] Griffin N, Grant LA, Anderson S et al. Small bowel MR enterography: problem solving in Crohn's disease. *Insights Imaging* 2012; 3: 251–263. doi:10.1007/s13244-012-0154-3
- [2] Albert JG, Martiny F, Krummener A et al. Diagnosis of small bowel Crohn's disease: a prospective comparison of capsule endoscopy with magnetic resonance imaging and fluoroscopic enteroclysis. *Gut* 2005; 54: 1721–1727. doi:10.1136/gut.2005.069427
- [3] Schreyer AGLD, Koletzko S, Hoffmann JC et al. Aktualisierte S3-Leitlinie zur Diagnostik des M. Crohn – Radiologische Untersuchungstechniken. *RöFo* 2010; 182 (2): 116–121
- [4] Friedrich C, Fajfar A, Pawlik M et al. Magnetic resonance enterography with and without biphasic contrast agent enema compared to conventional ileocolonoscopy in patients with Crohn's disease. *Inflamm Bowel Dis* 2012; 18: 1842–1848. doi:10.1002/ibd.22843
- [5] Golder SK, Schreyer AG, Endlicher E et al. Comparison of capsule endoscopy and magnetic resonance (MR) enteroclysis in suspected small bowel disease. *Int J Colorectal Dis* 2006; 21: 97–104. doi:10.1007/s00384-005-0755-0
- [6] Jensen MD, Nathan T, Rafaelsen SR et al. Diagnostic accuracy of capsule endoscopy for small bowel Crohn's disease is superior to that of MR enterography or CT enterography. *Clin Gastroenterol Hepatol* 2011; 9: 124–129. doi:10.1016/j.cgh.2010.10.019
- [7] Cansu A, Bekircavusoglu S, Oguz S et al. Can diffusion weighted imaging be used as an alternative to contrast-enhanced imaging on magnetic resonance enterography for the assessment of active inflammation in Crohn disease? *Medicine (Baltimore)* 2020; 99: e19202. doi:10.1097/MD.00000000000019202
- [8] Soydan L, Demir AA, Ozer S et al. Can MR Enterography and Diffusion-Weighted Imaging Predict Disease Activity Assessed by Simple Endoscopic Score for Crohn's Disease? *J Belg Soc Radiol* 2019; 103: 10. doi:10.5334/jbsr.1521
- [9] Kim KJ, Lee Y, Park SH et al. Diffusion-weighted MR enterography for evaluating Crohn's disease: how does it add diagnostically to conventional MR enterography? *Inflamm Bowel Dis* 2015; 21: 101–109. doi:10.1097/MIB.0000000000000222
- [10] Stanescu-Siegmund N, Nimsch Y, Wunderlich AP et al. Quantification of inflammatory activity in patients with Crohn's disease using diffusion weighted imaging (DWI) in MR enteroclysis and MR enterography. *Acta Radiol* 2017; 58: 264–271. doi:10.1177/0284185116648503
- [11] Chatterji M, Fidler JL, Taylor SA et al. State of the Art MR Enterography Technique. *Top Magn Reson Imaging* 2021; 30: 3–11. doi:10.1097/RMR.0000000000000263
- [12] Kanda T, Fukusato T, Matsuda M et al. Gadolinium-based Contrast Agent Accumulates in the Brain Even in Subjects without Severe Renal Dysfunction: Evaluation of Autopsy Brain Specimens with Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy. *Radiology* 2015; 276: 228–232. doi:10.1148/radiol.2015142690
- [13] Sardanelli F, Cozzi A, Trimboli RM et al. Gadolinium Retention and Breast MRI Screening: More Harm Than Good? *Am J Roentgenol* 2020; 214: 324–327. doi:10.2214/Am J Roentgenol.19.21988
- [14] Rimola J, Ordas I, Rodriguez S et al. Magnetic resonance imaging for evaluation of Crohn's disease: validation of parameters of severity and quantitative index of activity. *Inflamm Bowel Dis* 2011; 17: 1759–1768. doi:10.1002/ibd.21551
- [15] Seo N, Park SH, Kim KJ et al. MR Enterography for the Evaluation of Small-Bowel Inflammation in Crohn Disease by Using Diffusion-weighted Imaging without Intravenous Contrast Material: A Prospective Noninferiority Study. *Radiology* 2016; 278: 762–772. doi:10.1148/radiol.2015150809
- [16] University of California, Los Angeles/Kyung Sung. Im Internet (Stand: 28.12.2021): http://kyungs.bol.ucla.edu/software/DCE_tool/DCE_tool.html
- [17] Daperno M, D'Haens G, Van Assche G et al. Development and validation of a new, simplified endoscopic activity score for Crohn's disease: the SES-CD. *Gastrointest Endosc* 2004; 60: 505–512. doi:10.1016/s0016-5107(04)01878-4
- [18] Rimola J, Alvarez-Cofino A, Perez-Jeldres T et al. Comparison of three magnetic resonance enterography indices for grading activity in Crohn's disease. *J Gastroenterol* 2017; 52: 585–593. doi:10.1007/s00535-016-1253-6
- [19] Tielbeek JA, Makanyanga JC, Bipat S et al. Grading Crohn disease activity with MRI: interobserver variability of MRI features, MRI scoring of severity, and correlation with Crohn disease endoscopic index of severity. *Am J Roentgenol* 2013; 201: 1220–1228. doi:10.2214/Am J Roentgenol.12.10341
- [20] Minordi LM, Larosa L, Papa A et al. Assessment of Crohn's Disease Activity: Magnetic Resonance Enterography in Comparison with Clinical and Endoscopic Evaluations. *J Gastrointest Liver Dis* 2019; 28: 213–224. doi:10.15403/jgld-183
- [21] Lee JH, Park YE, Seo N et al. Magnetic resonance enterography predicts the prognosis of Crohn's disease. *Intest Res* 2018; 16: 445–457. doi:10.5217/ir.2018.16.3.445

ERRATUM

Erratum zu Jakob M, Backes M, Schaefer C et al. MR Enterography in Crohn's Disease: Comparison of Contrast Imaging with Diffusion-weighted Imaging and a special Form of Color Coding. *Fortschr Röntgenstr* 2022; DOI 10.1055/a-1826-0049

Der erste Satz der Abbildungslegende zu Abbildung 1 wurde am 27.09.2022 geändert. Richtig ist: KM Aufnahme und parametrische Darstellung der „area under the curve“ mit erfolgter Bildersubtraktion.