

AUS DEM LEHRSTUHL FÜR RÖNTGENDIAGNOSTIK
DIREKTOR: PROF. DR. CHRISTIAN STROSZCZYNSKI
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

Sequenzbeurteilung und Diagnostische Stabilität der MR-Enterographie

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin (Dr.med.)

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Matthias Michael Bauer

2011

AUS DEM LEHRSTUHL FÜR RÖNTGENDIAGNOSTIK
DIREKTOR: PROF. DR. CHRISTIAN STROSZCZYNSKI
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

Sequenzbeurteilung und Diagnostische Stabilität der MR-Enterographie

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin (Dr.med.)

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Matthias Michael Bauer

2011

Dekan: Prof. Dr. Bernhard Weber

1.Berichterstatter: PD Dr. Andreas Schreyer

2.Berichterstatter: Prof. Dr. Andreas Schäffler

Tag der mündlichen Prüfung: 14.04.2011

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	9
1.1 Grundlagen	10
1.1.1 Ätiologie, Epidemiologie und Erscheinungsformen der CED	10
1.1.1.1 Colitis ulcerosa	10
1.1.1.2 Morbus Crohn	10
1.2 Untersuchungsmethoden	11
1.2.1 Anamnese	11
1.2.2 Körperliche Untersuchung	12
1.2.3 Labordiagnostik	12
1.2.4 Aktivitätsindex	13
1.2.5 Endoskopie	15
1.2.5.1 Klassische endoskopische Verfahren	15
1.2.5.1.1 Ösophagogastroduodenoskopie	15
1.2.5.1.2 Ileokoloskopie	15
1.2.5.1.3 Sigmoidoskopie und Rektoskopie	16
1.2.5.2 Videokapselendoskopie	16
1.2.5.3 Doppelballonendoskopie	17
1.2.5.4 Virtuelle CT- oder MRT-Endoskopie	17
1.2.6 Histologische Befunde bei CED	18
1.2.7 Sonographie	19
1.2.7.1 Konventionelle Abdomen-Sonographie	21
1.2.7.2 Power Sonographie	22
1.2.7.3 Kontrastmittel-verstärkte Sonographie	22
1.2.8 Konventionelle Radiologie	22
1.2.8.1 Abdomen-Übersichtsaufnahme	23
1.2.8.2 Konventionelles Enteroklysma (Untersuchung nach Sellink)	23
1.2.8.3 Magen-Darm-Passage	24
1.2.8.4 Kolon-Kontrastmittel-Einlauf	25
1.2.9 Computertomographie	25

1.2.9.1	Spiral-CT	26
1.2.9.2	CT-Enterographie/-Enteroklysma	26
1.2.10	Magnetresonanztomographie	27
1.2.10.1	Physikalische Grundlagen des Kern-Resonanz-Phänomens	27
1.2.10.2	Relaxation.....	29
1.2.10.2.1	Longitudinale Relaxation T1	29
1.2.10.2.2	Transversale Relaxation T2 und T2*	30
1.2.10.3	Bildkontrast	31
1.2.10.3.1	Repetitionszeit TR und T1-Wichtung	32
1.2.10.3.2	Echozeit TE und T2-Wichtung	32
1.2.10.3.3	Pulswinkel, Sättigung und Vorsättigung	32
1.2.10.4	Schichtwahl und Ortskodierung	33
1.2.10.5	Aufbau eines Magnetresonanztomographen	35
1.2.10.6	MRT-Enterographie/-Enteroklysma.....	36
2	Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	37
3	Methodik	38
3.1	Patientenkollektiv	38
3.2	MR-Untersuchungsablauf	38
3.3	Befundung und Auswertung	40
3.4	Statistische Methoden	42
4	Ergebnisse	43
4.1	Bewertung der Bildqualität	43
4.1.1	Bewertungen Radiologe 1	45
4.1.1.1	Gesamtreihenfolge der Sequenzen für Radiologe 1	45
4.1.1.2	Reihenfolge der Sequenzen im Jejunum für Radiologe 1	48
4.1.1.3	Reihenfolge der Sequenzen im Ileum für Radiologe 1	49
4.1.1.4	Reihenfolge der Sequenzen im terminalen Ileum für Radiologe 1	50
4.1.2	Bewertungen Radiologe 2	52
4.1.2.1	Gesamtreihenfolge der Sequenzen für Radiologe 2	52
4.1.2.2	Reihenfolge der Sequenzen im Jejunum für Radiologe 2	54
4.1.2.3	Reihenfolge der Sequenzen im Ileum für Radiologe 2	55
4.1.2.4	Reihenfolge der Sequenzen im terminalen Ileum für Radiologe 2	56
4.1.3	Bewertungen Radiologe 3	58

4.1.3.1	Gesamtreihenfolge der Sequenzen für Radiologe 3	58
4.1.3.2	Reihenfolge der Sequenzen im Jejunum für Radiologe 3	60
4.1.3.3	Reihenfolge der Sequenzen im Ileum für Radiologe 3	61
4.1.3.4	Reihenfolge der Sequenzen im terminalen Ileum für Radiologe 3	62
4.1.4	Bewertungen Radiologe 4	64
4.1.4.1	Gesamtreihenfolge der Sequenzen für Radiologe 4	64
4.1.4.2	Reihenfolge der Sequenzen im Jejunum für Radiologe 4	66
4.1.4.3	Reihenfolge der Sequenzen im Ileum für Radiologe 4	67
4.1.4.4	Reihenfolge der Sequenzen im terminalen Ileum für Radiologe 4	68
4.2	Übereinstimmung der Untersucher im Kriterium Bildqualität	70
4.2.1	Nach vergebenen Bewertungen.....	70
4.2.2	Nach sich ergebenden Rängen	70
4.3	Beurteilung der Kriterien „Vorliegende Entzündung“, „Pathologische Lymphknoten“ und Distension	71
4.3.1	Übereinstimmung der Radiologen im Kriterium „Vorliegende Entzündung“	73
4.3.2	Übereinstimmung der Radiologen im Kriterium „Pathologische Lymphknoten“	74
4.3.3	Übereinstimmung der Radiologen im Kriterium „Distension“	74
5	Diskussion	76
5.1	Auswertung der erzielten Ergebnisse	76
5.1.1	Rangfolge der Sequenzprotokolle im Kriterium „Bildqualität“	76
5.1.2	Übereinstimmung der Befundungen der vier Untersucher	77
5.1.2.1	Kriterium Entzündung	78
5.1.2.2	Kriterium Lymphknoten	78
5.1.3	Beurteilung der technischen Qualität anhand der erzielten Distension.....	78
5.2	Vergleich der Ergebnisse mit aktueller Literatur	78
5.2.1	Jeff Fidler, MR Imaging of the Small Bowel.....	80
5.2.2	Damian J. M. Tolan et al., MR Enterographic Manifestations of Small Bowel Crohn Disease	80
5.2.3	Nicholas Gourtsoyiannis et al., MR enteroclysis protocol optimization: comparison between 3D FLASH with fat saturation after intravenous gadolinium injection and true FISP sequences.....	81
5.2.4	C. Hohl et al., Diagnostik chronisch entzündlicher Darmerkrankungen bei Kindern und Jugendlichen: MRT mit True-FISP als neuer Goldstandard?	82

5.2.5	Gabriele Masselli et al., Assessment of Crohn's disease in the small bowel: prospective comparison of magnetic resonance enteroclysis with conventional enteroclysis	83
5.2.6	Gabriele Masselli et al., Comparison of MR enteroclysis with MR enterography and conventional enteroclysis in patients with Crohn's disease	84
5.3	Anmerkungen zu und Wertung der vorliegenden Arbeit	85
6	Zusammenfassung	87
7	Abkürzungen	89
8	Tabellenverzeichnis	92
9	Abbildungsverzeichnis	95
10	Literaturverzeichnis	96
11	Danksagung	101
12	Erklärung	102

1 Einleitung

Seit Beginn des 19. Jahrhunderts wird das Auftreten von Chronisch Entzündlichen Darmerkrankungen (CED) – in ihren beiden Ausprägungsformen Colitis ulcerosa und Morbus Crohn - zunehmend beobachtet [49]. Der Verlauf beider Erkrankungen – deren Altersgipfel zwischen dem 20. und 30. Lebensjahr liegt – ist meist chronisch-rezidivierend, mit schwankendem Aktivitätsgrad. Da der Bildgebung bei der Diagnostik und der Verlaufsbeobachtung der CED eine wichtige Rolle zukommt, ist es entscheidend, über bildgebende Verfahren zu verfügen, die folgende Anforderungen erfüllen:

- Geringe Nebenwirkungen für den Patienten
- Hohe Akzeptanz durch den Patienten, aufgrund geringer subjektiver Belastungen
- Gute Beurteilbarkeit bzgl. des Krankheitsverlaufs
- Gute Reproduzierbarkeit der Befunde
- Einfache technische Durchführung.

Als aktuelle radiologische bildgebende Verfahren existieren die Koloskopie, konventionelle radiologische Doppelkontrastverfahren, Sonographie, Computertomographie, Multidetektor-Computertomographie und schließlich die Magnetresonanztomographie. Da alle vorgenannte Untersuchungsmethoden eigene Vor- und Nachteile aufweisen, wurde in der aktuellen Leitlinie zur Diagnostik des Morbus Crohn festgehalten, dass nicht eine einzelne Untersuchung als Goldstandard definiert werden kann [11].

Und dennoch ist die Magnetresonanztomographie – wo verfügbar – als die wichtigste bildgebende Methode anzusehen, scheint sie doch nahezu vollständig die vorstehend definierten Anforderungen zu erfüllen.

Wieweit dieser Erfüllungsgrad im Einzelnen reicht, ist noch in entsprechenden Untersuchungen zu beweisen, da die Durchführung einer MRT im Rahmen der CED-Diagnostik noch ein relativ junges Verfahren ist [48].

1.1 Grundlagen

Eine unspezifische chronisch-entzündliche Erkrankung des Darms wird nach Zusammenschau der wesentlichen Befunde als Colitis ulcerosa oder als Morbus Crohn klassifiziert. Eine dritte Bezeichnung – Colitis indeterminata – wird verwendet, wenn keine klare Zuordnung zu einer der beiden Hauptformen möglich ist. Sehr ähnlich sind sich beide Erkrankungen in der klinischen Erscheinung, bei der anzuwendenden Diagnostik und Therapie, sowie auch bei oft anzutreffenden extraintestinalen Begleiterkrankungen [6, 30].

1.1.1 Ätiologie, Epidemiologie und Erscheinungsformen der CED

1.1.1.1 Colitis ulcerosa

Die Ätiologie der Colitis ulcerosa ist noch immer weitgehend unbekannt, erscheint aber multifaktoriell bedingt. Neben in den letzten Jahren identifizierten genetischen Bausteinen scheinen auch Umwelteinflüsse mitursächlich zu sein: Untersuchungen liegen hier bereits für verschiedenste Faktoren vor: Ernährung, Medikamente, Stress, sozialer Status und Infektionen [8, 14, 29, 33].

Die in Schüben verlaufende entzündliche Erkrankung beginnt stets im Rektum und breitet sich bei etwa der Hälfte der betroffenen Patienten nach proximal fort und kann in ganz wenigen Fällen als sog. „backwash ileitis“ noch das terminale Ileum erreichen; befallen sind Mukosa und Submukosa.

Die jährliche Inzidenz liegt – je nach Studie und untersuchter Region - bei 0,5 bis 24,5 Fällen je 100000 Einwohner weltweit. Bevorzugt tritt die Erkrankung in Nordamerika, in Nord- und Westeuropa auf. Nur eine geringe Bedeutung hat die Erkrankung in Südamerika und Asien. Die Geschlechter scheinen relativ homogen betroffen, mit vielleicht einer gering höheren Zahl an männlichen Erkrankten. Die höchste Inzidenz weist die Altersgruppe zwischen dem 15. und 30. Lebensjahr auf, wobei erste Symptome bei fast der Hälfte der Betroffenen bereits früher auftreten [15, 16].

1.1.1.2 Morbus Crohn

Vieles bereits bei der Colitis ulcerosa gesagtes gilt auch für den Morbus Crohn. Die Erkrankung beginnt überwiegend im jüngeren Erwachsenenalter und verläuft oft schubweise.

Lokalisiert ist die entzündliche Erkrankung aller Darmwandschichten meist in den distalen Ileumsegmenten; sie kann aber auch – üblicherweise diskontinuierlich („skip lesions“) - den gesamten Gastrointestinaltrakt inklusive der Mundhöhle in unterschiedlichem Ausmaß befallen, neben dem Ileum am häufigsten das Colon.

Die Inzidenz liegt etwa bei 0,8 bis 9,8 Fällen je 100000 Einwohner in Europa und bei 3,1 bis 14,6 Fällen je 100000 Einwohner in Nordamerika; auch beim Morbus Crohn ist die Verteilung nicht eindeutig geschlechterspezifisch, Frauen scheinen vielleicht gering häufiger betroffen zu sein [10, 15, 18, 40].

1.2 Untersuchungsmethoden

In der aktuellen Leitlinie zur Diagnostik der CED wird ausdrücklich erwähnt, dass es nicht eine einzelne Untersuchungsmethode gibt, die als Goldstandard zur Diagnosestellung dienen kann. Vielmehr ist die Zusammenschau der einzelnen Untersuchungen - klinischer und laborchemischer Befunde, bildgebender Verfahren und der histologischen Ergebnisse – zur Sicherung der Diagnose CED und zur Festlegung der jeweiligen Unterform notwendig [11].

1.2.1 Anamnese

Erste Anhaltspunkte für die Diagnose CED und auch für die Unterscheidung der beiden Formen der Erkrankung liefert bereits die Anamnese. Die an Colitis ulcerosa erkrankten Patienten beklagen folgende Symptome: blutige, evtl. schleimige Stühle und Durchfälle, teils von viszeralen Schmerzen begleitet, lokalisiert im Bereich des kleinen Beckens, im Verlauf des Colons oder auch in der Iliosakralregion; Gewichtsverlust, Übelkeit, Appetitlosigkeit und Fieber sind weitere Beschwerden. Häufig sind auch extraintestinale Manifestationen wie Iridozyklitis und Polyarthrit.

Morbus Crohn-Patienten beklagen am häufigsten Abdominalschmerzen (viszeraler Schmerzcharakter, entsprechend dem Entzündungsort lokalisiert), intermittierende blutige Durchfälle und Fieber. Oft ist aber auch die perianale Fistelbildung und ihre Symptome (Kotschmierer, verschmutzte Unterwäsche, Missempfinden im Analbereich) Auslöser des Arztbesuchs. Weitere Symptome, die beklagt werden sind Übelkeit, Erbrechen, Appetitlosigkeit, Gewichtsverlust und allgemeine Schwäche [4].

1.2.2 Körperliche Untersuchung

Mit zunehmender Ausdehnung des entzündlich veränderten Bereichs, verschlechtert sich auch das Befinden der Colitis-Patienten. Aufgrund einer Anämie durch den perianalen Blutverlust wirken die Patienten blass. Das Abdomen ist weich, jedoch im Bereich des entzündeten Darmabschnitts druckschmerzhaft. Bei der rektalen Untersuchung findet sich frisches, hellrotes Blut am Fingerling. Weiterhin finden sich Haut- und Mundschleimhautveränderungen; Erythema nodosum, Pyoderma gangraenosum oder aphthöse Ulzerationen im Mund können den Erkrankungsverdacht weiter erhärten.

Ein ähnlicher Befund findet sich auch bei den am Morbus Crohn erkrankten Patienten: das blasse, anämische Aussehen ist auch hier zu finden, begleitet möglicherweise von Trommelschlegelfingern und Weißnägeln. Bei der Untersuchung des Abdomens der häufig auch untergewichtigen Patienten finden sich oft schmerzhaft Resistenzen. Perianale Fisteln und ein Erythema nodosum können weiterhin zur Diagnose beitragen.

1.2.3 Labordiagnostik

Die Laborbestimmungen im Rahmen der Diagnostik bzw. der Verlaufsbeurteilung der CED haben mehrere Gründe: zum einen soll der Aktivitätsgrad der Erkrankung beurteilt werden, zum anderen sind Anämien und Mangelzustände auszuschließen und weiterhin ist es Ziel, Komplikationen frühzeitig zu erkennen.

Zum Erkennen von Anämien und von Mangelzuständen reicht meist das Routine-Labor aus, ggfs. ergänzt durch Bestimmung der Laborwerte aus dem Eisenstoffwechsel – dem häufigsten Mangellement bei CED.

Zur Beurteilung des Aktivitätsgrades hat sich die Bestimmung des CRP bewährt. Dieser Wert ist zwar nicht spezifisch für eine vorliegende CED, zeigt aber gerade beim Morbus Crohn eine hohe Korrelation mit der entzündlichen Aktivität der Erkrankung. Zu beachten ist aber, dass die CRP-Werte in den Grenzbereichen der Aktivitätsgrade (geringe zu mäßiger und mäßige zu schwerer entzündlicher Aktivität) über einen gewissen Wertebereich überlappen. Des Weiteren ist die Aussagekraft bei der Colitis ulcerosa eingeschränkt, da nur bei ca. 50-60% der Patienten eine gesteigerte Krankheitsaktivität auch mit einem erhöhten CRP einhergehen [37, 44].

Neben der CRP-Bestimmung etablieren sich langsam auch neuere Untersuchungen, so besonders die fäkale Calprotectin- und Lactoferin-Bestimmung. Beide Werte sind direkt mit der entzündlichen Aktivität assoziiert und lassen eine Abgrenzung zum Reizdarmsyndrom zu.

Eine Unterscheidung zwischen den beiden wichtigsten Unterformen der CED ist jedoch nicht möglich; ebenso lassen sich nach bisher vorliegenden Daten keine Vorhersagen zum Verlauf der Erkrankung treffen. Da die Probengewinnung ohne Aufwand möglich ist, haben sich beide Untersuchungen gerade bei der Verdachtsdiagnose CED bei Kindern bewährt.

Eine letzte unverzichtbare Untersuchung ist die mikrobiologische Untersuchung des Stuhls zum Ausschluss begleitender oder ursächlicher Infektionen. So zeigt sich bei ca. 21% der Patienten bei Diagnosestellung CED eine begleitende Infektion, die unbehandelt in einen chronischen Verlauf münden kann. Im Verlauf der Erkrankung kann es zur Vortäuschung von Erkrankungsschüben kommen, verursacht durch eine Darminfektion; häufig ist diese verursacht durch Clostridium difficile oder bei systemischer Cortisontherapie oder immunsuppressiver Therapie durch das Cytomegalie-Virus [26].

Weitere Untersuchungen, wie genetische Tests oder serologische Marker haben sich noch nicht etabliert, da ihr Vorteil gegenüber den vorgenannten Untersuchungen noch nicht sicher belegt sind [45, 46].

1.2.4 Aktivitätsindex

Der CDAI besteht aus acht klinischen Parametern, die unterschiedlich gewichtet werden und in ihrer Summe einen Wert zwischen 0 und 600 annehmen.

Symptom	Beschreibung	Wert	Faktor
Anzahl weicher Stühle	In den vergangenen 7 Tagen		X 2
Bauchschmerzen	Werte der vergangenen 7 Tage addiert	0 = keine 1 = leicht 2 = mittel 3 = stark	X 5
Allgemeinbefinden	Werte der vergangenen 7 Tage addiert	0 = gut 1 = beeinträchtigt 2 = schlecht 3 = sehr schlecht 4 = unerträglich	X 7

Extraabdominelle Komplikationen	Anzahl der zutreffenden Komplikationen aus nebenstehender Liste	<ul style="list-style-type: none"> • Gelenkbeteiligung (Gelenkschmerzen, Arthritis) • Augenbeteiligung (Iritis, Uveitis) • Erythema nodosum • Pyoderma gangraenosum • Stomatitis aphthosa • perianaler Befall (Analfissur, perianale Fistel oder perianale Abszesse) • Andere Fisteln • Erhöhte Körpertemperatur (>37,8 °C) 	X 20
Medikamentöse Behandlung von Diarrhoen		0 = nein 1 = ja	X 30
Abdominelle Resistenz		0 = nein 2 = fraglich 5 = sicher	X 10
Hämatokrit	Abweichung von 47% bei Männern bzw. 42.5% bei Frauen	47 bzw. 42.5 – aktueller Hkt.	X 6
Körpergewicht	Prozentuale Abweichung vom Standardgewicht	(Std. Gew. – akt. Gew. / Std. Gew.) x 100	X 1

Tabelle 1: Berechnung des CDAI nach Best

Das Ziel ist es, ohne zu großen Aufwand eine Identifikation oder zumindest eine Abschätzung verschiedener Erkrankungsstadien – Remission oder aktive Erkrankung - zu erreichen. Die Grenze zwischen Remission und aktiver Erkrankung liegt bei 150 und zwischen aktiver zu sehr schwerer Erkrankung bei 450. Die Grenzen sind nicht als Fixum, sondern eher fließend zu betrachten [2, 20, 38].

Weitere Indices - zum Teil mit einem vergrößerten, zum Teil einem verkleinerten Umfang der bewerteten Elemente oder auch in Anpassung an eine bestimmte Untersuchungstechnik entworfen - sind in Gebrauch. In ihrem Ursprung leiten sich diese jedoch alle vom oben dargestellten CDAI nach Best ab.

1.2.5 Endoskopie

1.2.5.1 Klassische endoskopische Verfahren

Durch Verwendung entsprechender Endoskope können die interessierenden und dem Endoskop zugänglichen Anteile des Verdauungstraktes direkt inspiziert werden. Nebenbei ist auch eine Intervention – hier besonders wichtig die Gewinnung von Biopsien zur histologischen Untersuchung – möglich.

Die Verdachtsdiagnose Morbus Crohn erfordert eine Untersuchung des gesamten, endoskopisch zugänglichen Gastrointestinaltrakts, also Colon, terminales Ileum und oberer Gastrointestinaltrakt bis zum unteren Duodenalknie. Gleichzeitig ist aus allen Bereichen eine Probennahme für die histologische Untersuchung erforderlich.

Eine histologische Sicherung der Colitis ulcerosa erfordert zunächst nur Proben aus dem Rektum, da die Erkrankung stets hier ihren Beginn nimmt. Nur bei unsicheren Befunden sind Proben auch aus den weiteren Abschnitten des Gastrointestinaltraktes erforderlich [13].

1.2.5.1.1 Ösophagogastroduodenoskopie

Eine ÖGD ist Bestandteil der Primärdiagnostik eines jeden Patienten mit Verdacht auf eine vorliegende entzündliche Darmerkrankung, sofern nicht bereits in der Ileokoloskopie eine vorliegende Colitis ulcerosa sicher diagnostiziert werden konnte. So kann das vollständige Befallsmuster der Erkrankung dokumentiert werden. Die histologische Untersuchung von Biopsien aus fokalen Gastritisherden kann die Diagnose Morbus Crohn sichern, gerade auch bei unklaren Befunden aus den Colon-Biopsien.

1.2.5.1.2 Ileokoloskopie

Entscheidende Bedeutung kommt dieser endoskopischen Untersuchung bei der Colitis ulcerosa zu; durch den ausnahmslosen Beginn im Enddarm ist die Erkrankung sicher der

Endoskopie zugänglich und kann durch Biopsien und deren histologische Untersuchung gesichert werden, ebenso sind so Informationen zu Aktivität und Ausdehnung zu gewinnen. Aber auch beim Morbus Crohn ist die Ileokoloskopie ein unabdingbarer Baustein der Primär-Diagnostik. Nur im Rahmen dieser endoskopischen Untersuchung ist es möglich, die dringend erforderlichen Biopsien aus offensichtlich befallenen, wie auch aus blanden Bereichen zu entnehmen und eine sichere Diagnosestellung und Aktivitätsbeurteilung zu erreichen [3].

1.2.5.1.3 Sigmoidoskopie und Rektoskopie

Beide Verfahren sind zur Verlaufskontrolle von nur im distalen Colon lokalisierten Läsionen geeignet. Die Untersuchungen sind schnell und mit geringem Aufwand möglich, da nur ein Einlauf und kein vollständiges Abführen des Patienten erforderlich ist. Jedoch wird die Untersuchung von nicht sedierten Patienten durchaus als unangenehm empfunden, gerade bei Verwendung des starren Rektoskops. Nachteilig ist weiterhin, dass untersuchungsbedingt die proximal gelegenen Darmabschnitte nicht betrachtet werden können: ein „Springen“ der entzündlichen Veränderungen in einen höher gelegenen Abschnitt kann somit zunächst übersehen werden. Auch ist die Perforationsgefahr durch die Verwendung des starren Rektoskops nicht zu vernachlässigen.

1.2.5.2 Videokapselendoskopie

Hierbei handelt es sich um ein neues, nichtinvasives endoskopisches Verfahren. Nach ca. 12stündiger Nüchternheit schluckt der zu untersuchende eine Videokapsel. Diese sendet an ein tragbares Empfangssystem zwei Bilder/Sekunde, während sie den gesamten Magen-Darm-Trakt passiert, bewegt durch die natürliche Peristaltik.

Handhabung und Durchführung verursachen wenig Aufwand, die Akzeptanz der Patienten ist sehr hoch und die Komplikationsrate ist sehr niedrig. Weiterhin fehlt eine Strahlenbelastung völlig. Nachteilig ist es, dass Strikturen und Obstruktionen die Anwendung verbieten, um eine Retention der Videokapsel zu vermeiden. Daher muss bereits im Vorfeld der Untersuchung das Vorliegen einer entsprechenden Engstelle durch ein geeignetes anderes diagnostisches Verfahren ausgeschlossen werden.

Eine genaue Lokalisation von Läsionen ist in der Videoendoskopie nicht möglich. Eine Steuerung von Außen zur gezielten Darstellung interessierender Bereiche bzw. bei

beschleunigter Transitzeit oder nicht optimaler Ausrichtung der Kamera ist ebenfalls nicht möglich. Weiterhin kann kein Einfluss auf die Sichtverhältnisse durch Spülung oder Luftinsufflation genommen werden. Erwähnt werden muss auch der hohe Zeitaufwand für die Auswertung des aufgenommenen Filmmaterials.

Ein großer Vorteil dieses kostenintensiven Verfahrens bei der Diagnostik der CED ist gerade beim Morbus Crohn die detaillierte Darstellung der Darmschleimhaut-Oberfläche in von der Endoskopie nicht erreichbaren Darmabschnitten [1].

1.2.5.3 Doppelballonendoskopie

Bis vor kurzem noch war der ca. 6m lange Dünndarm der direkten endoskopischen Untersuchung und Intervention nicht zugänglich. Dies änderte sich Anfang 2000 mit der Einführung der in Japan entwickelten Doppelballonendoskopie. Hierfür wird ein besonders dünnes und langes Endoskop mit einem so genannten Übertubus verwendet; Übertubus und Endoskop verfügen beide über einen von außen aufblasbaren Ballon an der Spitze. Durch wechselndes Aufblasen und Entleeren der beiden Ballone und dabei Vorschieben bzw. auch zurückziehen von Endoskop und Übertubus wird der Dünndarm ziehharmonikaartig „aufgefädelt“. Ein Arbeitskanal am Endoskop ermöglicht Probenentnahmen oder therapeutische Maßnahmen.

Die etwa einstündige Untersuchung erfolgt am sedierten Patienten üblicherweise ab oral; jedoch kann bei eher distal vermuteten Läsionen auch der per anale Zugang gewählt werden. Zur Durchführung der Doppelballonendoskopie muss der Patient nüchtern und vollständig abgeführt sein [31, 50].

1.2.5.4 Virtuelle CT- oder MRT-Endoskopie

Es handelt sich um eine dreidimensionale Rekonstruktion des gesamten Magen-Darm-Trakts oder eines interessierenden Abschnitts aus CT- oder MRT-Bildern. Die Kolonographie ist hier das derzeit am weitesten entwickelte Verfahren.

Wie auch beim konventionellen Enteroklysma finden sich in der Schnittbild-Enterographie typische Befunde für die Unterformen der CED. Beim Morbus Crohn sind dies:

- entzündlich-ödematöse Darmschwellung mit Abnahme, Distanzierung und Verbreiterung der Kerckringfalten
- Die Darmwand erscheint verdickt

- Aphthoide Ulzerationen: Vorwölbungen mit zentralem Kontrastmittel-Depot (Schießscheibenaspekt)
- Pflastersteinrelief (knötchenförmige Kontrastmittel-Aussparungen) der Mukosa durch lymphonoduläre Hyperplasien
- Stenotische „skip lesions“ neben „string signs“ (durch Hypersekretion eng gestellte Areale)
- Fibrosierung der befallenen Abschnitte bei Fortschreiten der Erkrankung mit starrer Darmwand, Einengung des Lumens und verlorener Haustrierung
- Im Spätsstadium finden sich Stenosen mit prästenotischer Dilatation, Pseudodivertikeln und starker Distendierung der Darmschlingen.

Die Colitis ulcerosa ist durch folgende Befunde gekennzeichnet:

- Samtartiger Beschlag des Darmwandreliofs
- Getüpfelte Mukosa (punktförmige Kontrastmitteldepots) als Folge von feinen Schleimhautulzerationen
- Kolbenartige, größere „Kragenknochenulzera“
- Schleimhautödem führt zur Abflachung der Haustrierung
- Pseudopolypöses Bild durch das Nebeneinander von Ulzera und erhaltenen Schleimhautinseln
- Im chronischen Stadium kommt es schließlich zum Verlust der Haustrierung und Ausbildung eines starren, engen Darmrohrs („Fahrradschlauchbild“)

Vorteil der Schnittbildtechniken ist es, dass neben dem eigentlichen Gastrointestinaltrakt auch die extraluminale Strukturen dargestellt und beurteilt werden können. So können die mesenteriale Lymphknoten diagnostisch gewertet werden. Weiterhin können Fisteln und Abszesse diagnostiziert werden: Fisteln stellen sich als bandförmige extraluminale Kontrastmitteldepots dar. Abszesse erscheinen als zentral hypodense Raumforderungen mit hyperdensem Randwall, Lufteinschlüsse sind schließlich endgültig beweisend [21].

1.2.6 Histologische Befunde bei CED

Zur pathomorphologischen Diagnostik sind multiple Biopsien aus dem terminalen Ileum, allen Kolonsegmenten und dem Rektum erforderlich, ggfs. ergänzt durch Magenschleimhautbiopsien. Aus jeder Region sollten mindestens zwei Proben vorliegen,

sowohl aus befallenen wie auch aus blanden Bereichen. Neben dem Befallsmuster ist eine Unterscheidung anhand des histologischen Bildes der Darmentzündung möglich: während die Colitis ulcerosa lediglich die Schleimhaut betrifft, sind beim Morbus Crohn alle Wandschichten durch entzündliche Veränderungen betroffen.

Histologisch zeigt sich im floriden Stadium der Colitis ulcerosa eine granulozytäre Entzündung mit einer Rarefizierung der Becherzellen. Häufig finden sich auch sogenannte Kryptenabszesse, die allerdings auch bei anderen Entzündungen gefunden werden. Im Remissionsstadium findet sich bisweilen eine vollständige Normalisierung der Schleimhaut, es kann aber auch zu einer Schleimhautatrophie mit Rarefizierung der Kryptenarchitektur, Verdünnung der Schleimhaut und isoliert wachsenden entzündlichen Pseudopolypen kommen. Nach lang anhaltender Colitis findet man in unregelmäßig begrenzten, beetartig erhabenen oder flachen, perlmuttartig diskolorierten oder samtähnlichen Bezirken Epitheldysplasien. Diese sind eng mit dem Auftreten von Karzinomen verknüpft.

Bei der Untersuchung von Schleimhautproben von an Morbus Crohn erkrankten Patienten findet man anfänglich unspezifische entzündliche Reaktionen, dann flache Schleimhautgeschwüre (sog. apthoide Ulzera) mit histologisch erkennbaren Granulomen, eventuell mit Langhans-Riesenzellen. In späteren Stadien erscheinen Muskulatur und Serosa der Darmwand hypertrophiert, das mesenteriale und parakolische Fettgewebe ist entzündlich infiltriert [10].

	Morbus Crohn	Colitis ulcerosa
Tiefe des Befalls	transmural	Mukosa und Submukosa
Granulome	häufig	selten
Kryptenabszesse	selten	häufig
Malignome	selten (Dünndarm)	Gelegentlich (Colon)

Tabelle 2: Histologische Befunde bei CED

1.2.7 Sonographie

Das Prinzip der Ultraschalluntersuchung beruht auf der Aussendung von Ultraschall und der unterschiedlichen Reflektion, Brechung und Absorption der Schallwellen durch die

verschiedenen Gewebe und Stoffe im Körper des Menschen. Ultraschall besteht aus hochfrequenten Schallwellen oberhalb der menschlichen Wahrnehmungsgrenze von 20 kHz. Für die medizinische Diagnostik wird ein Frequenzspektrum zwischen 1 und 15 MHz verwendet. Eine niedrige Frequenz bietet eine größere Eindringtiefe, dafür aber eine schlechtere Ortsauflösung; höhere Frequenzen verhalten sich entgegengesetzt. Für jede Untersuchung ist somit bei der Wahl der Schallfrequenz ein Kompromiss aus Eindringtiefe und Auflösung zu treffen

Für die eigentliche Bildentstehung sind folgende physikalische Vorgänge verantwortlich:

- Reflektion und Brechung: An der Grenzfläche zweier verschiedener Stoffe/Gewebe mit unterschiedlichen Eigenschaften wird der Schall teilweise als Echo reflektiert und/oder ändert dort seine Ausbreitungsrichtung. Wie stark die Reflektion und Brechung erfolgt, hängt von dem Unterschied der Schallleitungsfähigkeit der beiden aneinandergrenzenden Materialien ab (Impedanzsprung). Bei einer vollständigen Reflektion der Schallwellen an einer Grenzschicht, spricht man von einer dorsalen Schallauslöschung. Der Impedanzsprung fällt an der Grenze Luft und Knochen zu jeweils anderen Geweben am stärksten aus; daher ist eine Untersuchung dahinterliegender Strukturen unmöglich (z.B. hinter luftgefüllten Darmschlingen). Zur Überwindung des hohen Impedanzsprungs Luft/Haut an der Körperoberfläche wird ein Ultraschallkontaktgel verwendet.
- Absorption: Verschiedene Materialien absorbieren unterschiedliche Schallfrequenzen unterschiedlich stark. Die Absorption ist im Wasser geringer als in Weichteilgeweben und im Knochen am höchsten. Allgemein haben hohe Schallfrequenzen eine geringere Eindringtiefe in den Körper, da sie stärker gedämpft werden als tiefere Frequenzen.

Die eigentliche Bilderzeugung erfolgt über den Schallkopf als zentrale Einheit. Es werden Konvex- und Linearscanner je nach Ausbreitung der Schallwellen unterschieden. Darin enthalten sind Piezokristalle. Diese senden zum Einen – durch ein Wechselfeld periodisch verformt – die Schallwellen aus. Zum Anderen Verformen auch die reflektierten Schallwellen ihrerseits die Piezokristalle und induzieren somit eine messbare Spannungsänderung. Die Piezokristalle dienen somit in einer zeitlichen Rhythmik wechselnd als Sender und Empfänger (Puls-Echo-Methode). Die registrierten Spannungsänderungen werden elektronisch verarbeitet und als Bild am Monitor dargestellt [48].

Dies kann nach unterschiedlicher Verarbeitung geschehen:

- A-Mode: Nur noch selten verwendetes Verfahren zur eindimensionalen Darstellung der Echos als Amplitude über der Zeitachse. Die Amplitudenhöhe entspricht der

Intensität des Echos und die Breite der Kurve spiegelt die Tiefe des Reflexionsortes wieder. Anwendungsgebiete sind noch die Echoenzephalographie und die Sinusitisdiagnostik.

- B-Mode: Bei dieser Darstellungsmethode – dem heutigen Standardverfahren – wird die Intensität des Echos in Graustufen kodiert dargestellt: weiß zeigt ein hohes Echo, schwarz kein Echo an. Die Verteilung dieser kodierten Bildpunkte erfolgt entsprechend der Laufzeit des Ultraschalls im Gewebe. Es ergibt sich somit ein zweidimensionales Schnittbild. Werden die einzelnen Bilder in einer Frequenz von 25-30/s dargestellt, entsteht ein bewegtes Bild, die sog. Real-Time-Sonographie.
- M-Mode: Hier werden die kodierten Echos einer einzelnen B-Mode-Bildzeile – somit ein konstanter Ort - auf einer Zeitachse aufgetragen. Dynamische Prozesse, wie die Bewegung einer Herzklappe können somit dargestellt werden.
- Doppler-Sonographie: Ein spezielles Verfahren zur Registrierung von Frequenzverschiebungen an bewegten Reflektoren (z.B. Erythrozyten). Somit können Strömungsgeschwindigkeiten und Flußrichtungen z.B. in einem Gefäß dargestellt werden.
- Farbkodierte Duplexsonographie: Hier werden die farbcodierten Flußgeschwindigkeiten und -richtungen mit dem B-Mode-Verfahren kombiniert, z.B. zur Darstellung der Organperfusion.

1.2.7.1 Konventionelle Abdomen-Sonographie

Zur abdominalen Sonographie werden hochauflösende Schallköpfe mit einer Frequenz von 3.5 MHz verwendet. Am besten erfolgt die Untersuchung morgens am nüchternen Patienten. Die Gabe von entblähenden Medikamenten, z.B. Simethicon (sab simplex Suspension; Pfizer Pharma, Berlin, Deutschland) kann die Luftfüllung der Darmschlingen zusätzlich reduzieren und die Darstellungsqualität verbessern. Bei der Untersuchung gilt das Augenmerk sowohl den Darmwandstrukturen wie auch den umgebenden Strukturen: entzündliche Wandverdickung, als Kokarde darstellbar, sowie das Vorliegen freier oder umschriebener abdominaler Flüssigkeit (z.B. Abszesse) dienen der Verlaufskontrolle der CED bzw. geben Hinweise auf Komplikationen der Erkrankung. Auch die mesenterialen Lymphknoten können beurteilt werden: es kann sich eine Vergrößerung bis hin zu entzündlichen Konglomerattumoren zeigen [18, 28, 48].

1.2.7.2 Power Sonographie

Die Power-Sonographie umfasst die Duplex- und Farbduplex-Sonographie. Beide Verfahren stellen eine Erweiterung der diagnostischen Möglichkeiten der Standard-Sonographie dar: es kann die hämodynamische Veränderung in der Darmwand bei verschiedener Aktivität der entzündlichen Darmerkrankungen dargestellt werden.

In der Duplex-Sonographie werden hierzu der arterielle Einstrom über das Flußvolumen in der Arteria mesenterica superior und der Resistance Index dem venösen Ausstrom als mittlere Geschwindigkeit in der Vena portae gegenübergestellt.

Die Farbduplex-Sonographie wiederum lässt noch ergänzend die direkte Darstellung der vermehrten Vaskularisation innerhalb der entzündlich infiltrierten Darmwandabschnitte und der umgebenden mesenterialen Strukturen zu. Diese Vaskularisationsmuster lassen sich in vier fließend ineinander übergehende Stadien unterteilen; diese Klassifikation ist aber für klinische Fragestellungen und Verlaufsbeurteilungen ausreichend [24, 48].

1.2.7.3 Kontrastmittel-verstärkte Sonographie

Die Verwendung von Kontrastmittel in der Duplex-Sonographie ermöglicht eine exakte Beurteilung der Gewebepfusion bei gleichzeitiger Verbesserung der Auflösung und Reduktion von Artefakten. Verwendet werden gasförmige Mikrobläschen definierter Größe (1-10 μm), die als i.V.-Bolus verabreicht werden und das Kapillarbett frei passieren können. Diese schaffen intravasal viele kleine Grenzflächen mit hoher Echogenität.

Um die erwünschte standardisierte Größe und eine höhere Stabilität des Kontrastmittels zu erreichen, werden die Gasbläschen mit einer Hülle umgeben. In neueren Präparaten werden weiterhin schwer wasserlösliche Gase verwendet, um die Diffusion durch die Hülle zu erschweren und somit eine längere Kontrastierung zu ermöglichen [9, 27].

1.2.8 Konventionelle Radiologie

Die verwendete Strahlung wird üblicherweise mit einer Röntgenröhre erzeugt. In einem Vakuum-Glaszylinder befinden sich ein heizbarer Wolframdraht als Kathode und eine Wolfram- oder Molybdän-Anode. Wenn die Kathode zum Glühen gebracht wird lösen sich aus dem Wolfram-Material Elektronen. Durch die anliegende Hochspannung werden diese dann zur Anode hin beschleunigt und treffen dort im sog. Brennfleck auf. Durch das Abbremsen entsteht überwiegend Wärme und nur 1% der Energie wird in Röntgenstrahlung

umgewandelt. Diese Strahlung besteht aus zwei Komponenten: die sich nur als Strahlenbelastung auswirkende Bremsstrahlung und die für die eigentliche Bilderzeugung erforderliche charakteristische Strahlung. Für die Qualität der Strahlung ist das Anodenmaterial und die angelegte Röhrenspannung maßgebend: weiche Strahlung entsteht bei einer Spannung < 100 keV, harte bei 100 keV bis 1 MeV. Hartstrahlaufnahmen weisen einen geringeren Kontrast, aber auch eine geringere Strahlungsbelastung auf; sie sind besonders für Aufnahmen mit Strukturen deutlich unterschiedlicher Dichte geeignet. Weiche Strahlen hingegen bieten einen hohen Weichteilkontrast und werden z.B. für die Mammographie verwendet. Die eigentliche Bildentstehung geschieht in einem strahlensensiblen digitalen System oder konventionell in einer Kassette mit einer zur Aufnahme passenden Film-Folienkombination [32, 48].

1.2.8.1 Abdomen-Übersichtsaufnahme

Bei der Diagnosestellung der CED und der Unterscheidung der beiden wesentlichen Erscheinungsformen kommt der Abdomenübersichtsaufnahme keine Bedeutung mehr zu. Jedoch ist sie ein wichtiges diagnostisches Mittel zum Ausschluss bzw. zur Diagnosesicherung von möglichen Komplikationen der CED, so z.B. eines Ileus (gasgeblähte Darmschlingen mit Flüssigkeitsspiegeln) aufgrund von Stenosen, von freier Luft bei vorliegender Darmperforation oder des – sehr selten auftretenden – toxischen Megakolons (extreme Dillatation des luftgefüllten Kolons über 5 cm bei völlig fehlender Haustrierung) bei der Colitis ulcerosa.

Die Aufnahme erfolgt in Linksseitenlage mit horizontalem Strahlengang und im Stehen oder bei schlechtem Allgemeinzustand des Patienten in Linksseitenlage und in Rückenlage. Das Abdomen soll vom Zwerchfell bis zum Beckenboden abgebildet werden [32, 48].

1.2.8.2 Konventionelles Enteroklysm (Untersuchung nach Sellink)

Zur optimalen Vorbereitung bleibt der Patient bereits ab dem Vortag der Untersuchung nüchtern. Zusätzlich muss der Patient am Vortag abgeführt werden, z.B. mit Senna (X-Prep; Mundipharma GmbH, Limburg, Deutschland): gegen 15.00 Uhr am Vortag nimmt der Patient die benötigte Menge X-Prep ein und trinkt ein Glas kohlenstofffreies Wasser nach. Stündlich ist ein weiteres Glas Wasser zu trinken bis zu einer Gesamtmenge von 2-3 l. Bis zur Untersuchung darf nach der Einnahme des Präparats nichts mehr gegessen werden.

Bei Amotilität des Darmes kann die Gabe von Metoclopramid (Paspertin; Abbott Arzneimittel GmbH, Hannover, Deutschland) bzw. bei verstärkter Peristaltik von Butyl-Scopolamin (Buscopan; Boehringer Ingelheim, Ingelheim am Rhein, Deutschland) erfolgen. Über eine anterograd bis zum Treitz-Band vorgeschobene Sonde werden im Wechsel eine Bariumsulfat-Suspension (200-700 ml) und eine Methylzellulose-Lösung (500-2000 ml) appliziert. Die Einlauf-Geschwindigkeit beträgt dabei ca. 70-140 ml/min. Somit ist eine abschnittsweise Dokumentation und Beurteilung des Dünndarms in Mono- und Doppelkontrast möglich.

Beurteilt werden Lumenweite und Darmwanddicke, das Faltenrelief der Kerckringfalten, sowie Füllungsdefekte, Verziehungen, Distanzierungen der Darmschlingen und Veränderungen in der Umgebung der Darmschlingen, wie z. B. Fisteln oder Abszesse [11, 22, 32, 48].

1.2.8.3 Magen-Darm-Passage

Die Magen-Darm-Passage sollte am Morgen bei nüchternem Patienten erfolgen, da die tagsüber zunehmende Magensäureproduktion einen optimalen Kontrastmittelbeschlag der Magenschleimhaut verhindert. Zur optimalen Durchführung der Untersuchung sollte die Gabe eines Spasmolytikums erfolgen. Zur Herstellung des Doppelkontrasts wird als positives Kontrastmittel oral eine Bariumsulfatsuspension verabreicht. Im Anschluss erfolgt die Gabe eines CO₂-Granulats zur Herstellung des negativen Kontrastes. Bei Verdacht auf das Vorliegen einer Perforation oder eines Ileus muss auf ein wasserlösliches und resorbierbares Kontrastmittel z.B. Amidotrizoesäure (Gastrografin; Bayer Vital GmbH, Leverkusen, Deutschland) ausgewichen werden. Durch mehrfaches Drehen des Patienten in liegender Position wird ein gleichmäßiger Kontrastmittelbeschlag sowohl der Vorder- wie auch der Hinterwand des Magens erzielt.

Der obere Gastrointestinaltrakt wird unter häufigen Lagewechseln unter direkter Durchleuchtung begutachtet; interessierende Bilder werden dokumentiert. Die Kontrastmittel-Passage im Dünndarm wird im weiteren zeitlichen Verlauf in regelmäßigen Abständen aufgezeichnet (fraktionierte Dünndarmpassage) [32, 48].

1.2.8.4 Kolon-Kontrastmittel-Einlauf

Der Darstellung des Kolons in Monokontrasttechnik (retrograder Bariumsulfateinlauf) bzw. in Doppelkontrasttechnik (Kontrastmitteleinlauf gefolgt von Luftinsufflation) kommt noch immer eine Bedeutung zur Darstellung der Dickdarmschleimhaut zu, wenn eine direkte endoskopische Untersuchung nicht möglich ist; so z.B. bei nicht passierbaren Stenosen, oder extrem geschlängeltem Darmverlauf. Zur Vorbereitung der Untersuchung ist ein Abführen des Patienten erforderlich; dies sollte schonend erfolgen und ggfs. durch Reinigungseinläufe ein bis zwei Tage vor der eigentlichen Untersuchung ergänzt werden. Während der Untersuchung kann zur Ruhigstellung der Darmperistaltik die Gabe von z.B. Butyl-Scopolamin (Buscopan; Boehringer Ingelheim, Ingelheim am Rhein, Deutschland) als Spasmolytikum erforderlich sein. Zu Beginn der Untersuchung wird in Linksseitenlage oder in Bauchlage solange Kontrastmittel retrograd infundiert bis die rechte Kolonflexur erreicht wurde. Nach anschließendem Abfluss der Kontrastmittelsuspension wird unter Durchleuchtung Luft dosiert insuffliert, dabei erfolgt die abschnittsweise Dokumentation der Dickdarmabschnitte im Doppelkontrast.

Mögliche pathologische Befunde sind entzündliche Darmveränderungen, Divertikel und die entsprechenden Komplikationen, wie Divertikulitis, Perforationen sowie tumoröse Wandveränderungen [12, 32, 48].

1.2.9 Computertomographie

Das Prinzip der Computertomographie – eines Schnittbildverfahrens – wurde 1968 von Hounsfield und Cormack entwickelt. Es handelt sich dabei um ein Röntgenverfahren, mit dem transversale Schichten dargestellt werden; somit werden Gewebe und Organe überlagerungsfrei zweidimensional dargestellt. In der Betrachtung der einzelnen Schichten nebeneinander ist auch die Bildinformation in der dritten Dimension verfügbar.

Aufgrund der nicht unerheblichen Strahlenexposition einer CT-Untersuchung muss die Indikationsstellung kritisch und die Wahl der Untersuchungsparameter sinnvoll erfolgen. Bei Patienten ohne aktuelle Beschwerden ist die Verlaufskontrolle bei vorliegender CED eher Domäne der Sonographie oder der MRT.

Bei entsprechender Indikation ist der Kontrast der CT-Bilder der konventionellen Radiologie überlegen, bietet aber eine geringere Ortsauflösung. Hier wäre nochmals das Spiral-CT überlegen, jedoch kann dann auch – bei vergleichbarem technischen Aufwand, aber entsprechend fehlender Strahlenexposition – eine MRT-Untersuchung durchgeführt werden.

1.2.9.1 Spiral-CT

Durch die Verwendung von Schleifsystemen zur Datenübertragung und zur Stromversorgung ist eine Dauerrotation der Gantry möglich. Durch die gleichzeitige kontinuierliche Vorwärtsbewegung des Patiententischs wird eine spiralförmige Aufnahme des Körpers erstellt. Die dabei laufend aufgezeichneten Messdaten liegen als sogenannter Volumendatensatz vor, aus welchem rechnerisch verschiedene Schichten variabler Dichte und unterschiedlichen Abstandes rekonstruiert werden können.

1.2.9.2 CT-Enterographie/-Enteroklysma

Zur Vorbereitung wird der Patient abgeführt. Anschließend wird der Darm mit Luft bzw. CO₂ soweit gefüllt, wie dies der Patient toleriert. Zur Reduzierung von Artefakten durch Darmbewegung erhält der Patient intravenös 40 mg Butyl-Scopolamin (Buscopan; Boehringer Ingelheim, Ingelheim am Rhein, Deutschland). Die eigentliche Datenakquisition erfolgt in Rückenlage, innerhalb einer Atempause, um Bewegungsartefakte weiter zu reduzieren. Die Aufnahmeparameter werden dabei so gewählt, dass in der zur Verfügung stehenden Zeit (Atempause des Patienten) möglichst viele Daten des gesamten Darms bei einer maximalen Schichtdicke von 2 mm erfasst werden können. Nur so sind im Anschluss auch aussagekräftige Darstellungen des Darms möglich. Unter Umständen kann auch eine weitere Aufnahme in Bauchlage erfolgen. Somit werden noch vorhandene Stuhlreste und Flüssigkeiten umgelagert und auch in den zuvor „verborgenen“ Bereichen ist die Darstellung möglicher Läsionen oder Polypen möglich.

Zwei unterschiedliche Darstellungen der erfassten Daten können zur Anwendung kommen: die 2D- oder 3D-CT. Während die erstgenannte Technik die axiale, coronare und sagittale Darstellung der Bilder erlaubt, kann bei zweitgenannter Technik nach entsprechender Umwandlung der Rohdaten eine virtuelle Passage des Darmlumens vergleichbar der Endoskopie erfolgen [25].

Nachteilig ist bei dieser Methode die Strahlenexposition, die bei ca. 10 mSv liegt. Ein Vorteil ist die Möglichkeit der Intervention bei punktionspflichtigen Abszessen.

1.2.10 Magnetresonanztomographie

Die MRT hat sich seit ihrer breiten Einführung Mitte der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts zu einem etablierten Verfahren der medizinischen Bildgebung entwickelt. Noch immer findet eine ständige Weiterentwicklung der Technik, der Methodik und der Anwendungsmöglichkeiten statt – auch bei der bildgeführten Intervention.

Im Folgenden werden die technischen und physikalischen Grundlagen dargestellt.

1.2.10.1 Physikalische Grundlagen des Kern-Resonanz-Phänomens

Grundlage der medizinischen MRT ist das Wasserstoffatom. Dieses besitzt als Kern ein einzelnes positiv geladenes Proton und, in der Hülle kreisend, ein einzelnes negativ geladenes Elektron.

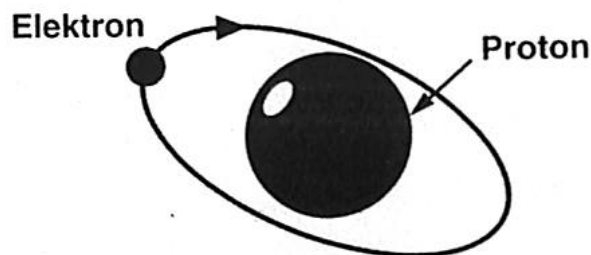


Abbildung 1: Aufbau des Wasserstoffatoms [44]

Das Proton im Wasserstoffatom dreht sich um sich selbst, wie ein Kreisel. Diese Drehbewegung – Spin oder Kernspin (engl. „to spin“ – sich drehen) genannt – ist eine Grundeigenschaft der Elementarteilchen. Dieser Spin hat folgende Auswirkungen:

- Das Proton ist eine rotierende Masse, die aufgrund des Drehimpulses bestrebt ist, die räumliche Lage der Rotationsachse beizubehalten
- Die Rotation der positiven elektrischen Ladung des Protons erzeugt ein magnetisches Moment B . Dieses Verhält sich wie ein kleiner Magnet und kann durch Magnetfelder und elektromagnetische Wellen beeinflusst werden. Gleichzeitig kann eine Bewegung des magnetischen Moments B in einer Empfangsspule eine Spannung induzieren.

Somit kann man die Lage der elektromagnetischen Achse des Protons mit Hilfe einer Empfangsspule sichtbar machen.

Legt man nun ein äußeres Magnetfeld an, werden die rotierenden Protonen in diesem Feld ausgerichtet – vergleichbar einer Kompassnadel im Erdmagnetfeld. Auf die durch das angelegte Magnetfeld bewirkte Lageänderung der Rotationsachse reagieren die einzelnen Spins mit einer sog. Präzessionsbewegung (eine kegelförmige Bewegung zwischen der aktuellen und der neu einzunehmenden Rotationsachse). Diese Präzessionsbewegung erfolgt mit einer charakteristischen proportional zur Magnetfeldstärke liegenden sog. Lamorfrequenz. Auf diese Frequenz nun werden die Empfangsspulen des MR-Gerätes abgestimmt. Sie beträgt bei 1,5 Tesla-Geräten 63,9 MHz.

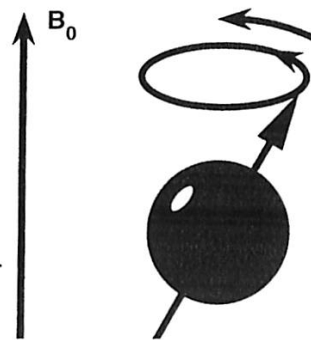


Abbildung 2: Die Präzessionsbewegung eines Wasserstoffatoms [47]

Wenn die Spins nun entlang der äußeren Magnetisierung langsam wieder einen stabilen Zustand erreichen, richten sich die Spins parallel und antiparallel der Magnetfeldlinien aus. Diese Verteilung ist nahezu 50:50. Nur ein kleiner Überschuss der Spins richtet sich parallel aus, da dies der energetisch günstigere Zustand ist. Dieser kleine Überschuss reicht aber aufgrund der insgesamt hohen Wasserstoff-Dichte im Körper aus um eine äußerlich messbare Magnetisierung zu erzielen.

Mit einem Hochfrequenz-Impuls einer bestimmten Leistung und Dauer kann eine Auslenkung der Spinachsen z.B. um 90° aus der Richtung M_z in die Richtung M_{xy} erfolgen. Die Spin-Bewegung entlang der neuen Magnetisierungsachse in xy-Richtung induziert in der entsprechenden Empfangsspule eine Wechselspannung, deren Frequenz der Lamorfrequenz entspricht. Diese Spannung bezeichnet man als MR-Signal [47].

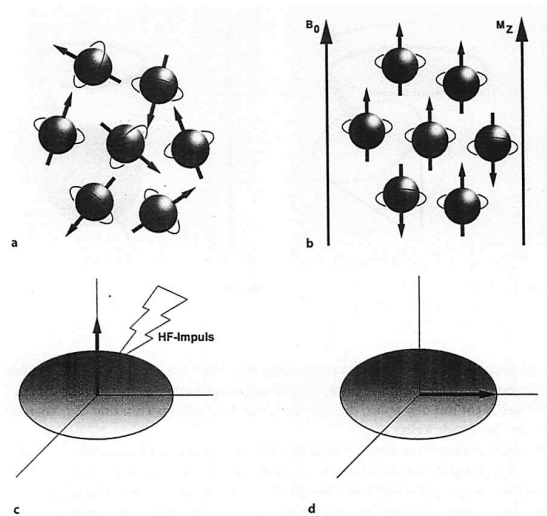


Abbildung 3: Einfluss des HF-Impulses auf die Spins [47]

1.2.10.2 Relaxation

Nach Abschalten des Hochfrequenz-Impulses richtet sich die Achse der Spins langsam wieder in der Z-Richtung entsprechend dem äußeren anliegenden Magnetfeld aus. Hierfür verantwortlich sind zwei Mechanismen. Diese nennen sich Spin-Gitter- und Spin-Spin-Relaxation oder auch longitudinale und transversale Relaxation. Diese laufen zeitgleich und voneinander unabhängig ab. Die T2-Relaxation erfolgt aber bereits innerhalb der ersten 100-300msec, die T1-Relaxation benötigt jedoch 0,5 – 5 s [47].

1.2.10.2.1 Longitudinale Relaxation T1

Dieser auch Spin-Gitter-Relaxation genannte Vorgang beruht auf einer Energieübertragung der Atome an das verbindende Gitter. Die Neu-Ausrichtung entsprechend dem anliegenden statischen Magnetfeld in MZ-Richtung erfolgt exponentiell. Die Zeit, bis ca. 63% der Spins sich wieder entlang der Z-Ebene ausgerichtet haben, nennt man Spin-Gitter-Relaxationszeit oder auch T1-Zeit.

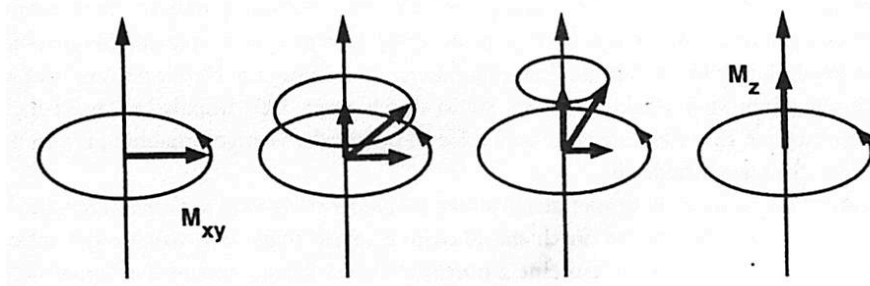


Abbildung 4: T1-Relaxation: Zurückkippen der Transversalmagnetisierung in die Z-Richtung unter Energieabgabe an die Umgebung [47]

1.2.10.2.2 Transversale Relaxation T2 und T2*

Nach Wegfall des Hochfrequenzimpulses zerfällt die Magnetisierung entlang der xy-Achse mit einer bestimmten, gewebespezifischen Zeitkonstante. Verantwortlich hierfür ist ein Energieaustausch benachbarter Spins untereinander: hierdurch wird das Magnetfeld, welches auf den einzelnen Spin einwirkt, beeinflusst und die Präzessionsbewegungen erfolgen einmal schneller, einmal langsamer. Mit der Zeit geraten die einzelnen Spins immer mehr außer Phase (Dephasieren), die transversale Magnetisierung nimmt immer weiter ab und schließlich verschwindet auch das damit verbundene MR-Signal. Die Zeitkonstante für diesen Vorgang wird mit T2 bezeichnet.

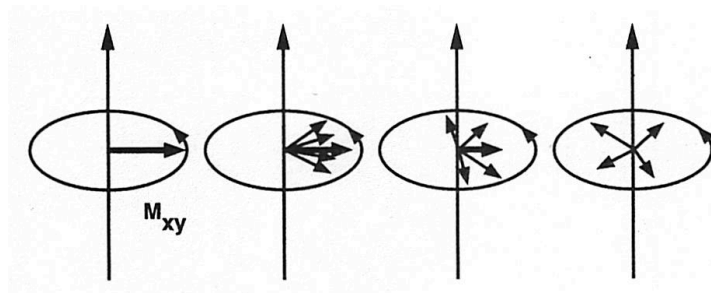


Abbildung 6: T2- und T2*-Relaxation [44]

Durch weitere Einflüsse durch den Körper und das MR-Gerät selbst ergeben sich noch weitere Inhomogenitäten des äußeren Magnetfeldes, welche die transversale Relaxation noch zusätzlich beschleunigen; dies ist der sog T2*-Effekt. Dieser kann in den sog. Spinecho-Sequenzen durch einen 180°-HF-Impuls nach Ablauf der Hälfte der gewünschten Echo-Zeit eliminiert werden [47].

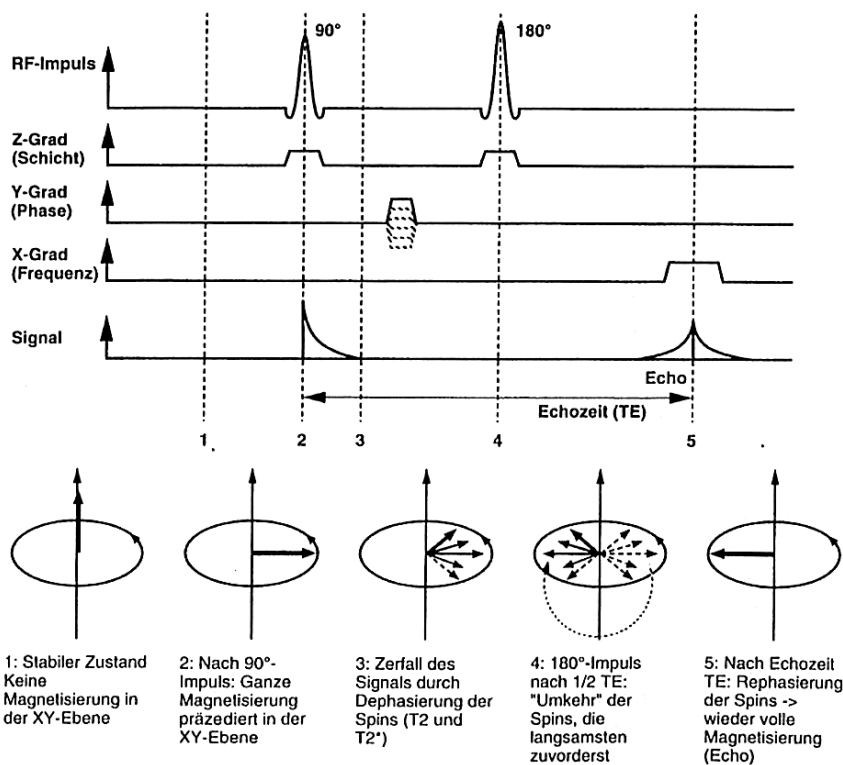


Abbildung 5: Die Spinecho-Sequenz [47]

1.2.10.3 Bildkontrast

Bereits ohne die Gabe von Kontrastmitteln besitzt die Kernspintomographie die Fähigkeit, Gewebe anhand spezifischer Merkmale sehr genau zu unterscheiden. Diese Merkmale sind

die Protonendichte des Gewebes, die T1- und die T2-Zeit. Durch entsprechende Einstellung verschiedener Parameter bei Erzeugung und Aufzeichnung der MR-Signale kann eine unterschiedliche Kontrastierung der Bilder erfolgen.

1.2.10.3.1 Repetitionszeit TR und T1-Wichtung

Die Repetitionszeit TR, also die Zeit zwischen der wiederholten Messungen zur Y-Auflösung des MR-Signals, beeinflusst den T1-Kontrast einer Aufnahme. Bei kurz gewählter TR (kleiner 600msec) stellen sich Gewebe mit kurzer T1-Zeit hell und solche mit langer T1-Zeit dunkel dar.

Bei entsprechend langer TR geben alle Gewebe ein ähnliches Signal ab und die T1-Wichtung der Gewebedifferenzierung nimmt in der Aufnahme ab.

1.2.10.3.2 Echozeit TE und T2-Wichtung

Auf die T2-Wichtung einer Aufnahme hat hingegen die Echozeit TE (Zeit zwischen dem HF-Impuls und dem um 180° entgegen gesetzten Echo-HF-Impuls) einen großen Einfluss. Bei langer TE (größer 60msec) ergibt sich ein hoher T2-Kontrast: Gewebe mit einer kurzen T2-Zeit geben kaum mehr ein Signal ab und erscheinen dunkel im Bild, Gewebe mit einer langen T2-Zeit erscheinen hell, da sie noch ein hohes Signal abgeben.

Eine kurze TE erzeugt kaum eine Auflösung der Gewebe entsprechend ihrer T2-Zeiten.

1.2.10.3.3 Pulswinkel, Sättigung und Vorsättigung

Sättigung besagt hier, dass bei entsprechend kurzer Repetitionszeit eine immer geringere Längsmagnetisierung zwischen den Einzelmessungen aufgebaut werden kann und somit das MR-Signal immer schwächer wird.

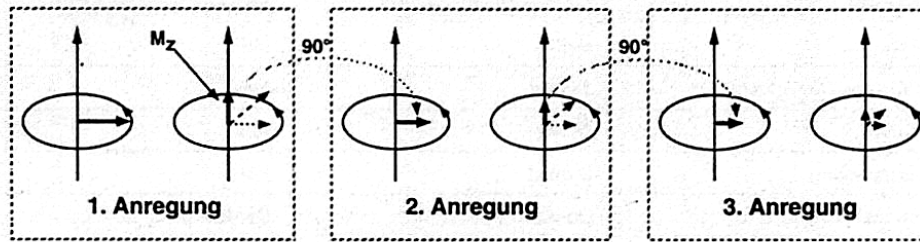


Abbildung 7: Mechanismus der Sättigung

Um diesem Phänomen zu begegnen wählt man bei kurzer TR den Pulswinkel (engl. „flip angle“), also den Winkel um welchen die Spins aus der Längsrichtung abgelenkt werden, ebenfalls klein. Dadurch geschieht der Aufbau der Längsmagnetisierung in kürzerer Zeit, da nur eine geringere Richtungsänderung notwendig ist. [47]

1.2.10.4 Schichtwahl und Ortskodierung

In der medizinischen Bildgebung soll ein Schnittbild angefertigt werden, d.h. der HF-Impuls soll nur eine bestimmte Schicht betreffen und das MR-Signal muss innerhalb der Schicht seiner Herkunft zugeordnet werden.

Zur Schichtwahl wird das entlang des Körpers verlaufende Magnetfeld (Z-Achse) durch einen zum Fußende hin abfallenden Gradienten überlagert, das Magnetfeld wird in seinem Verlauf inhomogen. Da die Larmorfrequenz proportional zur Magnetfeldstärke ist, fällt die Frequenz der einzelnen Spins vom Kopf- zum Fußende hin ab. Da nun aber eine Anregung (Resonanz) nur dann erfolgt, wenn Anregungs- und Larmorfrequenz nahezu identisch sind, kann nun durch einen entsprechenden RF-Impuls nur eine bestimmte Schicht angeregt werden. Je stärker nun dieser Gradient entlang der Z-Achse ist, desto dünner ist die durch den RF-Impuls entsprechender Frequenz angeregte Schicht.

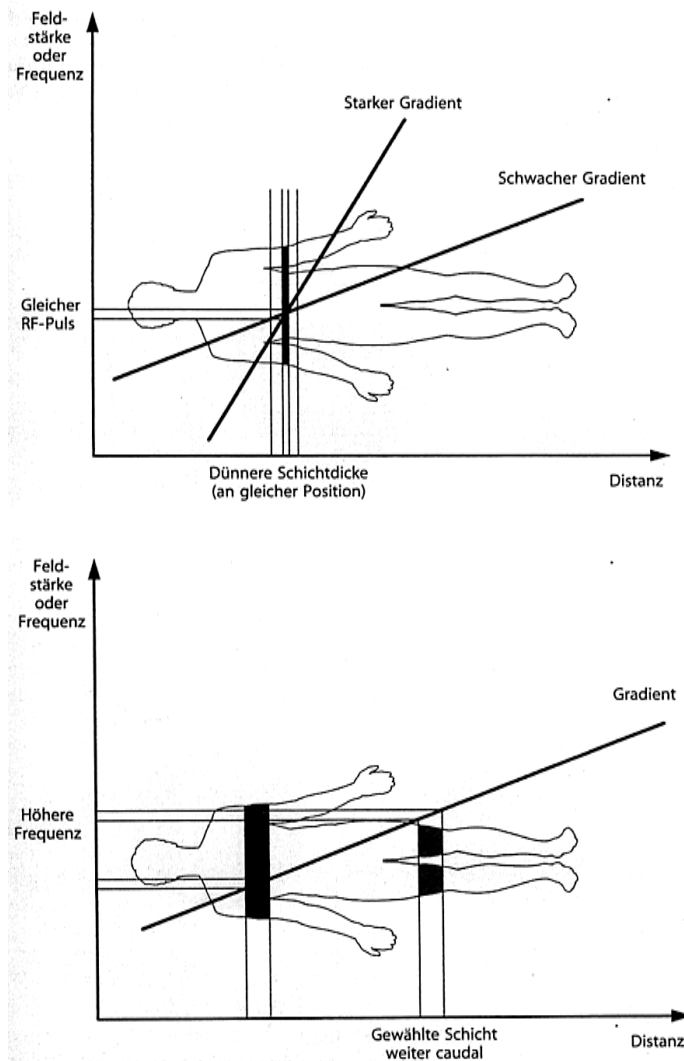


Abbildung 8: Wahl der Schichtdicke und -position [44]

Nun muss das MR-Signal noch innerhalb der Schicht in der X- und Y-Ebene aufgelöst werden. Dies geschieht über die Phasen- und Frequenzkodierung.

Die Phasenkodierung wird zur Auflösung in der Y-Ebene verwendet. Nach Anregung der Spins durch den HF-Impuls wird ein Magnetfeldgradient in Y-Richtung eingeschaltet. Dieser bewirkt eine Beschleunigung der Spins im oberen Bereich und ein Abbremsen der Spins im unteren Bereich der Schicht. Nach Abschalten des Phasengradienten bleibt die Phasenverschiebung der Spins zueinander, die Spins sind entlang der Y-Achse ihrem Ort entsprechend durch ihre Phase kodiert.

Zuletzt wird noch ein X-Gradient zur Frequenzkodierung angelegt. Das Magnetfeld nimmt hierdurch von rechts nach links zu. Die Larmorfrequenzen verhalten sich dementsprechend (vergleichbar mit der bereits beschriebenen Schichtwahl). Bei Messung des MR-Signals

empfängt man nun ein Frequenzspektrum, in dem die höchsten Frequenzen dem linken und die tiefsten empfangenen Frequenzen dem rechten Bildrand entsprechen. Die Auflösung dieses Frequenzspektrums geschieht durch eine nach Signalakquisition durchgeführte mathematische Frequenzanalyse, die sog. Fourier-Transformation.

Ist diese Auflösung entlang der X-Achse noch einfach, gestaltet sich die Auflösung des Signals entlang der Y-Achse deutlich schwieriger. Da die einzelnen Phasen der Spins unbekannt sind, braucht es je einzelner Phase eine eigene Messung, sog. Repetitionen. Aus der Gesamtzahl der Messungen – je höher die gewünschte Bildauflösung, desto mehr Messungen sind erforderlich – kann dann wiederum durch Fourier-Transformationen die Auflösung des Signals auch in der Y-Richtung erfolgen [47].

1.2.10.5 Aufbau eines Magnetresonanztomographen

Aus den vorbeschriebenen physikalischen Grundlagen der MRT ergeben sich auch direkt die erforderlichen Komponenten eines MR-Geräts:

- Zur Erzeugung des stationären Magnetfelds wird ein starker Magnet mit einer Feldstärke von üblicherweise 0,1 bis 3 T benötigt, dessen erzeugtes Feld homogen und frei von Fluktuationen sein muss. Die überwiegende Anzahl der heutigen MR-Geräte verwendet einen durch flüssiges Helium auf -269°C gekühlten supraleitenden Magneten.
- Zur Schichtwahl und Ortskodierung wird ein Gradientensystem benötigt. Dieses besteht aus einer separaten Spule mit separatem Verstärker für jede der drei Achsen X, Y und Z. Durch sie kann das stationäre Magnetfeld entsprechend beeinflusst werden, um Schicht und Ort zu wählen bzw. zu definieren.
- Das Hochfrequenzsystem, bestehend aus Sender und hochfrequentem Empfänger, u.a. die im Gerät integrierte Körperspule (engl. „body coil“) als Sende- und Empfangseinheit.
- Ein leistungsfähiger Computer mit ein oder mehreren Hilfssystemen dient zur Steuerung, Signal-Transformierung und Bilderzeugung.
- Der Patiententisch dient der Lagerung und Positionierung des Patienten im Gerät [47].

1.2.10.6 MRT-Enterographie/-Enteroklysma

Eine weitergehende Vorbereitung des Patienten ist nicht erforderlich, insbesondere muss der Patient nicht abgeführt werden. Es muss der Patient lediglich ab dem Vorabend der Untersuchung nüchtern bleiben. Zur Distension des Darms wird dem Patienten vor der Untersuchung eine Trinkwasser-Quellmittel-Suspension verabreicht. Dies kann per os (MRT-Enterographie) oder über eine liegende Duodenalsonde (MRT-Enteroklysma) erfolgen. Per os sind ca. 2 Liter mit z.B. 25g Mannitol und 5g Johannisbrotkernmehl für eine ausreichende Distension erforderlich. Bei der Durchführung der Untersuchung als MRT-Enteroklysma wird eine entsprechende MRT-kompatible (nicht magnetische oder in entsprechendem Abstand platzierbare) Pumpe verwendet. Die ungefähre benötigte Flüssigkeitsmenge liegt hier bei 1.5 – 3 l, die Flussrate bei ca. 150 ml/min.

Die eigentliche Aufnahme erfolgt in Bauchlage. Durch die Kompression des Bauchraums wird die Darmbewegung eingeschränkt. Eine weitere Reduzierung von Bewegungsartefakten erfolgt durch die Aufnahme einer einzelnen Sequenz möglichst innerhalb einer Atempause und die intravenöse Gabe von 40mg Butyl-Scopolamin (Buscopan; Boehringer Ingelheim, Ingelheim am Rhein, Deutschland) vor der Untersuchung. Zur Kontrastierung der T1-gewichteten Sequenzen kann z.B. GD-DTPA (Magnevist, Schering, Berlin Schering, Deutschland) in einer Dosierung von 0,1mmol/kg Körpergewicht intravenös appliziert werden [22, 23, 35, 42].

Analog zur CT-Untersuchung kann die Bilddarstellung konventionell zweidimensional oder dreidimensional rekonstruiert als virtuelle Endoskopie erfolgen. Vorteilhaft ist die fehlende Strahlenexposition, nachteilig die geringere Ortsauflösung und höhere Artefaktanfälligkeit des MRT.

2 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Wie in der Einleitung dargestellt ist es dringend erforderlich, eine einfach durchzuführende und für den Patienten mit wenig Belastung einhergehende Untersuchung zur Verlaufsdokumentation der CED zur Verfügung zu haben. Das noch relativ junge Verfahren der MR-Enterographie scheint diese Bedingungen zu erfüllen. Nun gilt es aus der hohen Anzahl von Variationen dieser Untersuchung in Form verschiedener Sequenzprotokolle die geeignetste bzw. die geeignetsten Sequenzen herauszufinden und diese als Standard zu etablieren.

Ziel der hier vorliegenden Arbeit soll es nun sein, anhand der Beurteilung der Bildqualität durch erfahrene Radiologen ein optimales Sequenz-Protokoll herauszuarbeiten und eine Aussage zur Reliabilität der getroffenen Aussagen zu vorliegenden entzündlichen Darmwandveränderungen und dem Vorhandensein vergrößerter mesenterialer Lymphknoten, sowie zur erzielten Distension der betrachteten Dünndarmabschnitte zu treffen.

Besonderer Wert wurde dabei darauf gelegt, dass jeder Untersucher unabhängig seine Festlegungen zu treffen hatte, um die Variabilität der Aussagen zwischen den einzelnen Radiologen herausarbeiten zu können, die im Idealfall – Unabhängigkeit der Festlegung vom Untersucher und dessen Erfahrung – zu vernachlässigen wäre.

3 Methodik

3.1 Patientenkollektiv

Es handelt sich um eine prospektive klinische Studie, deren Durchführung durch die Ethikkommission der Universität Regensburg genehmigt wurde. Untersucht wurden 84 Patienten, davon 42 männlich und 42 weiblich. Das Alter zum Untersuchungszeitpunkt betrug zwischen 16 und 81 Jahren, Median 37 Jahre. Die Untersuchungen wurden im Zeitraum Oktober 2002 bis Juli 2003 durchgeführt.

Eine schriftliche Einverständniserklärung aller Patienten oder der Erziehungsberechtigten wurde eingeholt. Bei keinem der Patienten lagen Kontraindikationen (z.B. implantierter Herzschrittmacher oder ein Cochleaimplantat) für die Durchführung eines MRT vor.

Ausschlusskriterien
Fehlende Einverständniserklärung
Bekannte Kontraindikationen für die Durchführung einer MRT

Tabelle 3: Ausschlusskriterien für die Studienteilnahme

Die genannten Ausschlusskriterien wurden bei der Patientenauswahl beachtet.

Bei allen Patienten lag eine histologisch gesicherte Morbus Crohn – Erkrankung vor. Die Untersuchungen erfolgten teilweise im Rahmen der Erstdiagnostik und zum Teil im Rahmen der Verlaufskontrolle.

Komplikationen traten bei keinem Probanden der vorliegenden Studie auf. Auch wurde die Untersuchung von allen Probanden gut toleriert.

3.2 MR-Untersuchungsablauf

Alle Patienten waren zum Untersuchungszeitpunkt mindestens 12 Stunden nüchtern. Eine besondere Darmvorbereitung, z.B. abführende Maßnahmen, war für diese

Untersuchungsmethode nicht notwendig. Es wurde zur Untersuchung des Kolons im MR-Enterogramm eine dark lumen Technik (d.h. die helle kontrastierte Darmwand weist einen deutlichen Kontrast zum dunklen Darmlumen auf) verwendet. Um ein dunkles intraluminales Signal in der T1-gewichteten Sequenz zu erzeugen, tranken die Patienten innerhalb einer Stunde 2 Liter Trinkwasser. Um eine ausreichende Distension des Darms zu erzielen, wurden dem Trinkwasser 25g Mannitol und 5g Johannesbrotkernmehl (Nestargel; Nestle, München, Deutschland) zugefügt. Kurz vor der Untersuchung erhielten die Patienten 200-300 ml 0,9% NaCl als rektale Kontrastierung um eine zusätzliche Distension des Rektums zu erreichen. Zur Verstärkung der Darmdistension und Reduktion der Darmperistaltik während der Untersuchung erhielten die Patienten 40 mg Butyl-Scopolamin (Buscopan; Boehringer Ingelheim, Ingelheim am Rhein, Deutschland). Zur Optimierung der Darstellung der entzündlichen Darmwandveränderungen erfolgte eine Kontrastverstärkung der T1 gewichteten Sequenzen durch eine intravenöse Applikation von Gd-DTPA (Magnevist, Schering, Berlin Schering, Deutschland) in einer Dosierung von 0,1mmol/kg Körpergewicht. Die Untersuchungen wurden an einem 1,5T MR-Tomographen mit einer Gradientenfeldstärke von 20 mT/m durchgeführt (Symphony, Siemens Medical Systems, Erlangen, Deutschland). Die Patienten wurden in Rückenlage mit zirkulären, vierelementigen Körperspulen (body coil) untersucht. Zunächst wurden coronare TRUFI-Sequenzen (True Fast Imaging With Steady Precession) (TR/TE, 4.76/2.38 msec, flip-Winkel, 60°, Matrix 256, FOV 450 mm) mit einer Schichtdicke von 5mm und anschließend axiale T2-gewichtete HASTE-Sequenzen (Half Fourier-Acquired Single Shot Turbo Spin Echo) (TR/TE, 1070/77 msec, flip-Winkel 150°, Matrix 256, FOV 400mm) mit einer Schichtdicke von 8mm angefertigt. Zusätzlich wurden axiale fettgesättigte T1 gewichtete Flash 2D-Sequenzen (Fast Low Angle Shot) (TR/TE 124/4.7 msec, Flip-Winkel 70 °, Matrix 256, FOV 380) mit einer Schichtdicke von 6mm vor und nach Gd-DTPA-Applikation durchgeführt. Den Abschluss des Sequenzprotokolls bildete eine coronare fettgesättigte T1 Flash (TR/TE 86/4.7 msec, Flip-Winkel 70°, matrix 256, FOV 380) mit 5 mm Schichtdicke.

Sequenz	axial	coronar	Kontrastmittel
TRUFI	X		
HASTE	X		
FLASH 2D	X		
FLASH 2D fettgesättigt	X	X	X

Tabelle 4: Zeitlicher Ablauf der Sequenzprotokolle der MR-Enterographie

Die gesamte Untersuchungszeit belief sich auf durchschnittlich 26 Minuten (im Bereich von 23 bis 37 Minuten),

3.3 Befundung und Auswertung

Alle MR-Aufnahmen wurden von vier erfahrenen Radiologen unabhängig voneinander hinsichtlich der Bildqualität und des Vorliegen entzündlicher Darmwandveränderungen ausgewertet. Hierzu wurde der Dünndarm in drei Abschnitte - Jejunum, Ileum und terminales Ileum - unterteilt betrachtet. In den durchgeführten Sequenzen wurden die genannten Dünndarmabschnitte jeweils in der Bildqualität (1: sehr gut bis 5: unbrauchbar) beurteilt.

1	2	3	4	5
Sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	unbrauchbar

Abbildung 9: Skala zur Beurteilung der Bildqualität

Ebenso wurde zusammengefasst über die durchgeführten Untersuchungen befundet, ob eine Entzündung des jeweiligen Darmabschnittes vorlag. Hierbei wurden folgende Kriterien für das Vorliegen einer entzündlichen Veränderung gestellt:

Kriterien für die Diagnose einer vorliegenden Entzündung
Darmwandverdickung mehr als 3mm
Kontrastmittelaufnahme der Darmwand
Gefäßinjektionen
pathologische Lymphknoten (d.h. > 1 cm)

Tabelle 5: Kriterien für die Diagnose einer vorliegenden Entzündung

Bei Vorliegen eines einzelnen der oben genannten MR-morphologischen Zeichen, aber fehlender Vergrößerung der Lymphknoten wurde eine „0: keine Entzündung“ vergeben, bei entsprechendem einzeltem Befund und positivem Lymphknotenbefund lag eine „1: unsichere Entzündung“, bei zwei oder mehr der radiologischen Entzündungszeichen wurde eine „2: sicher vorliegende Entzündung“ als Bewertung der Aufnahme vergeben.

0	1	2
Keine vorliegende Entzündung	Unsicher vorliegende Entzündung	Sicher vorliegende Entzündung

Abbildung 10: Skala zur Beurteilung der vorliegenden Entzündung

Die Distension des Dünndarms wurde mit „0: nicht“ bewertet, wenn die Distension geringer als 50% ausfiel, mit „1: etwas“ bei 50-80% und mit „2: gut“ bei einer Distension über 80% des Dünndarms und keiner Beeinträchtigung der Aufnahmen durch Bewegungsartefakte.

0	1	2
Distension < 50%	Distension 50 - 80%	Distension > 80%

Abbildung 11: Skala zur Bewertung der Dünndarm-Distension

3.4 Statistische Methoden

Für die Durchführung der statistischen Tests wurde das Programm SPSS in der Version 16.0 für Windows (IBM Corporation, New York, USA) verwendet.

Die Rangfolgen der MRT-Sequenzen, die sich aus den Beurteilungen der vier Radiologen ergeben, wurden mit der Rangvarianzanalyse nach Friedman auf ihre Signifikanz überprüft. Es handelt sich dabei um einen nicht parametrischen Test für mehr als zwei abhängige Stichproben. Die Nullhypothese besagt hierbei, dass sich aus der Benotung keine Rangunterschiede für die beurteilten MRT-Sequenzen ergeben. Das Signifikanzniveau wird in der vorliegenden Arbeit mit $\alpha = 0,05$ festgelegt. Somit wurde die Nullhypothese bei einem p-Wert < 0.05 signifikant und bei einem p-Wert < 0.01 hochsignifikant verworfen. Mit dem Friedman-Test lässt sich aber nur eine Aussage treffen, ob Rangunterschiede in der Stichprobe bestehen, nicht jedoch über deren Unterscheidungsrichtung oder deren Größe. Daher wurde im Anschluss noch der jeweils erste Rang gegenüber allen nachfolgenden Rängen mit dem Vorzeichenrangtest nach Wilcoxon getestet. Dieser prüft nun, ob sich zwei abhängige Stichproben in ihrer zentralen Tendenz unterscheiden; dabei wird die Richtung und die Größe des Unterschieds verwertet. Die Nullhypothese besagt hier, dass kein Rangunterschied zwischen dem ersten und dem jeweils betrachteten nachfolgenden Rang besteht. Auch hier erfolgt die Ablehnung der Nullhypothese bei p-Wert < 0.05 signifikant und bei p-Wert < 0.01 hochsignifikant.

Um die Übereinstimmung der Benotungen der einzelnen Radiologen untereinander zu überprüfen, wurde der Kendall W – Test verwendet. Der dabei errechnete Konkordanz-Koeffizient W liegt in einem Wertebereich von 0 - 1; dabei bedeutet ein Wert $W = 0$ keine, ein Wert $W = 1$ eine vollständige Übereinstimmung, zwischen $W = 0$ und 0,482 spricht man von wenig Übereinstimmung, ab $W = 0,7$ von einer hohen Übereinstimmung.

4 Ergebnisse

4.1 Bewertung der Bildqualität

Im folgenden Diagramm sind alle vergebenen Bewertungen aller beurteilenden Radiologen ohne Unterteilung in die einzelnen Darmabschnitte als Häufigkeitsverteilung aufgetragen.

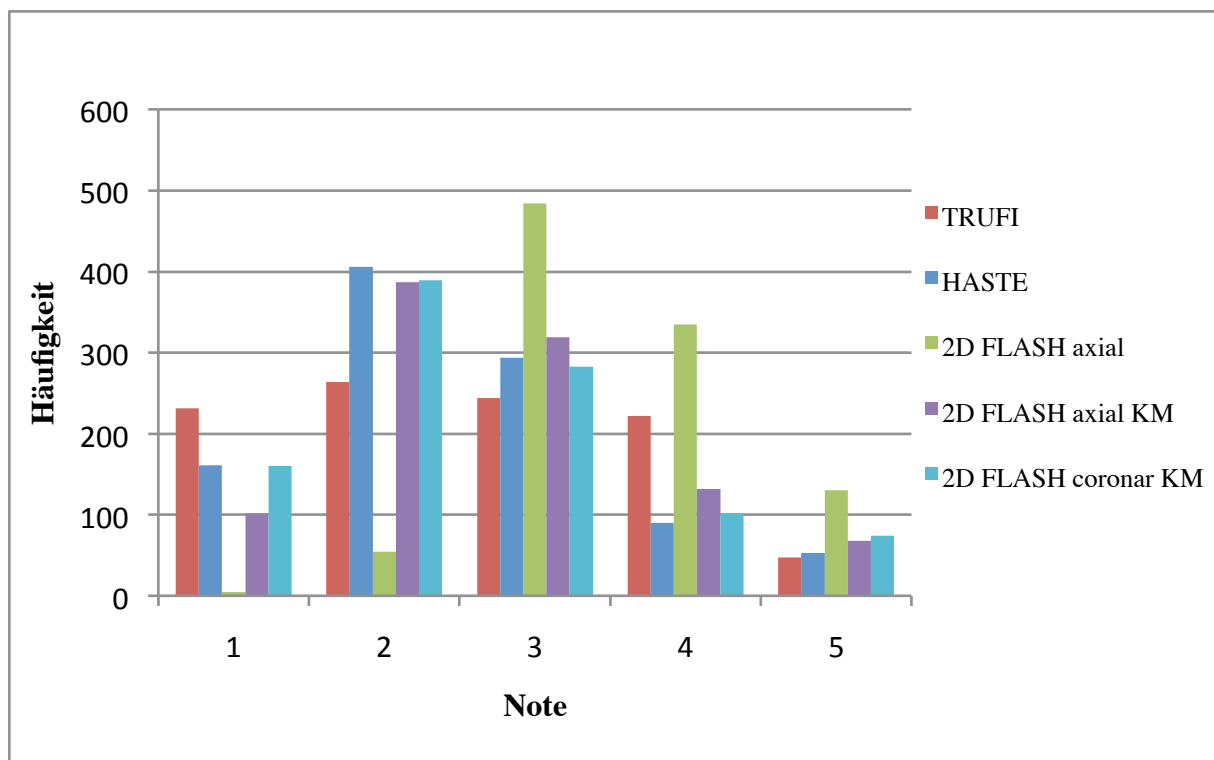


Abbildung 12: Histogramm der gesamten vergebenen Sequenz-Bewertungen

Nimmt man die eben dargestellten Benotungen als Grundlage, dann ergibt sich die folgende Reihenfolge der untersuchten Sequenzprotokolle:

Rang	Sequenzprotokoll	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1.Rang	HASTE	2,49
2.Rang	2D-FLASH coronar mit KM	2,60
3.Rang	TRUFI	2,77
4.Rang	2D-FLASH axial mit KM	2,85
5.Rang	2D-FLASH axial	4,28

n = 1008, p-Wert < 0,005

Tabelle 6: Rangfolge der Benotungen der einzelnen MRT-Sequenzen, n=1008 (Radiologe 1-4)

Der Rangvergabe liegt der Mittlere Rang, ermittelt im Friedman-Test, zugrunde. Das Signifikanzniveau liegt bei p-Wert < 0,005, n=1008.

Da der Friedman-Test nur generell eine Aussage trifft, ob zwischen den Bewertungen der einzelnen Sequenzen ein Unterschied besteht, wird im Folgenden noch das Ergebnis des nachgeschalteten Wilcoxon-Tests wiedergegeben; hier wurde geprüft, ob der Unterschied zwischen der Beurteilung der erstrangigen und allen nachrangigen Sequenzen signifikant ist.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	2D-FLASH coronar mit KM	TRUFI	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH axial
1.Rang	0,017	0,000	0,000	0,000
HASTE				

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert < 0,05 signifikant, p-Wert < 0,01 hochsignifikant

Tabelle 7: Signifikanz des ersten Rangs der Gesamtrangfolge (Radiologe 1-4)

Mit einem p-Wert < 0,05 ist der Unterschied zwischen der erstplazierten HASTE-Sequenz und der zweitplazierten 2D-FLASH coronar mit KM-Sequenz signifikant; alle weiteren Ergebnisse sind auf einem Signifikanzniveau von p-Wert < 0,01 als hochsignifikant zu bewerten.

Das folgende Tabellenmaterial gibt die Ergebnisse der einzelnen Radiologen wieder. Zum einen wird die Gesamtbewertung jedes Radiologen, zum anderen die Einzelbewertungen getrennt nach den drei betrachteten Darmabschnitten dargestellt.

4.1.1 Bewertungen Radiologe 1

Im Diagramm sind alle Benotungen, die durch den befundenden Radiologen 1 vergeben wurden, ohne Unterteilung in die getrennt bewerteten Darmabschnitte als Häufigkeitsverteilung aufgetragen.

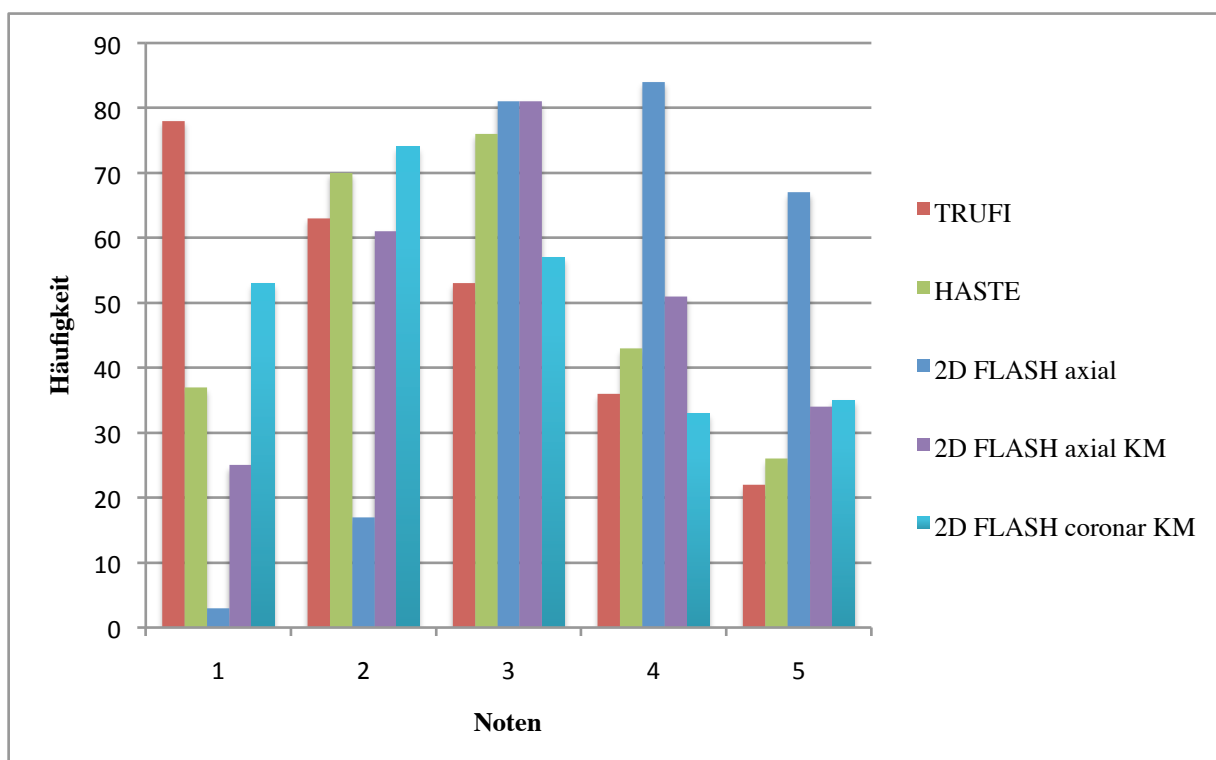


Abbildung 13: Histogramm der gesamten Sequenz-Bewertungen (Radiologe 1)

4.1.1.1 Gesamtreihenfolge der Sequenzen für Radiologe 1

Legt man alle von Radiologen 1 eben dargestellten Bewertungen der Berechnung des Mittleren Rangs im Friedman-Test zugrunde, ergibt sich die nachfolgend dargestellte Rangverteilung.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	TRUFI	1	2	3	2,21
2	2D-FLASH coronar mit KM	2	2	4	2,57
2	HASTE	2	3	4	2,76
4	2D-FLASH axial mit KM	2	3	4	3,16
5	2D-FLASH axial	3	4	5	4,31

n = 252; p-Wert < 0,005

Tabelle 8: Rangfolge der Sequenzen über alle Darmabschnitte (Radiologe 1)

Beim Vergleich der Gesamtrangfolge aller Radiologen mit der Rangfolge bei Radiologen 1 fällt auf, dass hier Rang 1 TRUFI und Rang 3 HASTE in der Gesamtrangfolge ihre jeweiligen Ränge getauscht haben.

Stellt man die Mediane der Benotung mit 25%- und 75%-Quartilen, sowie den Mittleren Rang aus dem Friedman-Test grafisch dar, ergibt sich das nachfolgende Diagramm.

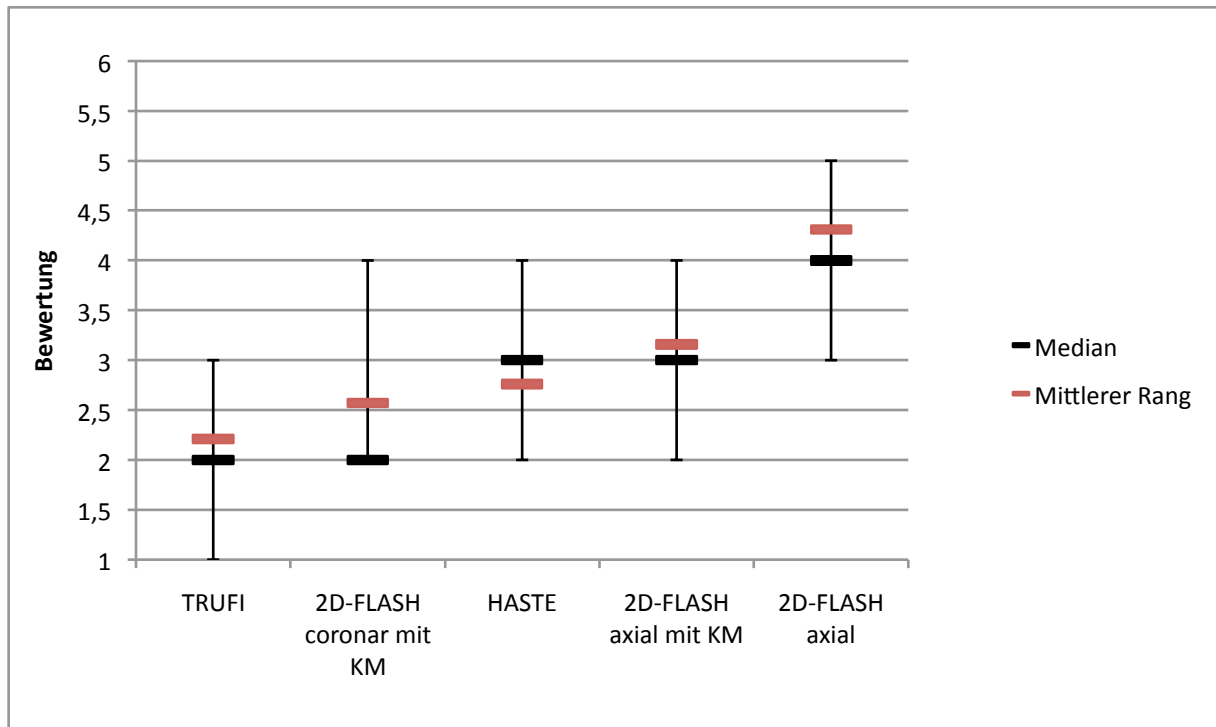


Abbildung 14: Gesamt-Sequenzrangfolge (Radiologe 1)

Zur Überprüfung der Signifikanz der erstrangig bewerteten Sequenz gegenüber den nachfolgenden Rängen wurden auch hier die Bewertungen zueinander im Wilcoxon-Test überprüft. Dabei zeigen sich alle Unterschieds-Untersuchungen hochsignifikant.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
1. Rang	0,000	0,000	0,000	0,000
TRUFI				
	2D-FLASH coronar mit KM	HASTE	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH axial

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 9: Signifikanz des ersten Rangs der Gesamtrangfolge (Radiologe1)

4.1.1.2 Reihenfolge der Sequenzen im Jejunum für Radiologe 1

Für die Fragestellung, welche Sequenz die am besten erscheinende für die CED-Diagnostik ist, ist sicherlich die Bewertung der Gesamtsequenz ausschlaggebend, ohne die Unterscheidung der Benotung in einzelne Darmabschnitte.

Trotzdem soll das vorliegende Material auch auf die Unterschiede in der Benotung der einzelnen Abschnitte hin untersucht werden.

Im Folgenden finden sich die Ergebnisse des Radiologen 1 für das Jejunum.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	TRUFI	2	3	4	2,20
2	HASTE	2	3	4	2,68
2	2D-FLASH coronar mit KM	2	3	4	2,68
4	2D-FLASH axial mit KM	2	3	4	3,17
5	2D-FLASH axial	4	4	5	4,27

n = 84; p-Wert < 0,005

Tabelle 10: Rangfolge der Sequenzen im Jejunum (Radiologe 1)

Das Ergebnis ist gleich der Gesamtrangfolge mit Ausnahme der Ränge 2 und 3, hier sind jeweils die Sequenzen HASTE und 2D-FLASH coronar mit KM vertauscht.

Auch diese Rangvergabe soll im Wilcoxon-Test auf die Signifikanz der Vergabe des ersten Rangs im Vergleich zu den Nachfolgenden untersucht werden.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	HASTE	2D-FLASH coronar mit KM	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH axial
1. Rang	0,001	0,005	0,000	0,000
TRUFI				

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 11: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Jejunum (Radiologe 1)

Alle untersuchten Benotungsdifferenzen zwischen der erstrangigen TRUFI-Sequenz und den weiteren Sequenzen im Jejunum sind hochsignifikant.

4.1.1.3 Reihenfolge der Sequenzen im Ileum für Radiologe 1

Für das Ileum ergibt sich die gleiche Rangfolge wie bereits in der Gesamtbewertung des Radiologen 1.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	TRUFI	1	2	3	2,15
2	2D-FLASH coronar mit KM	1	2	3	2,48
3	HASTE	1	2	3	2,77
4	2D-FLASH axial mit KM	2	3	3	3,26
5	2D-FLASH axial	3	3	4	4,35

n = 84; p-Wert < 0,005

Tabelle 12: Rangfolge der Sequenzen im Ileum (Radiologe 1)

Diese Ergebnisse sind in der Unterscheidung des ersten und zweiten Rangs signifikant, für alle weiteren Unterscheidungen des ersten Rangs zu den nachfolgenden Rängen hochsignifikant.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	2D-FLASH coronar mit KM	HASTE	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH axial
1. Rang	0,016	0,000	0,000	0,000
TRUFI				

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 13: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Ileum (Radiologe 1)

4.1.1.4 Reihenfolge der Sequenzen im terminalen Ileum für Radiologe 1

Die Benotungen für das terminale Ileum vergeben durch Radiologen 1 ergeben das nachfolgende Diagramm, das wiederum vergleichbar der Gesamtrangfolge ist.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	TRUFI	1	2	3	2,28
2	2D-FLASH coronar mit KM	1	2	4	2,54
3	HASTE	2	3	4	2,83
4	2D-FLASH axial mit KM	2	3	4	3,05
5	2D-FLASH axial	3	4	5	4,30

n = 84; p-Wert < 0,005

Tabelle 14: Rangfolge der Sequenzen im Term. Ileum (Radiologe 1)

Hier zeigt sich der Unterschied der erst- und zweitrangigen Bewertung als nicht signifikant, für die nachfolgenden Untersuchungen im Wilcoxon-Test dann aber wieder hochsignifikant.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	2D-FLASH coronar mit KM	HASTE	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH axial
1. Rang	0,071	0,002	0,000	0,000
TRUFI				

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 15: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Term. Ileum (Radiologe 1)

4.1.2 Bewertungen Radiologe 2

Im nachfolgenden Histogramm sind alle Benotungen, die durch den befundenden Radiologen 2 vergeben wurden, mit ihren Häufigkeiten – über alle Darmabschnitte kumuliert – aufgetragen.

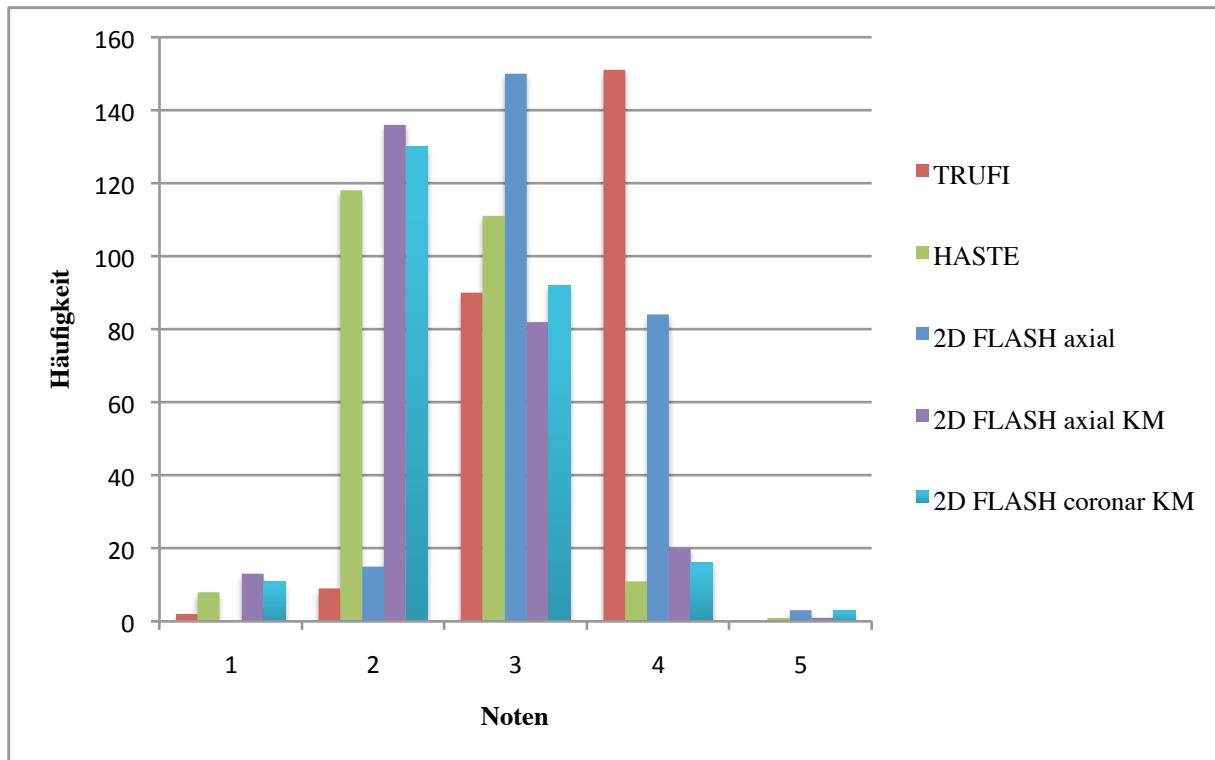


Abbildung 15: Histogramm der gesamten Sequenz-Bewertungen (Radiologe 2)

4.1.2.1 Gesamtreihenfolge der Sequenzen für Radiologe 2

Die Auswertung der eben dargestellten Benotungen des Radiologen 2 im Friedman-Test ergibt folgende Rangfolge nach dem Mittleren Rang. Mit dargestellt sind der Median der Benotung und die zugehörigen 25%- und 75%-Quartilen.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	2D-FLASH axial mit KM	2	2	3	2,22
2	2D-FLASH coronar mit KM	2	2	3	2,29
2	HASTE	2	2	3	2,34
4	2D-FLASH axial	3	3	4	3,84
5	TRUFI	3	4	4	4,30

n = 252; p-Wert < 0,005

Tabelle 16: Rangfolge der Sequenzen über alle Darmabschnitte (Radiologe 2)

Die Ergebnisse des Radiologen 2 zeigen ein völlig anderes Bild als die Beurteilungen der anderen Radiologen. Hierauf soll in der Diskussion näher eingegangen werden.

Stellt man die Mediane der Benotung mit 25%- und 75%-Quartilen, sowie den Mittleren Rang aus dem Friedman-Test grafisch dar, ergibt sich das nachfolgende Diagramm.

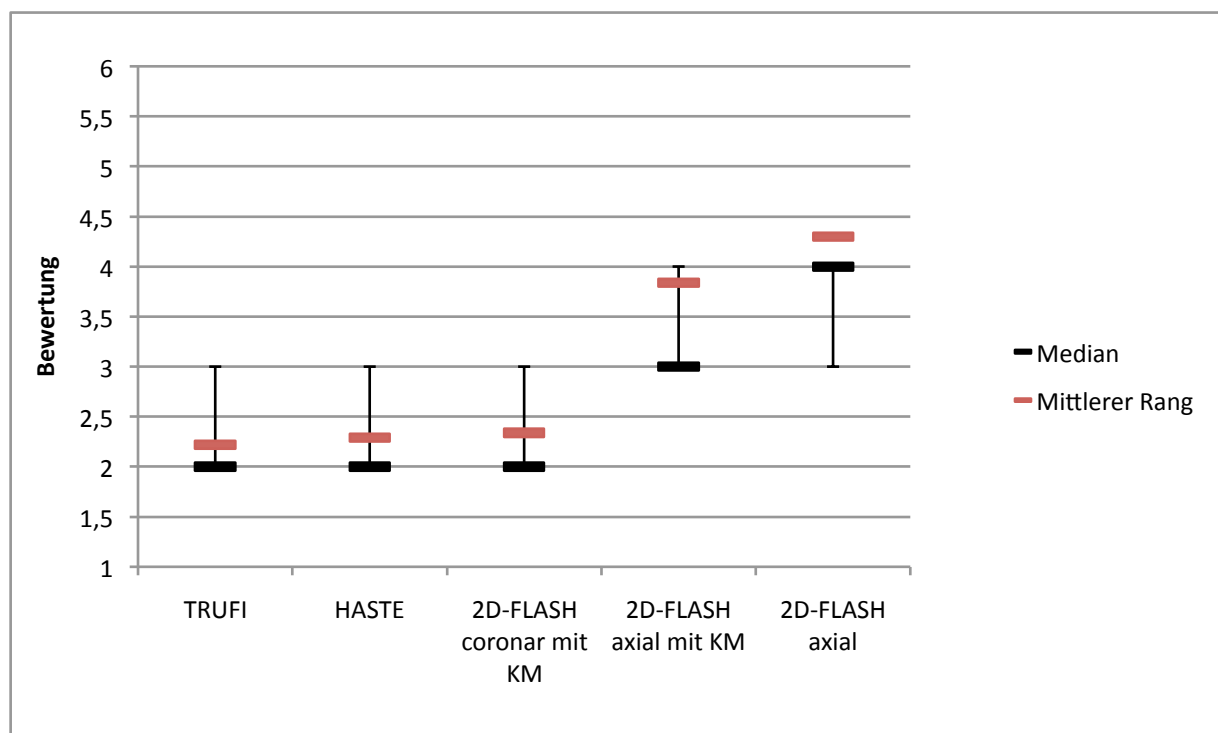


Abbildung 16: Gesamt-Sequenzrangfolge (Radiologe 2)

Zur Überprüfung der Signifikanz der erstrangig bewerteten Sequenz gegenüber den nachfolgenden Rängen wurden auch hier die Bewertungen zueinander im Wilcoxon-Test überprüft. Dabei zeigen sich alle Unterschieds-Untersuchungen hochsignifikant.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	2D-FLASH coronar mit KM	HASTE	2D-FLASH axial	TRUFI
1. Rang				
2D-FLASH axial mit KM	0,000	0,000	0,000	0,000

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 17: Signifikanz des ersten Rangs der Gesamtrangfolge (Radiologe 2)

4.1.2.2 Reihenfolge der Sequenzen im Jejunum für Radiologe 2

Die Benotungen für das Jejunum, vergeben durch den Radiologen 2, ergeben die nachfolgende Tabelle. Die Sequenzen HASTE und 2D-FLASH coronar mit KM zeigen hier im Mittleren Rang keinen Unterschied, somit ergibt sich hier eine kleine Abweichung zur Gesamtrangfolge des Radiologen 2.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	2D-FLASH axial mit KM	2	3	3	2,25
2	HASTE	2	3	3	2,29
2	2D-FLASH coronar mit KM	2	3	3	2,29
4	2D-FLASH axial	3	3	4	3,89
5	TRUFI	3	4	4	4,27

n = 84; p-Wert < 0,005

Tabelle 18: Rangfolge der Sequenzen im Jejunum (Radiologe 2)

Die Überprüfung der Signifikanz der erstrangig bewerteten Sequenz gegenüber der zweit- und drittrangigen Sequenz sind im Jejunum bei Radiologen 2 nicht signifikant; gegenüber dem 4. und 5. Rang ist die Beurteilungsdifferenz hochsignifikant.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	HASTE	2D-FLASH coronar mit KM	2D-FLASH axial	TRUFI
1. Rang				
2D-FLASH axial mit KM	0,558	0,553	0,000	0,000

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 19: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Jejunum (Radiologe 2)

4.1.2.3 Reihenfolge der Sequenzen im Ileum für Radiologe 2

Die für die Darstellung des Ileum durch den Radiologen 2 vergebenen Noten zeigen wiederum das gleiche - von allen anderen Auswertern abweichende - Rangfolge-Bild.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	2D-FLASH axial mit KM	2	2	3	2,32
2	HASTE	2	2	3	2,31
3	2D-FLASH coronar mit KM	2	2	3	2,32
4	2D-FLASH axial	3	3	4	3,84
5	TRUFI	3	4	4	4,33

n = 84; p-Wert < 0,005

Tabelle 20: Rangfolge der Sequenzen im Ileum (Radiologe 2)

Auch hier ist der Unterschied zwischen Rang 1, 2 und 3 nicht signifikant, gegenüber Rang 4 und 5 dann hochsignifikant.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	HASTE	2D-FLASH coronar mit KM	2D-FLASH axial	TRUFI
1. Rang				
2D-FLASH axial mit KM	0,644	0,657	0,000	0,000

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 21: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Ileum (Radiologe 2)

4.1.2.4 Reihenfolge der Sequenzen im terminalen Ileum für Radiologe 2

In der Rangfolge der Sequenzbeurteilungen im terminalen Ileum ergibt sich bei Radiologen 2 eine der Gesamttrangfolge des Radiologen 2 identische Abfolge.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	2D-FLASH axial mit KM	2	2	3	2,21
2	2D-FLASH coronar mit KM	2	2	3	2,27
3	HASTE	2	2	3	2,42
4	2D-FLASH axial	3	3	4	3,80
5	TRUFI	3	4	4	4,30

n = 84; p-Wert < 0,005

Tabelle 22: Rangfolge der Sequenzen im Term. Ileum (Radiologe 2)

Der Wilcoxon-Test fällt für die Untersuchung von Rang 1 zu Rang 2 und 3 nicht signifikant aus, gegenüber den Rängen 4 und 5 dann aber hochsignifikant.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	2D-FLASH coronar mit KM	HASTE	2D-FLASH axial	TRUFI
1. Rang				
2D-FLASH axial mit KM	0,614	0,290	0,000	0,000

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 23: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Term. Ileum (Radiologe 2)

4.1.3 Bewertungen Radiologe 3

Der nachfolgenden Häufigkeitsverteilung liegen alle Benotungen des Radiologen 3 zu Grunde. Eine Unterscheidung in die einzelnen Darmabschnitte erfolgte nicht.

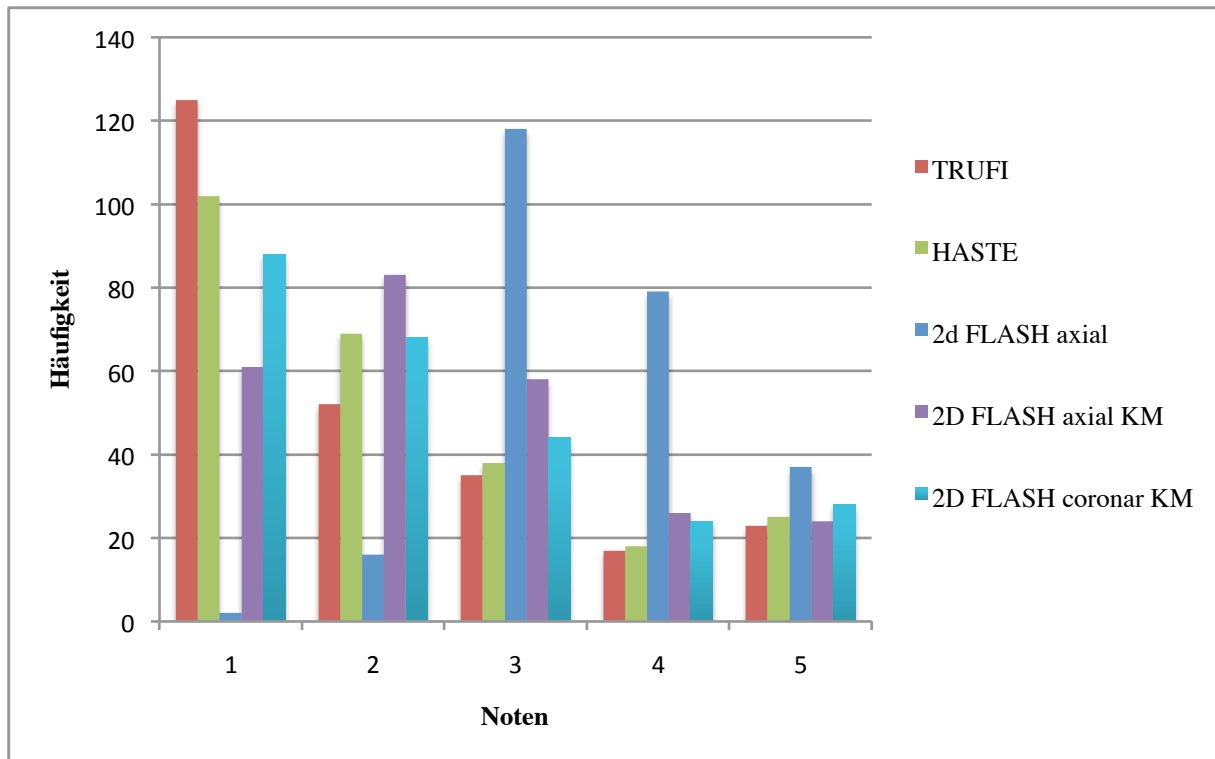


Abbildung 17: Histogramm der gesamten Sequenz-Bewertungen (Radiologe 3)

4.1.3.1 Gesamtreihenfolge der Sequenzen für Radiologe 3

Legt man alle von Radiologen 3 oben dargestellten Bewertungen der Berechnung des Mittleren Rangs im Friedman-Test zugrunde ergibt sich die nachfolgend dargestellte Rangverteilung.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	TRUFI	1	2	3	2,34
2	HASTE	1	2	3	2,54
2	2D-FLASH coronar mit KM	1	2	3	2,72
4	2D-FLASH axial mit KM	2	2	3	2,95
5	2D-FLASH axial	3	3	4	4,45

n = 252; p-Wert < 0,005

Tabelle 24: Rangfolge der Sequenzen über alle Darmabschnitte (Radiologe 3)

Stellt man die Mediane der Benotung mit 25%- und 75%-Quartilen, sowie den Mittleren Rang aus dem Friedman-Test grafisch dar, ergibt sich das nachfolgende Diagramm.

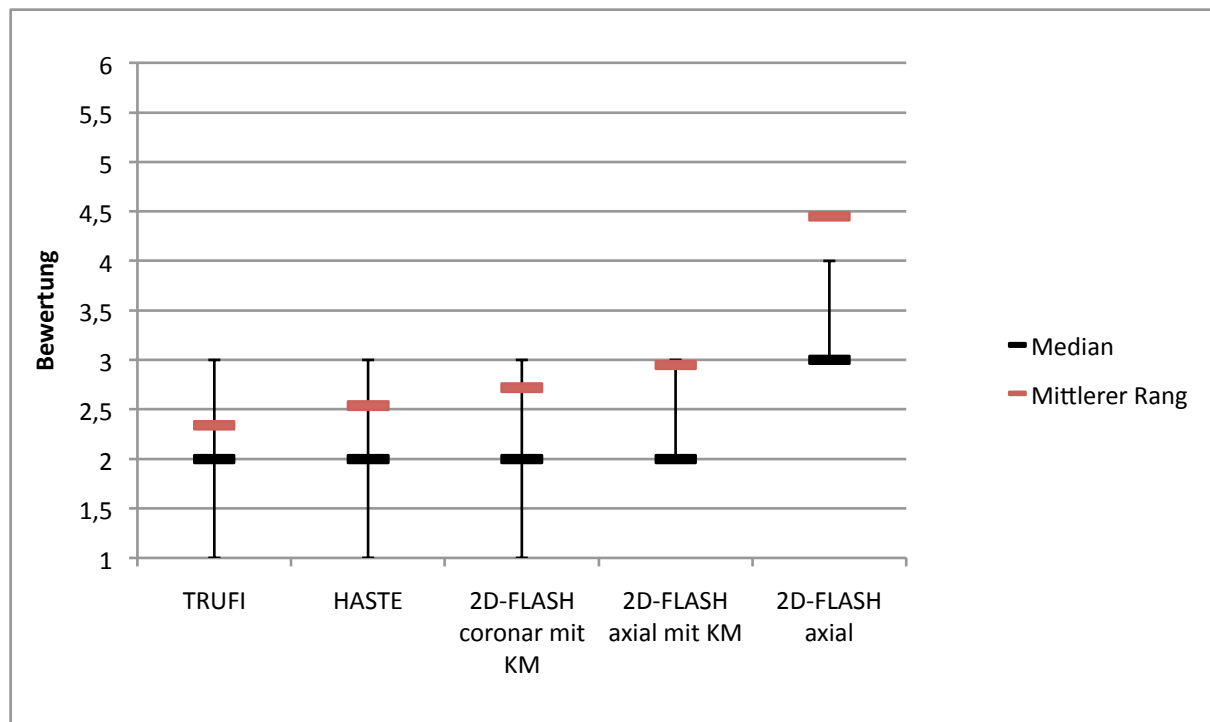


Abbildung 18: Gesamt-Sequenzrangfolge (Radiologe 3)

Zur Überprüfung der Signifikanz der erstrangig bewerteten Sequenz gegenüber den nachfolgenden Rängen wurden auch hier die Bewertungen zueinander im Wilcoxon-Test überprüft. Dabei zeigen sich alle Unterschieds-Untersuchungen hochsignifikant.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	HASTE	2D-FLASH coronar mit KM	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH axial
1. Rang	0,010	0,000	0,000	0,000
TRUFI				

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 25: Signifikanz des ersten Rangs der Gesamtrangfolge (Radiologe 3)

4.1.3.2 Reihenfolge der Sequenzen im Jejunum für Radiologe 3

In nachfolgender Tabelle ist die Rangfolge der Sequenzen nach Beurteilung durch Radiologen 3, isoliert für das Jejunum betrachtet, aufgetragen.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	TRUFI	1	2	3	2,35
2	HASTE	1	2	3	2,39
3	2D-FLASH coronar mit KM	1	2	3	2,68
4	2D-FLASH axial mit KM	2	2	3	2,92
5	2D-FLASH axial	3	4	4	4,66

n = 84; p-Wert < 0,005

Tabelle 26: Rangfolge der Sequenzen im Jejunum (Radiologe 3)

Der Unterschied in der Benotung der im Jejunum erst-, zweit und drittplatzierten Sequenz bei Radiologen 3 stellt sich im Wilcoxon-Test nicht signifikant dar; für die Ränge 4 und 5 liegen dann wieder hochsignifikante Unterschiede zum Rang 1 vor.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	HASTE	2D-FLASH coronar mit KM	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH axial
1. Rang	0,733	0,230	0,001	0,000
TRUFI				

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 27: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Jejunum (Radiologe 3)

4.1.3.3 Reihenfolge der Sequenzen im Ileum für Radiologe 3

Auch für Radiologen 3 werden die Rangfolgen der Sequenzen getrennt für das Ileum als Tabelle dargestellt. Diese findet sich im Folgenden.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	TRUFI	1	1	2	2,20
2	HASTE	1	1	2	2,51
3	2D-FLASH coronar mit KM	1	2	3	2,67
4	2D-FLASH axial mit KM	1	2	3	3,05
5	2D-FLASH axial	3	3	4	4,58

n = 84 ; p-Wert < 0,005

Tabelle 28: Rangfolge der Sequenzen im Ileum (Radiologe 3)

Der p-Wert des Wilcoxon-Test für die Signifikanz des Rangunterschieds von der erst- zu allen nachfolgend platzierten Sequenzen fällt hochsignifikant aus.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	HASTE	2D-FLASH coronar mit KM	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH axial
1. Rang	0,001	0,002	0,000	0,000
TRUFI				

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 29: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Ileum (Radiologe 3)

4.1.3.4 Reihenfolge der Sequenzen im terminalen Ileum für Radiologe 3

Abschließend für Radiologen 3 sind hier die Rangfolge des Mittleren Rangs, sowie der Median der Bewertung, mit 25%- und 75 %-Perzentile, getrennt für das terminale Ileum tabellarisch dargestellt.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	TRUFI	1	2	4	2,48
2	HASTE	1	2	4	2,71
3	2D-FLASH coronar mit KM	1	2	4	2,81
4	2D-FLASH axial mit KM	1	2	4	2,89
5	2D-FLASH axial	3	3	5	4,11

n = 84; p-Wert < 0,005

Tabelle 30: Rangfolge der Sequenzen im term. Ileum (Radiologe 3)

Die Überprüfung auf Signifikanz des Rangunterschieds zwischen Sequenz 1 und 2 ergibt hier kein signifikantes Ergebnis. Zur dritt- und viertrangig platzierten Sequenz ergibt sich ein signifikantes und zur letztplatzierten Sequenz ein hochsignifikantes Ergebnis.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	HASTE	2D-FLASH coronar mit KM	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH axial
1. Rang	0,128	0,041	0,027	0,000
TRUFI				

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 31: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Term. Ileum (Radiologe 3)

4.1.4 Bewertungen Radiologe 4

Die nachfolgende Darstellung zeigt alle durch Radiologen 4 vergebenen Benotungen aller betrachteten Darmabschnitte als Häufigkeitsverteilung.

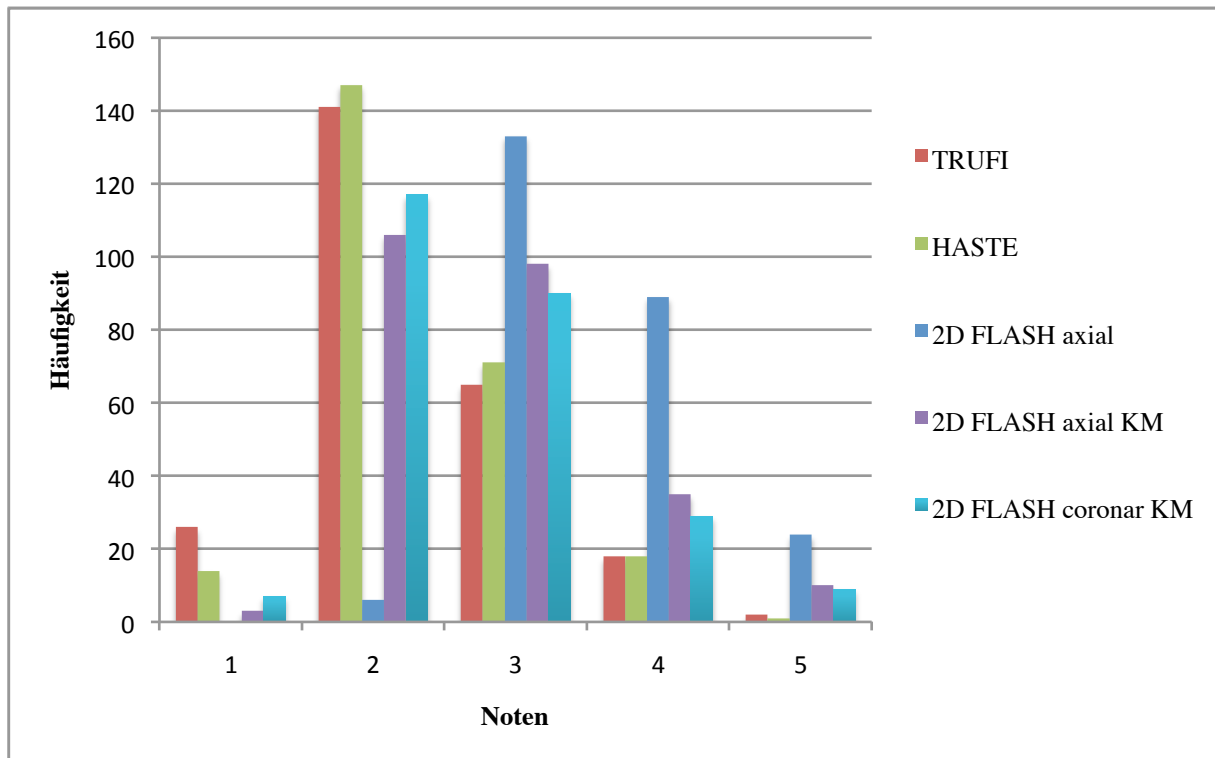


Abbildung 19: Histogramm der gesamten Sequenz-Bewertungen (Radiologe 4)

4.1.4.1 Gesamtreihenfolge der Sequenzen für Radiologe 4

Trägt man die Ergebnisse der Berechnung des Friedman-Tests mit allen von Radiologen 4 vergebenen Bewertungen tabellarisch auf, ergibt sich nachfolgende Rangverteilung. Diese stimmt mit den Abfolgen bei Radiologen 1 und 3 überein.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	TRUFI	2	2	3	2,25
2	HASTE	2	2	3	2,32
2	2D-FLASH coronar mit KM	2	3	3	2,83
4	2D-FLASH axial mit KM	2	3	3	3,07
5	2D-FLASH axial	3	3	4	4,52

n = 252; p-Wert < 0,005

Tabelle 32: Rangfolge der Sequenzen über alle Darmabschnitte (Radiologe 4)

Stellt man die Mediane der Benotung mit 25%- und 75%-Quartilen, sowie den Mittleren Rang aus dem Friedman-Test grafisch dar, ergibt sich das nachfolgende Diagramm.

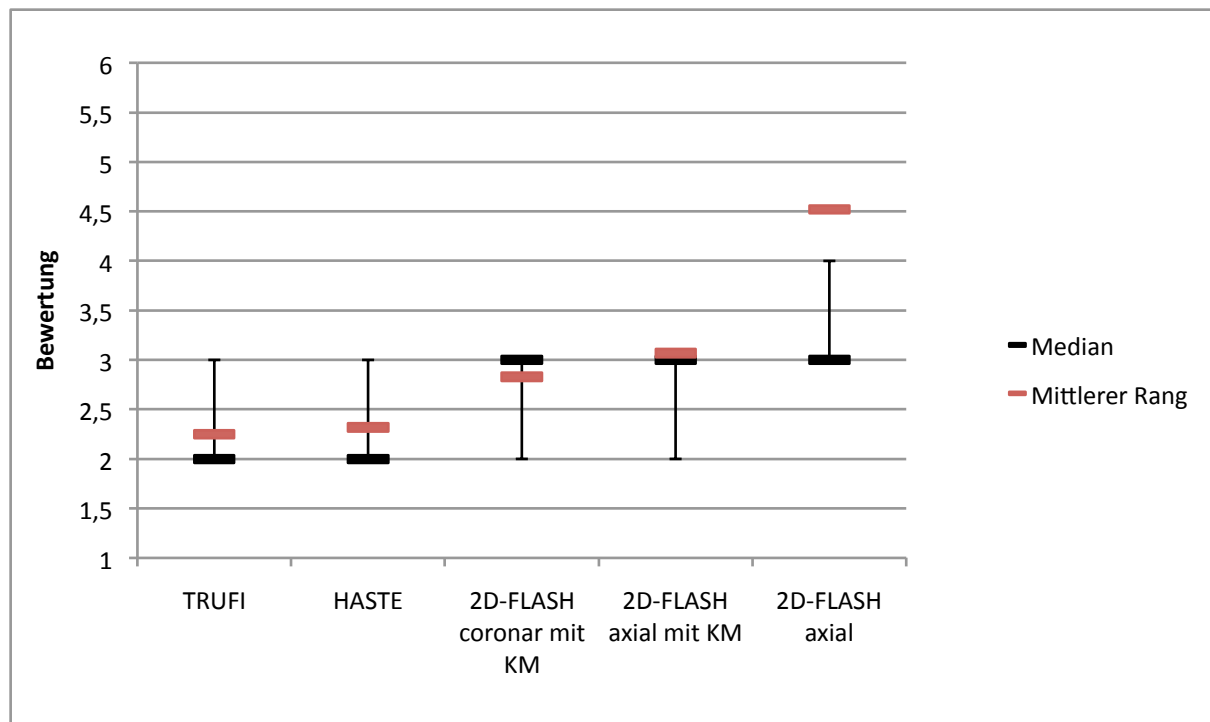


Abbildung 20: Gesamt-Sequenzrangfolge (Radiologe 4)

Die Gesamtrangfolge der Bewertung des Radiologen 4 ist lediglich im Vergleich Rang 1 zu Rang 2 nicht signifikant, alle weiteren p-Werte aus dem Wilcoxon-Test fallen hochsignifikant aus, wie nachfolgende Tabelle zeigt.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	HASTE	2D-FLASH coronar mit KM	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH axial
1. Rang	0,301	0,000	0,000	0,000
TRUFI				

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 33: Signifikanz des ersten Rangs der Gesamtrangfolge (Radiologe 4)

4.1.4.2 Reihenfolge der Sequenzen im Jejunum für Radiologe 4

Die Bewertung und damit auch die Rangfolge der Sequenzen im Jejunum ist bei Radiologen 4 identisch zur Gesamtrangfolge. Lediglich die Sequenzen auf Rang 3 und Rang 4 haben die Reihenfolge bei geringer Bewertungsverschiebung getauscht.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	TRUFI	2	2	3	2,24
2	HASTE	2	2	3	2,29
3	2D-FLASH axial mit KM	2	3	3	3,10
4	2D-FLASH coronar mit KM	2	3	3	3,11
5	2D-FLASH axial	3	3	4	4,26

n = 84, p-Wert < 0,005

Tabelle 34: Rangfolge der Sequenzen im Jejunum (Radiologe 4)

Der Wilcoxon-Test zeigt für den Rangunterschied zwischen Rang 1 und Rang 2 keine Signifikanz auf. Alle weiteren Testungen haben dann ein hochsignifikantes Ergebnis.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	HASTE	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH coronar mit KM	2D-FLASH axial
1. Rang	0,577	0,000	0,000	0,000
TRUFI				

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert 0,01 hochsignifikant

Tabelle 35: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Jejunum (Radiologe 4)

4.1.4.3 Reihenfolge der Sequenzen im Ileum für Radiologe 4

Die Rangfolge der Sequenzen getrennt für das Ileum betrachtet ist bei Radiologen 4 identisch zur Gesamtrangfolge ohne Auftrennung nach den Darmabschnitten beim gleichen Auswerter.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	TRUFI	2	2	3	2,16
2	HASTE	2	2	3	2,37
3	2D-FLASH coronar mit KM	2	2	3	2,67
4	2D-FLASH axial mit KM	2	3	3	3,09
5	2D-FLASH axial	3	3	4	4,71

n = 84, p-Wert < 0,005

Tabelle 36: Rangfolge der Sequenzen im Ileum (Radiologe 4)

Die Signifikanz der Unterschiede Rang 1 zu allen nachfolgenden Platzierungen ist hochsignifikant, mit Ausnahme des Wilcoxon-Tests zu Rang 2 – hier erreicht das Ergebnis keine Signifikanz.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	HASTE	2D-FLASH coronar mit KM	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH axial
1. Rang	0,074	0,000	0,000	0,000
TRUFI				

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 37: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Ileum (Radiologe 4)

4.1.4.4 Reihenfolge der Sequenzen im terminalen Ileum für Radiologe 4

Die Bewertungen des Radiologen 4 getrennt für das terminale Ileum weist keine Abweichung von der entsprechenden Gesamtbewertung auf. Somit ergibt sich eine der Gesamtrangfolge des Radiologen 4 identische Tabelle.

Rang	Sequenz	25%-Quartile	Median	75%-Quartile	Mittlerer Rang (im Friedman-Test)
1	HASTE	2	2	3	2,31
2	TRUFI	2	2	3	2,35
3	2D-FLASH coronar mit KM	2	2	3	2,71
4	2D-FLASH axial mit KM	2	2	3	3,03
5	2D-FLASH axial	3	3	4	4,60

n = 84, p-Wert < 0,005

Tabelle 38: Rangfolge der Sequenzen im term. Ileum (Radiologe 4)

Hier fällt der p-Wert des Wilcoxon-Test für die sehr ähnlich bewerteten Sequenzen auf den Rängen 1 und 2 nicht signifikant aus. Der Unterschied zu Rang 3 ist dann signifikant und zu Rang 4 und 5 hochsignifikant.

	2. Rang	3. Rang	4. Rang	5. Rang
	TRUFI	2D-FLASH coronar mit KM	2D-FLASH axial mit KM	2D-FLASH axial
1. Rang	0,785	0,011	0,000	0,000
HASTE				

p-Werte nach Wilcoxon; p-Wert <0,05 signifikant, p-Wert <0,01 hochsignifikant

Tabelle 39: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Term. Ileum (Radiologe 4)

4.2 Übereinstimmung der Untersucher im Kriterium Bildqualität

4.2.1 Nach vergebenen Bewertungen

Die folgende Tabelle gibt die Kendall-W-Werte als Maß für die Übereinstimmung der vergebenen Noten für die einzelnen Sequenzen, getrennt nach den drei Darmabschnitten und gesamt wieder.

	Kendall W-Werte für Sequenz-Noten im Darmabschnitt			
	Jejunum	Ileum	Terminales Ileum	Gesamt
TRUFI	0,482	0,529	0,549	0,403
HASTE	0,505	0,593	0,572	0,440
2D-FLASH axial	0,432	0,429	0,512	0,348
2D-FLASH KM axial	0,533	0,568	0,617	0,450
2D-FLASH coronar	0,509	0,535	0,588	0,421

Tabelle 40: Übereinstimmung der Benotungen aller Radiologen für die einzelnen Darmabschnitte und gesamt

Die Tabelle besagt, dass die vergebenen Noten zwar überzufällig häufig übereinstimmend vergeben werden, jedoch erreicht die Übereinstimmung in keinem Darmabschnitt bei keiner der durchgeführten Sequenzen einen wirklich hohen Kendall-W-Wert $> 0,700$.

Dies ist wohl darauf zurückzuführen, dass die verschiedenen Auswerter für sich unterschiedliche Bedingungen an die einzelnen Notenstufen stellen. Daher soll im Folgenden die Übereinstimmung der Ränge der einzelnen Sequenzen beurteilt werden.

4.2.2 Nach sich ergebenden Rängen

Für die folgende Tabelle wurden die Noten der vier Radiologen zunächst getrennt in eine Gesamttrangfolge gebracht und die sich ergebenden Ränge auf Übereinstimmung geprüft. Hier ergibt sich eine deutlich höhere Übereinstimmung als bei den Noten. So erfolgte die Vergabe

des letzten Rangs für die Sequenz 2D-FLASH axial übereinstimmend. Eine nahezu ebenso hohe Übereinstimmung trifft für die Rangvergabe für die Sequenzen TRUFI und 2D-FLASH axial mit KM zu. Mit nur geringer Abweichung unter den Radiologen erfolgt die Rangvergabe für 2D-FLASH coronar mit KM. Mit Abstand aber noch immer überzufällig häufig erfolgte die gleiche Rangvergabe für das HASTE-Sequenzprotokoll.

	Kendall W-Werte der Rangvergabe
TRUFI	0,905
HASTE	0,511
2D-FLASH axial	1,0
2D-FLASH axial mit KM	0,905
2D-FLASH coronar mit KM	0,797

Tabelle 41: Übereinstimmung der Gesamt-Sequenz-Ränge (Radiologe 1-4)

4.3 Beurteilung der Kriterien „Vorliegende Entzündung“, „Pathologische Lymphknoten“ und Distension

Bei 29 (34,52%) Patienten wurde eine vorliegende Entzündung von allen vier Radiologen ausgeschlossen; in 2 (2,38%) Fällen wurden übereinstimmend nicht sichere Entzündungszeichen diagnostiziert und in weiteren 18 (21,43%) der bewerteten Fälle wurde übereinstimmend das sichere Vorliegen entzündlicher Aktivität bejaht.

In den verbleibenden 35 (41,67%) Fällen wurde keine übereinstimmende Bewertung zum Vorliegen einer Entzündung erzielt.

	Keine Entzündung	Nicht sichere Zeichen	Sichere Zeichen
Anzahl der Fälle mit übereinstimmender Beurteilung	29	2	18

Tabelle 42: Übereinstimmende Beurteilung vorliegender Entzündungszeichen

Neben der Beurteilung der entzündlichen Aktivität wurde auch bewertet, ob in den auszuwertenden MRT-Aufnahmen pathologisch veränderte, d.h. vergrößerte mesenteriale Lymphknoten zu erkennen sind. In 53 (63,09%) Fällen wurde das Vorliegen von Lymphknoten einheitlich verneint, in 3 (3,57%) Fällen ebenso einheitlich bejaht. In den verbleibenden 38 (45,24%) Untersuchungen trafen die vier Radiologen voneinander abweichende Beurteilungen.

	Keine path. Lymphknoten	Path. Lymphknoten vorhanden
Anzahl der Fälle mit übereinstimmender Beurteilung	53	3

Tabelle 43: Beurteilung vorliegender path. Lymphknoten

Die Distension der Darmabschnitte wurde insgesamt sehr gut bewertet. So wurde in allen Abschnitten zumindest eine 50-80 % Distension erreicht, im Jejunum und Terminalen Ileum wurde entsprechend der Bewertungen der vier Radiologen sogar in den meisten Fällen eine Distension von über 80% erreicht.

Im Darmabschnitt	Bewertung der Distension		
	25%-Quartile	Median	75%-Quartile
Jejunum	1	1	2
Ileum	1	2	2
Terminales Ileum	1	2	2

p-Wert < 0,000

Tabelle 44: Beurteilung der Distension der einzelnen Darmabschnitte (Radiologe 1-4)

4.3.1 Übereinstimmung der Radiologen im Kriterium „Vorliegende Entzündung“

Um beurteilen zu können, ob das Verfahren des MR-Enteroklysmas Untersucher-unabhängig eine verlässliche Aussage zum Vorliegen einer Entzündung und ggfs. zur Ausprägung derselben erlaubt, wurde die Übereinstimmung der Beurteilung der vier Radiologen zum Entzündungsgrad der jeweiligen Darmabschnitte im Kendall-W-Test untersucht.

	Jejunum	Ileum	Terminales Ileum
Kendall-W	0,527	0,724	0,823

Tabelle 45: Übereinstimmung der Beurteilung des Kriteriums "Vorliegende Entzündung"

Da Kendall-W-Werte größer 0,7 eine hohe Übereinstimmung des untersuchten Merkmals anzeigen, kann man sagen, dass die Aussagen der vier Radiologen zum Vorliegen einer Entzündung im Ileum und terminalen Ileum eine sehr hohe Übereinstimmung und im Jejunum immer noch einen mittleren Übereinstimmungsgrad aufweisen.

Die Untersuchungsmethode und deren Auswertung weist also in diesem Punkt eine hohe Untersucherunabhängigkeit auf.

4.3.2 Übereinstimmung der Radiologen im Kriterium „Pathologische Lymphknoten“

Alle vier Radiologen hatten im Rahmen der Bildauswertung auch zu beurteilen, ob sich pathologische Lymphknoten (Definition siehe Kapitel 3.3) im Bild nachweisen lassen.

Die Beurteilungen wurden je Patient und je Darmabschnitt auf ihre Übereinstimmung hin überprüft. Die folgende Tabelle gibt den Grad der Übereinstimmung an Hand der Kendall-W-Werte wieder.

	Jejunum	Ileum	Terminales Ileum
Kendall-W	0,402	0,505	0,505

Tabelle 46: Übereinstimmung der Beurteilung des Kriteriums "Path. Lymphknoten"

Hier liegt der Kendall-W-Wert an der Grenze der geringen zur mittleren Übereinstimmung ($W = 0,482$). Die Beurteilung, ob pathologisch vergrößerte Lymphknoten vorliegen erfolgt somit noch überzufällig häufig übereinstimmend. Erreicht aber noch keinen sicheren Übereinstimmungsgrad.

Die Lymphknotenbeurteilung scheint also abhängig vom auswertenden Radiologen zu sein.

4.3.3 Übereinstimmung der Radiologen im Kriterium „Distension“

Der Grad der Distension wurde von jedem bewertenden Radiologen unabhängig bewertet;; dabei wurde – wie bereits im Kapitel 3.3 beschrieben, folgende Skala verwendet:

0	1	2
Distension < 50 %	Distension 50 - 80 %	Distension > 80 %

Abbildung 21: Skala zur Bewertung der Dünndarm-Distension

Die vergebenen Bewertungen der vier Radiologen wurden nun je Darmabschnitt auf ihre Übereinstimmung überprüft. Die sich ergebenden Kendall-W-Werte belegen insgesamt eine mittlere Übereinstimmung der Beurteilungen ($W > 0,482$ und $W < 0,7$). Die einzelnen Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle.

	Jejunum	Ileum	Terminales Ileum
Kendall-W	0,497	0,581	0,566

Tabelle 47: Übereinstimmung der Beurteilung des Kriteriums "Distension"

5 Diskussion

5.1 Auswertung der erzielten Ergebnisse

5.1.1 Rangfolge der Sequenzprotokolle im Kriterium „Bildqualität“

Bei Auswertung der vergebenen Gesamtränge aller vier beurteilenden Radiologen ergibt sich folgende Reihung:

Rang	Sequenzprotokoll	Mittlerer Rang
1.Rang	HASTE	2,49
2.Rang	2D-FLASH coronar mit KM	2,60
3.Rang	TRUFI	2,77
4.Rang	2D-FLASH axial mit KM	2,85
5.Rang	2D-FLASH axial	4,28

Tabelle 48: Gesamtreihenfolge der Bildqualität

Betrachtet man die Ergebnisse getrennt für alle vier beurteilenden Radiologen, fällt auf, dass die Bewertungen der Radiologen 1, 3 und 4 ein relativ einheitliches Bild, sowohl gesamt als auch für alle drei Darmabschnitte einzeln, ergeben: die TRUFI-Sequenz erhält neben dem HASTE-Protokoll die besten Noten. Nur der Radiologe 2 weicht hiervon deutlich ab – er vergibt für das TRUFI-Protokoll in allen Darmabschnitten die schlechtesten Benotungen. Somit ergibt sich in der Gesamtbetrachtung das eingangs bereits dargestellte Ergebnis.

Wie deutlich sich die abweichende Bewertung des Radiologen 2 auswirkt, zeigt sich, wenn man die Gesamtübersicht nochmals nur für die Radiologen 1,3 und 4 getrennt erstellt:

Rang	Sequenzprotokoll	Mittlerer Rang
1.Rang	TRUFI	2,27
2.Rang	HASTE	2,54
3.Rang	2D-FLASH coronar mit KM	2,70
4.Rang	2D-FLASH axial mit KM	3,06
5.Rang	2D-FLASH axial	4,43

n = 756, p-Wert < 0,005

Tabelle 49: Gesamtrangfolge der Bildqualität, nur Radiologe 1, 3 und 4

Das TRUFI-Sequenzprotokoll erhält eine Aufwertung um eine halbe Bewertungsstufe und läge somit knapp vor dem sonst führenden HASTE-Protokoll.

Die hier gefundenen Bewertungen stimmen auch mit den in der aktuellen Literatur zu findenden Aussage überein (siehe hierzu die folgenden Text-Abschnitte): je nach Gewichtung des befundenden Radiologen eignen sich die verschiedenen Sequenzen – insbesondere HASTE und TRUFI bzw. die von anderen Geräteherstellern anders benannten aber sonst identischen Protokolle - unterschiedlich gut zur Diagnostik verschiedener CED-Symptome; so sind HASTE-Aufnahmen zur Diagnostik von oberflächlichen Erosionen und Wandverdickungen besser geeignet, TRUFI-Aufnahmen (insbesondere durch das sog. black-border-Phänomen, d.h. eine comicartige schwarze Darstellung der Darmwand) haben einen Vorteil bei der Darstellung von Wandulzerationen (bis hin zum ausgebildeten sog. Pflastersteinrelief) und mesenterialer Pathologien [12, 27].

5.1.2 Übereinstimmung der Befundungen der vier Untersucher

Neben der Untersuchung der Bildqualität verschiedener MRT-Sequenzen durch die vier beteiligten Radiologen, soll auch die Reproduzierbarkeit der Befund-Ergebnisse durch verschiedene Befunder bewertet werden. Hierzu wurden die Kriterien „aktive Entzündung“ und „Vorhandensein pathologischer Lymphknoten“ herangezogen.

5.1.2.1 Kriterium Entzündung

Gerade in den Darmabschnitten Ileum und terminales Ileum erreichen die Untersucher eine hohe Übereinstimmung in ihrer Aussage zum Vorliegen oder dem Fehlen einer Entzündung, im Jejunum fällt die übereinstimmende Beurteilung etwas geringer aus.

5.1.2.2 Kriterium Lymphknoten

Insgesamt ist die Übereinstimmung der Beurteilung über vorliegende pathologische Lymphknoten geringer ausgeprägt als noch beim Kriterium vorliegende Entzündung. Es ergibt sich aber auch hier die Situation, dass die übereinstimmende Beurteilung der Lymphknoten in den Bereichen Ileum und terminales Ileum deutlich öfter erfolgt, als für das Jejunum.

5.1.3 Beurteilung der technischen Qualität anhand der erzielten Distension

Die Distension der drei betrachteten Darmabschnitte nach Kontrastmittelgabe war insgesamt gesehen gut, im Ileum und terminalen Ileum noch etwas besser als im Jejunum.

Die Aussage der vier Radiologen zur Güte der Distension erfolgte noch mit überzufälliger Übereinstimmung; im Ileum und terminalen Ileum erfolgte die übereinstimmende Vergabe der Graduierung nochmals deutlich häufiger als bei der jejunalen Distension.

5.2 Vergleich der Ergebnisse mit aktueller Literatur

Es finden sich nur wenige Arbeiten, die einen direkten Vergleich verschiedener Sequenzprotokolle anstreben. Arbeiten zur Überprüfung der Stabilität der Methode durch den Vergleich der Befundung verschiedener Untersucher am gleichen zu beurteilenden MRT-Bild ließen sich nicht finden.

Die Literaturrecherche wurde online in der Medline-Datenbank durchgeführt; verwendet wurden die im Folgenden angegebenen Suchkriterien:

Suchkriterien „Medline-Datenbank“
MR or MRT or magnetic resonance
and
Crohn or small bowel or CED or IBD
and
Im Zeitraum seit 2000

Tabelle 50: Suchkriterien der Literaturrecherche in der Medline-Datenbank

Die sich ergebende Trefferliste wurde anhand Durchsicht der Abstracts auf folgende Artikel reduziert:

Verwendete Vergleichsarbeiten aus der Literatursuche
Jeff Fidler, MR Imaging of the Small Bowel, Radiologic Clinics of North America, 2007; 317-331
Damian J. M. Tolan et al., MR Enterographic Manifestations of Small Bowel Crohn Disease, RadioGraphics, 2010; 30:367-384
Nicholas Gourtsoyiannis et al., MR enteroclysis protocol optimization: comparison between 3D FLASH with fat saturation after intravenous gadolinium injection and true FISP sequences, European radiology, 2001; 11: 908-913
C. Hohl et al., Diagnostik chronisch entzündlicher Darmerkrankungen bei Kindern und Jugendlichen: MRT mit True-FISP als neuer Goldstandard?, RöFo 2005; 177: 856-863
Gabriele Masselli et al., Assessment of Crohn´s disease in the small bowel: prospective comparison of magnetic resonance enteroclysis with conventional enteroclysis, European Radiology, 2006; 16: 2817-2827
Gabriele Masselli et al., Comparison of MR enteroclysis with MR enterography and conventional enteroclysis in patients with Crohn´s disease, European Radiology, 2008; 18: 438-447

Tabelle 51: Übersicht der verwendeten Vergleichsarbeiten

5.2.1 Jeff Fidler, MR Imaging of the Small Bowel

Es handelt sich hier um einen Übersichtsartikel zur Diagnostik der CED im MRT. Fidler geht auf die Frage Enteroklysma gegenüber Enterographie, auf mögliche Kontrastmittel und auf zu verwendende Sequenzprotokolle ein. Laut der Beschreibung des Autors gibt es noch keinen Konsens zur zu verwendenden Sequenz; im eigenen Bereich werden folgende Sequenzprotokolle genutzt: axiale und coronare Single-shot-Sequenzen sowie axiale und coronare TrueFISP-Sequenzen. In den zweitgenannten Sequenzen, so erklärt der Autor, sind die mesenterialen Strukturen besser beurteilbar als in den SSFSE-Sequenzen. Ein weiterer Vergleich bzw. eine Bewertung der einzelnen Sequenz-Protokolle erfolgt in dieser Arbeit nicht.

Abfolge der Sequenzprotokolle
Axiale und coronare SSFSE
Axiale und coronare TrueFISP
T1w Fast Gradient
Coronare 2D gradient echo mit KM
Coronare 3D mit KM
Axiale 3D mit KM

Tabelle 52: Zeitl. Reihenfolge der MR-Sequenzen bei Fidler

5.2.2 Damian J. M. Tolan et al., MR Enterographic Manifestations of Small Bowel Crohn Disease

In ihrem Artikel beschreiben Tolan et al. die ihrer Meinung nach derzeit optimale Anfertigung einer MR-Enterographie. Im weiteren Verlauf des Artikels wird noch näher auf Befundung und mögliche Fehlinterpretationen eingegangen. In der Arbeit werden folgende Sequenzen in zeitlicher Reihenfolge verwendet und empfohlen:

Abfolge der Sequenzprotokolle
Coronare und axiale TrueFISP
Coronare und axiale T2w HASTE
Coronare T1w HASTE
Coronare 3D-FLASH T1w
Coronare 3D-FLASH T1w (30+70 sek. Nach KM-Gabe)
Axiale 3D-FLASH T1w (90 sek. Nach KM-Gabe)

Tabelle 53: Zeitl. Reihenfolge der Sequenz-Protokolle bei Tolan, 2010

Die gesamte Aufnahmezeit betrug weniger als 30 Minuten. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass es notwendig sei, eine zeitoptimierte Abfolge verschiedener Sequenzen anzuwenden, um alle möglichen Befunde einer CED, speziell des Morbus Crohn diagnostizieren zu können.

5.2.3 Nicholas Gourtsoyiannis et al., MR enteroclysis protocol optimization: comparison between 3D FLASH with fat saturation after intravenous gadolinium injection and true FISP sequences

In dieser Arbeit werden die Sequenzprotokolle TRUFI und 3D-FLASH T1w miteinander verglichen. Hierzu wurde bei 21 Patienten ein MR-Enteroklysma und ein konventionelles Eneteroklysma durchgeführt. Gourtsoyiannis et al. kommen zu dem Ergebnis, dass das TRUFI-Sequenzprotokoll eine bessere Gesamtbildqualität als das 3D-Flash-Protokoll bietet; um zu diesem Ergebnis zu kommen wurden folgende Faktoren verglichen:

Kriterien im Sequenz-Vergleich
Homogenität der Lumendarstellung im kleinen Becken (opacification)
Auffälligkeiten der Darmwand
Distension
Anzahl von Artefakten

Tabelle 54: Kriterien des Sequenz-Vergleichs bei Gourtsoyiannis et al.

Die Bewertung erfolgte durch zwei Radiologen, die ihre Festlegungen als Konsensentscheidung trafen.

5.2.4 C. Hohl et al., Diagnostik chronisch entzündlicher Darmerkrankungen bei Kindern und Jugendlichen: MRT mit True-FISP als neuer Goldstandard?

Hohl et al. untersuchten in ihrer Arbeit die Sensitivität und Spezifität verschiedener Sequenzprotokolle im Vergleich mit endoskopischen Befunden und klinischen Verlaufsparemtern sowie in 14 Fällen mit den Ergebnissen eines konventionellen Dünndarmenteroklysma. Ziel war es vor allem, die Verwendbarkeit des MR-Enteroklysma als Untersuchungsmethode bei Kindern und Jugendlichen zu untermauern. Untersucht wurden hierzu 24 Kinder und Jugendliche im Alter zwischen 7 und 21 Jahren mit vermuteter oder bekannter CED. Folgende Sequenzen wurden in die Untersuchung mit eingebunden:

Abfolge der Sequenzprotokolle
Koronare und axiale True-FISP
Koronare T2-TSE
Koronare HASTE
T1-gewichtete Kontrastmitteldynamik
Koronare und axiale True-FISP nach KM

Tabelle 55: Durchgeführte Sequenzen in zeitlicher Abfolge bei Hohl et al.

Die orale Kontrastierung erfolgte mit 2,5% Mannitol-Lösung. Die Auswertung der Arbeit erfolgte durch drei Radiologen, die Beurteilung erfolgte im Einzelnen als Konsensentscheid.

Kriterien im Sequenz-Vergleich
Sensitivität
Spezifität
Bildqualität (Weichteilkontrast und Artefaktanfälligkeit)

Tabelle 56: Kriterien des Sequenz-Vergleichs bei Hohl et al.

In den untersuchten Kriterien Sensitivität und Spezifität der einzelnen Sequenzen, Bildqualität als Ergebnis von Weichteilkontrast und Artefaktanfälligkeit zeigte sich das Sequenzprotokoll True-FISP den anderen Sequenzprotokollen überlegen. Dieses Ergebnis und die weiteren erhobenen Parameter Distension des Dünndarms und Akzeptanz der Untersuchung durch den Patienten lassen die Autoren zu dem Schluss kommen, dass die orale MR-Enterographie eine für Kinder geeignete Untersuchungsmethode zur Abklärung und Verlaufskontrolle einer CED sei.

5.2.5 Gabriele Masselli et al., Assessment of Crohn's disease in the small bowel: prospective comparison of magnetic resonance enteroclysis with conventional enteroclysis

Diese Studie dient dem Vergleich der Sensitivität und Spezifität des MR-Enteroklysmas, verglichen mit dem konventionellen Enteroklysmas. Es wurden 66 Patienten mit bekannter Crohn-Erkrankung mit beiden Verfahren untersucht und Sensitivität und Spezifität für die Befunde Ulzerationen, Pseudopolypen, Stenosen und Fisteln erhoben.

Abfolge der Sequenzprotokolle
MR-Fluoroscopie als Coronale T2w FSE
Transversale und coronale SSFSE
Coronale und axiale FIESTA
Coronale 3D-FSPGR mit KM

Tabelle 57: Zeitliche Abfolge der MR-Sequenzen, Masselli 2006

In einem zweiten Schritt wurde die Aussagekraft der durchgeführten MR-Sequenzen für einzelne Befunde erhoben.

	Überlegene Sequenzen	Unterlegene Sequenzen
Darstellung von Wandulzerationen	FIESTA	ssFSE, 3D-FSPGR
Fisteln	FIESTA	ssFSE, 3D-FSPGR
Pseudopolypen	FIESTA, ssFSE, 3D-FSPGR	-
Stenosierungen	3D-FSPGR	ssFSE, FIESTA
Aphtoide Ulzerationen	ssFSE	

Tabelle 58: Ergebnis des diagnostischen Sequenz-Vergleichs, Masselli 2006

Auch in dieser Arbeit erfolgte die Auswertung durch zwei Radiologen, die sich als Konsensentscheid auf ihre Beurteilung festlegten.

5.2.6 Gabriele Masselli et al., Comparison of MR enteroclysis with MR enterography and conventional enteroclysis in patients with Crohn's disease

Masselli et al. stellen in dieser Arbeit das MR-Enteroklysmas und die orale MR-Enterographie jeweils dem konventionellen Enteroklysmas gegenüber. Es wurden dazu insgesamt 40 Patienten mit gesichertem Morbus Crohn untersucht, 22 Untersuchungen wurden als MR-Enteroklysmas und 18 als MR-Enterographie durchgeführt. Folgende Sequenzprotokolle kamen zur Anwendung:

Abfolge der Sequenzprotokolle
Transversale und coronare single-shot fast SE
Coronare und axiale FIESTA
Coronare T1w-3D FAME ohne und mit KM
Transversale 2D fast spoiled CR

Tabelle 59: Durchgeführte Sequenz-Protokolle bei Maselli et al., 2008

Die Auswertung der Aufnahmen erfolgte durch zwei Radiologen als Konsensentscheidung. Die bewerteten Kriterien lauten wie folgt:

Kriterien im Sequenz-Vergleich
Distension
Darstellung von pathologischen Befunden mucosal
Darstellung von pathologischen Befunden mural
Darstellung von pathologischen Befunden mesenterial

Tabelle 60: Kriterien der Sequenz-Beurteilung bei Masselli et al., 2008

Die Auswertung erfolgte schließlich als Vergleich der diagnostischen Aussagekraft bzw. der Diagnostizierbarkeit der oben genannten Kriterien in den verschiedenen Sequenzen. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

	Überlegene Sequenzen	Unterlegene Sequenzen
Darstellung oberflächl. Erosionen	SSFSE	FIESTA, T1-FAME
Darstellung von Wandulzerationen	FIESTA, SSFSE	T1-FAME
Pseudopolypen und Fisteln	SSFSE, FIESTA, T1-FAME	-
Stenosierungen	T1-FAME mit KM	SSFSE, FIESTA

Tabelle 61: Ergebnisse des Sequenz-Vergleichs von Masselli et al., 2008

5.3 Anmerkungen zu und Wertung der vorliegenden Arbeit

Bei der Beurteilung der Bildqualität und deren übereinstimmender Bewertung durch die vier Radiologen ergibt sich kein einheitliches Bild. Ein Grund ist sicherlich, dass in dieser Arbeit ein Schulnoten-System verwendet wurde: aufgrund der subjektiv unterschiedlichen Belegung der einzelnen Noten ergeben sich hier verschiedene Beurteilungen. Letztendlich führten diese aber doch zu einer relativ übereinstimmenden Rangvergabe.

Viel interessanter ist aber die Frage, ob es überhaupt eine optimale MR-Sequenz zur Befundung der CED gibt. Betrachtet man die angeführten Literaturstellen und das auffällig

abweichende Ergebnis des Radiologen 2 der vorliegenden Arbeit, kann man zu dem Schluss kommen, dass ein einzelnes Sequenzprotokoll nicht ausreichend ist, um die CED umfassend MR-morphologisch zu diagnostizieren, den aktuellen Aktivitätsgrad festzustellen und extraintestinale Komplikationen auszuschließen oder zu belegen. Verschiedene zu beurteilende Aspekte erfordern verschiedene MR-Sequenzen. Und auch die subjektiven Vorlieben verschiedener Radiologen spielen eine, wenn auch untergeordnete, Rolle.

Übereinstimmend mit der gefundenen Literatur wurden aber auch in der vorliegenden Arbeit die Sequenzen HASTE und TRUFI als die „führenden“ Sequenzprotokolle im Hinblick auf die zu erzielende Bildqualität bewertet.

Als Parameter für einfache Durchführbarkeit bei leichter Schaffung der idealen Voraussetzungen zur Befundung anhand der angefertigten MR-Sequenzen wurde das Kriterium der Distension der untersuchten Darmabschnitte herangezogen. Es zeigte sich eine insgesamt gute Darmfüllung/Lumenerweiterung und damit einhergehend gute Voraussetzungen für eine diagnostische Betrachtung der interessierenden Strukturen.

Erstmalig wurde in der vorliegenden Arbeit nicht mit einer Konsens-Entscheidung der bewertenden Radiologen gearbeitet, sondern das Ergebnis verschiedener Untersucher miteinander verglichen. Es zeigt sich hierbei bei Betrachtung der Befundung der Entzündung und der pathologischen Lymphknoten, dass auch die Beurteilung von MR-Bildern durchaus subjektiv verschieden ist: gerade bei unsicheren Befunden ist noch eine relativ hohe Abweichung der einzelnen Bewertungen vorhanden. Andererseits zeigt sich bei sicheren pathologischen bzw. unauffälligen Befunden eine sehr hohe Übereinstimmung der hier getroffenen vier Aussagen. Was in dieser Arbeit nicht erfolgte, ist die Überprüfung der MR-Befunde anhand einer weiteren Methode, z.B. einem konventionellen endoskopischen Verfahren.

6 Zusammenfassung

Die chronisch-entzündliche Darmerkrankung mit ihren beiden Hauptformen, der Colitis ulcerosa und dem Morbus Crohn, betrifft eine große Anzahl von Patienten, gerade auch im jugendlichen Alter. Da die Erkrankung chronisch voranschreitet und eine jeweils aktivitätsbezogene Therapie erforderlich ist, ist es notwendig, eine schnell durchführbare, für den Patienten tolerable, aber vor allem auch diagnostisch sichere Untersuchungsmethode zur Hand zu haben.

Die MR-Untersuchung scheint diese Forderungen zu erfüllen: die Belastung des Patienten ist gering, eine Strahlenexposition ist nicht vorhanden, die Durchführbarkeit ist nahezu flächendeckend gegeben.

Noch handelt es sich um ein relativ neues Untersuchungsverfahren im Rahmen der CED-Diagnostik, welches noch ein großes Feld für Optimierungen und Standardisierungen bietet. Viele Arbeiten befassten sich bereits mit verschiedenen Aspekten: Vorteile der MR-Enterographie gegenüber dem MR-Enteroclysm, der Vergleich der genannten Verfahren mit bereits etablierten konventionellen Verfahren, der Auswahl des optimalen Kontrastmittels. Oft gestellt, aber bisher nicht abschließend beantwortet, ist auch die Frage nach dem optimalen Sequenzprotokoll.

Dieser Frage geht die vorliegende Arbeit nach. Vier Radiologen bewerteten verschiedene Sequenzprotokolle – TRUFI, HASTE, FLASH 2D axial bzw. coronar mit und ohne KM. Dazu lagen die Aufnahmen von 84 Patienten mit bekanntem Morbus Crohn vor. Die Bilder wurden von allen vier Radiologen unabhängig beurteilt.

Eine klare Favoritisierung einer einzelnen Sequenz ergab sich dabei nicht; die besten Beurteilungen erhielten die entsprechend den HASTE- und TRUFI-Sequenz-Protokollen angefertigten Aufnahmen.

Hierfür mag der unterschiedliche Schwerpunkt des einzelnen Radiologen auf einzelne Kriterien der CED-Diagnostik verantwortlich sein, so dass es möglicherweise keine einzelne optimale Sequenz gibt.

Im Weiteren wurde in dieser Arbeit auch die Untersucherunabhängigkeit der MR-Befundung untersucht. Hierzu wurden die zu untersuchenden 84 Patientenaufnahmen von den vier Radiologen auf Vorliegen von Entzündungszeichen und mesenterialer Lymphknoten hin bewertet.

Es zeigte sich, dass die Festlegung „keine Entzündung“ bzw. „manifeste Entzündung“ mit einer sehr hohen Übereinstimmung getroffen wurde. Lediglich bei 29 Patienten liegen

uneinheitliche Bewertungen über das Vorliegen von unsicheren MR-morphologischen Entzündungszeichen vor.

Ähnlich das Bild bei der Bewertung der mesenterialen Lymphknoten: in 56 Fällen wurde das Urteil der Radiologen einstimmig getroffen, nur in 28 Fällen lagen differierende Bewertungen vor; diese fielen etwas unterschiedlicher aus, als die ähnliche Anzahl der uneinheitlichen Bewertungen zur Beurteilung der Entzündung.

Somit ergab sich gemessen am Kendall-W-Wert bei der Entzündungs-Bewertung eine sehr hohe, bei dem Vorhandensein pathologischer Lymphknoten eine überzufällig häufige Übereinstimmung.

Die anatomischen Voraussetzungen für eine gute Diagnostizierbarkeit nach der im Studienprotokoll beschriebenen Vorbereitung wurde anhand der Distension der befundeten Darmabschnitte bewertet. Diese fiel in allen Darmabschnitten ausreichend bis sehr gut aus.

Zusammenfassend kann also als Ergebnis festgehalten werden, dass auch in dieser Arbeit die Untersuchungsmethode MR-Enteroklysmata seine Eignung zur Durchführung im Rahmen der CED-Diagnostik und -Verlaufsbeurteilung gezeigt hat. Insbesondere gelang der Nachweis der Untersucherunabhängigkeit. Eine eindeutige Empfehlung für ein einzelnes Sequenzprotokoll konnte jedoch nicht getroffen werden.

7 Abkürzungen

2D	Zwei-dimensional
3D	Drei-dimensional
akt.	aktuell
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CDAI	Crohn's Disease Activity Index
CED	Chronisch-entzündliche Darmerkrankung
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlendioxid
CRP	C-reaktives Protein
CT	Computertomographie/-gramm
d.h.	das heißt
engl.	englisch
et al.	et alii/aliae/alia (und andere)
evtl.	eventuell
FAME	Fast Acquisition with Multiüphase Efgre
FIESTA	fast imaging employing steady-state acquisition
FISP	Fast Imaging with Steady state Precession
FLASH	Fast Low Angle Shot
FOV	Field Of View
FSPGR	Fast Spoiled Gradient Echo
g	Gramm
GD	Gardolinium
Gd-DTPA	Gadopentetat-Dimeglumin

Gew.	Gewicht
ggfs.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HASTE	Half Fourier-Acquired Single Shot Turbo Spin Echo
HF	Hochfrequenz
Hkt.	Hämatokrit
IBD	inflammatory bowel disease
i.V.	intravenös
keV	Kiloelektronenvolt
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
KM	Kontrastmittel
l	Liter
m	Meter
MeV	Megaelektronenvolt
mg	Milligramm
MHz	Megahertz
min	Minute/-n
ml	Milliliter
µm	Mikrometer
mm	Millimeter
mmol	Millimol
MR	Magnetresonanz
MRT	Magnetresonanztomogramm/-graphie
msec	Millisekunde
mSv	Millisievert
mT	Millitesla

NaCl	Natriumchlorid
Path.	pathologisch
s	Sekunde
sog.	so genannte
SSFP	Steady State Free Precession
SSFSE	single-shot fast spin echo
Std.	Standard
T	Tesla
T1w	T1 gewichtet
T2w	T2 gewichtet
TE	Echozeit (time to echo)
Term. Ileum	terminales Ileum
TR	Wiederholzeit (repetition time)
TrueFisp	True Fast Imaging With Steady Precession
TRUFI	True Fast Imaging With Steady Precession
z.B.	zum Beispiel
zeitl.	zeitlich/-er

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Berechnung des CDAI nach Best.....	14
Tabelle 2: Histologische Befunde bei CED	19
Tabelle 4: Ausschlusskriterien für die Studienteilnahme.....	38
Tabelle 5: Zeitlicher Ablauf der Sequenzprotokolle der MR-Enterographie.....	40
Tabelle 6: Kriterien für die Diagnose einer vorliegenden Entzündung	41
Tabelle 7: Rangfolge der Benotungen der einzelnen MRT-Sequenzen, n=1008 (Radiologe 1-4).....	44
Tabelle 8: Signifikanz des ersten Rangs der Gesamtrangfolge (Radiologe 1-4)	44
Tabelle 9: Rangfolge der Sequenzen über alle Darmabschnitte (Radiologe 1)	46
Tabelle 10: Signifikanz des ersten Rangs der Gesamtrangfolge (Radiologe 1).....	47
Tabelle 11: Rangfolge der Sequenzen im Jejunum (Radiologe 1).....	48
Tabelle 12: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Jejunum (Radiologe 1).....	49
Tabelle 13: Rangfolge der Sequenzen im Ileum (Radiologe 1)	49
Tabelle 14: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Ileum (Radiologe 1) ...	50
Tabelle 15: Rangfolge der Sequenzen im Term. Ileum (Radiologe 1)	50
Tabelle 16: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Term. Ileum (Radiologe 1).....	51
Tabelle 17: Rangfolge der Sequenzen über alle Darmabschnitte (Radiologe 2)	53
Tabelle 18: Signifikanz des ersten Rangs der Gesamtrangfolge (Radiologe 2).....	54
Tabelle 19: Rangfolge der Sequenzen im Jejunum (Radiologe 2).....	54
Tabelle 20: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Jejunum (Radiologe 2).....	55
Tabelle 21: Rangfolge der Sequenzen im Ileum (Radiologe 2)	55
Tabelle 22: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Ileum (Radiologe 2) ...	56
Tabelle 23: Rangfolge der Sequenzen im Term. Ileum (Radiologe 2)	56
Tabelle 24: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Term. Ileum (Radiologe 2).....	57
Tabelle 25: Rangfolge der Sequenzen über alle Darmabschnitte (Radiologe 3)	59
Tabelle 26: Signifikanz des ersten Rangs der Gesamtrangfolge (Radiologe 3).....	60
Tabelle 27: Rangfolge der Sequenzen im Jejunum (Radiologe 3).....	60
Tabelle 28: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Jejunum (Radiologe 3).....	61
Tabelle 29: Rangfolge der Sequenzen im Ileum (Radiologe 3)	61
Tabelle 30: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Ileum (Radiologe 3) ...	62

Tabelle 31: Rangfolge der Sequenzen im term. Ileum (Radiologe 3).....	62
Tabelle 32: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Term. Ileum (Radiologe 3).....	63
Tabelle 33: Rangfolge der Sequenzen über alle Darmabschnitte (Radiologe 4)	65
Tabelle 34: Signifikanz des ersten Rangs der Gesamtrangfolge (Radiologe 4).....	66
Tabelle 35: Rangfolge der Sequenzen im Jejunum (Radiologe 4).....	66
Tabelle 36: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Jejunum (Radiologe 4).....	67
Tabelle 37: Rangfolge der Sequenzen im Ileum (Radiologe 4)	67
Tabelle 38: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Ileum (Radiologe 4) ...	68
Tabelle 39: Rangfolge der Sequenzen im term. Ileum (Radiologe 4).....	68
Tabelle 40: Signifikanz des ersten Rangs der Sequenz-Rangfolge im Term. Ileum (Radiologe 4).....	69
Tabelle 41: Übereinstimmung der Benotungen aller Radiologen für die einzelnen Darmabschnitte und gesamt	70
Tabelle 42: Übereinstimmung der Gesamt-Sequenz-Ränge (Radiologe 1-4).....	71
Tabelle 43: Übereinstimmende Beurteilung vorliegender Entzündungszeichen	72
Tabelle 44: Beurteilung vorliegender path. Lymphknoten	72
Tabelle 45: Beurteilung der Distension der einzelnen Darmabschnitte (Radiologe 1-4)	73
Tabelle 46: Übereinstimmung der Beurteilung des Kriteriums "Vorliegende Entzündung" ...	73
Tabelle 47: Übereinstimmung der Beurteilung des Kriteriums "Path. Lymphknoten"	74
Tabelle 48: Übereinstimmung der Beurteilung des Kriteriums "Distension"	75
Tabelle 49: Gesamtreihenfolge der Bildqualität	76
Tabelle 50: Gesamtrangfolge der Bildqualität, nur Radiologe 1, 3 und 4	77
Tabelle 51: Suchkriterien der Literaturrecherche in der Medline-Datenbank	79
Tabelle 52: Übersicht der verwendeten Vergleichsarbeiten	79
Tabelle 53: Zeitl. Reihenfolge der MR-Sequenzen bei Fidler	80
Tabelle 54: Zeitl. Reihenfolge der Sequenz-Protokolle bei Tolan, 2010.....	81
Tabelle 55: Kriterien des Sequenz-Vergleichs bei Gourtsoyiannis et al.....	81
Tabelle 56: Durchgeführte Sequenzen in zeitlicher Abfolge bei Hohl et al.	82
Tabelle 57: Kriterien des Sequenz-Vergleichs bei Hohl et al.	82
Tabelle 58: Zeitliche Abfolge der MR-Sequenzen, Masselli 2006	83
Tabelle 59: Ergebnis des diagnostischen Sequenz-Vergleichs, Masselli 2006.....	84
Tabelle 60: Durchgeführte Sequenz-Protokolle bei Maselli et al., 2008	84
Tabelle 61: Kriterien der Sequenz-Beurteilung bei Masselli et al., 2008	85

Tabelle 62: Ergebnisse des Sequenz-Vergleichs von Masselli et al., 2008 85

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau des Wasserstoffatoms [44]	27
Abbildung 2: Die Präzessionsbewegung eines Wasserstoffatoms [47]	28
Abbildung 3: Einfluss des HF-Impulses auf die Spins [47]	29
Abbildung 4: T1-Relaxation: Zurückkippen der Transversalmagnetisierung in die Z-Richtung unter Energieabgabe an die Umgebung [47]	30
Abbildung 5: Die Spinecho-Sequenz [47]	31
Abbildung 6: T2- und T2*-Relaxation [44]	31
Abbildung 7: Mechanismus der Sättigung	33
Abbildung 8: Wahl der Schichtdicke und –position [44]	34
Abbildung 9: Skala zur Beurteilung der Bildqualität	40
Abbildung 10: Skala zur Beurteilung der vorliegenden Entzündung	41
Abbildung 11: Skala zur Bewertung der Dünndarm-Distension	41
Abbildung 12: Histogramm der gesamten vergebenen Sequenz-Bewertungen	43
Abbildung 13: Histogramm der gesamten Sequenz-Bewertungen (Radiologe 1)	45
Abbildung 14: Gesamt-Sequenzrangfolge (Radiologe 1)	47
Abbildung 15: Histogramm der gesamten Sequenz-Bewertungen (Radiologe 2)	52
Abbildung 16: Gesamt-Sequenzrangfolge (Radiologe 2)	53
Abbildung 17: Histogramm der gesamten Sequenz-Bewertungen (Radiologe 3)	58
Abbildung 18: Gesamt-Sequenzrangfolge (Radiologe 3)	59
Abbildung 19: Histogramm der gesamten Sequenz-Bewertungen (Radiologe 4)	64
Abbildung 20: Gesamt-Sequenzrangfolge (Radiologe 4)	65
Abbildung 21: Skala zur Bewertung der Dünndarm-Distension	74

10 Literaturverzeichnis

- [1] Albert, J. G., Martiny, F., Krummenerl, A., Stock, K., Leßke, J., Göbel, C. M., et al. (2005). Diagnosis of small bowel Crohn's disease: a prospective comparison of capsule endoscopy with magnetic resonance imaging and fluoroscopic enteroclysis. *Gut* , 54, 1721-1727.
- [2] Best, W. R., Beckett, J. M., & Singleton, J. W. (1976). Development of a Crohn's disease activity index. National Cooperative Crohn's Disease Study. *Gastroenterology* , 70, 439-444.
- [3] Coremans, G., Rutgeerts, P., Geboes, K., Von den Oord, J., Ponette, E., & Vantrappen, G. (1984). The value of ileoscopy with biopsy in the diagnosis of intestinal Crohn's disease. *Gastrointestinal endoscopy* , 30, 167-172.
- [4] Feuerbach, S., & Schölmerich, J. (2000). Chronic inflammatory bowel diseases: Crohn disease and ulcerative colitis. *Radiologe* , 40, 324-338.
- [5] Fiedler, J. (1007). MR Imaging of th Small Bowel. *Radiologic clinics of North America* , 45 B, 317-331.
- [6] Geboes, K., Colombel, J.-F., Greenstein, A., Jewell, D. P., Sandborn, W. J., Vatn, M. H., et al. (2008). Indeterminate colitis: A review of the concept - What's in a name? *Inflammatory Bowel Disease* .
- [7] Gourtsoyiannis, N., Papanikolaou, N., Grammatikakis, J., Maris, T., & Prassopoulos, P. (2001). MR enteroclysis protocol optimization: comparison between 3D FLASH with fat saturation after intravenous gadolinium injection and true FISP sequences. *European radiology* , 11, 908-913.
- [8] Grimm, M. C., & Pavli, P. (2004). NOD2 mutations and Crohn's disease: are Paneth cells and their antimicrobial peptides the link? *Gut* , 53, 1558-1560.
- [9] Hartmann, B., & Jakobs, R. (2009). Stellenwert des kontrastverstärkten Ultraschalls bei der Beurteilung des Morbus Crohn. *Gastroenterologe* , 4, 354-356.
- [10] Herbay, A., Krekeler, G. R., & Riede, U.-N. (2004). In *Allgemeine und spezielle Pathologie* (pp. 705-706). Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.
- [11] Hoffmann, J. C., Preiß, J. C., Autschbach, F., Buhr, H. J., Häuser, W., Herrlinger, K., et al. (2008). S3-Leitlinie "Diagnostik und Therapie des Morbus Crohn". *Zeitschrift für Gastroenterologie* , 46, 1094-1146.

- [12] Hohl, C., Haage, P., Krombach, G. A., Schmidt, T., Ahaus, M., Günther, R. W., et al. (2005). Diagnostik chronisch entzündlicher Darmerkrankungen bei Kindern und Jugendlichen; MRT mit True-FISP als neuer Goldstandard? *RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren* , 177, 856-863.
- [13] Hommes, D., & van Deventer, S. (2004). Endoscopy in inflammatory bowel diseases. *Gastroenterology* , 126, 1561-1573.
- [14] Jantchou, P., Monnet, E., & Carbonnel, F. (2006). Environmental risk factors in Crohn's disease and ulcerative colitis (excluding tobacco and appendectomy). *Gastroentérologie Clinique and Biologique* , 30, 6-7.
- [15] Köhne, G., & Stallmach, A. (1999). Chronisch entzündliche Darmerkrankungen. In *Thiemes Innere Medizin: TIM* (pp. 615-622). Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.
- [16] Karlinger, K., Gyorke, T., Mako, E., Mester, A., & Tarjan, Z. (2000). The epidemiology and the pathogenesis of inflammatory bowel disease. *European Journal of Radiology* , 35, 154-167.
- [17] Lauenstein, T. C., Kinner, S., & Ladd, S. C. (2008). MR-Kolonographie: Technik, Indikationen und Befunde. *Der Radiologe* , 48, 156-165.
- [18] Limberg, B. (1999). Diagnostik von chronisch-entzündlichen Darmerkrankungen durch Sonographie. *Zeitschrift für Gastroenterologie* , 37 F, 495-508.
- [19] Loftus, E. V. Clinical epidemiology of inflammatory bowel disease: Incidence, prevalence and environmental influences. *Gastroenterology* , 126, 1504-1517.
- [20] Maccioni, F., Viscido, A., Broglia, L., Marrollo, M., Masciangelo, R., Caprilli, R., et al. (2000). Evaluation of Crohn disease activity with magnetic resonance imaging. *Abdominal Imaging* , 25, 219-228.
- [21] Madsen, S. M., Thomsen, H. S., Munkholm, P., Dorph, S., & Schlichting, P. (1998). Active Crohn's disease and ulcerative colitis evaluated by low-field magnetic resonance imaging. *Scandinavian Journal of Gastroenterology* , 33, 1193-1200.
- [22] Masselli, G., Casciani, E., Poletini, E., & Gualdi, G. (2008). Comparison of MR enteroclysis with MR enterography and conventional enteroclysis in Patients with Crohn's disease. *European radiology* , 18, 438-447.
- [23] Masselli, G., Casciani, E., Poletini, E., Lanciotti, S., Bertini, L., & Gualdi, G. (2006). Assessment of Crohn's disease in the small bowel: prospective comparison of

magnetic resonance enteroclysis with conventional enteroclysis. *European radiology* , 16, 2817-2827.

- [24] Migaleddu, V., Scanu, A. M., Quaia, E., Rocca, P. C., Dore, M. P., Scanu, D., et al. (2009). Contrast-enhanced ultrasonographic evaluation of inflammatory activity in Crohn's disease. *Gastroenterology* , 137, 43-61.
- [25] Morrin, M., Kruskal, J. B., Weisinger, K., Reynolds, K., & Raptopoulos, V. (2000). Virtual Colonography: Techniques and Current Clinical Applications. *Surgical Technology International* , VIII, 121-127.
- [26] Mylonaki, M., Langmead, L., Pantes, A., Johnson, F., & Rampton, D. S. (2004). Enteric infection in relapse of inflammatory bowel disease: importance of microbiological examination of stool. *European Journal of Gastroenterology & Hepatology* , 16, 775-778.
- [27] Parente, F., Greco, S., Molteni, M., Anderloni, A., Sampietro, G. M., Danelli, P. G., et al. (2004). Oral contrast enhanced bowel ultrasonography in the assessment of small intestine Crohn's disease. A prospective comparison with conventional ultrasound, x ray studies, and ileocolonoscopy. *Gut* , 53, 1652-1657.
- [28] Pascu, M., Roznowski, A. B., Müller, H.-P., Adler, A., Wiedenmann, B., & Dignass, A. U. (2004). Clinical relevance of transabdominal ultrasonography and magnetic resonance imaging in patients with inflammatory bowel disease of the terminal ileum and large bowel. *Inflammatory Bowel Disease* , 10, 373-382.
- [29] Peppelenbosch, M. P., & van Deventer, S. J. (2004). T cell apoptosis and inflammatory bowel disease. *Gut* , 53, 1556-1558.
- [30] Podolsky, D. K. (1991). Inflammatory bowel disease. *The New England Journal of Medicine* , 325, 1008-10016.
- [31] Pohl, J., May, A., & Nachbar, L. (2007). Diagnostic and therapeutic yield of push-and-pull enteroscopy for symptomatic small bowel Crohn's disease strictures. *European Journal of Gastroenterology and Hepatology* , 19, 529-534.
- [32] Reiser, M., Kuhn, F. P., & Debus, J. (2006). *Radiologie*. Stuttgart: Thieme.
- [33] Schölmerich, J. (2006). Was ist neu 2006? Chronisch entzündliche Darmerkrankungen. *MedReview* , 10, 2-4.
- [34] Schreyer, A. G., Ludwig, D., Koletzko, S., Hoffmann, J. C., Preiß, J. C., Zeitz, M., et al. (2010). Aktualisierte S3-Leitlinie zur Diagnostik des Morbus Crohn - radiologische Untersuchungstechniken. *RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren* , 182, 116-121.

- [35] Schunk, K., Kern, A., Oberholzer, K., Kalden, P., Mayer, I., Orth, T., et al. (2000). Hydro-MRI in Crohn's Disease - appraisal of disease activity. *Investigative Radiology* , 35 (7), 431-437.
- [36] Siemens AG Medical Solutions - Magnetresonanztomographie. (2003). *Magnete, Spins und Resonanzen*. Erlangen: Siemens AG Medical Solutions.
- [37] Solem, C. A., Loftus, J. E., Tremaine, W. J., Harmsen, W. S., Zinsmeister, A. R., & Sandborn, W. J. (2005). Correlation of C-reactive protein with clinical, endoscopic, histologic and radiographic activity in inflammatory bowel disease. *Inflammatory Bowel Disease* , 11, 707-712.
- [38] Sostegni, R., Daperno, M., Scaglione, N., Lavagna, A., Rocca, R., & Pera, A. (2003). Review article: Crohn's disease: monitoring disease activity. *Alimentary Pharmacology and Therapeutics* , 17 (Suppl. 2), 11-17.
- [39] Stange, E. F., Schreiber, S., Fölsch, U. R., von Herbay, A., Schölmerich, J., Hoffmann, J., et al. (2003). Diagnostik und Therapie des M. Crohn - Ergebnisse einer evidenzbasierten Konsensuskonferenz der Deutschen Gesellschaft für Verdauungs- und Stoffwechselkrankheiten. *Zeitschrift für Gastroenterologie* , 41, 19-20.
- [40] Timmer, A., Breuer-Katschinski, B., & Goebell, H. (1999). Time trends in the incidence and disease location of Crohn's disease 1980-1995: a prospective analysis in an urban population in Germany. *Inflammatory Bowel Diseases* , 5(2), 79-84.
- [41] Tolan, D. J., Greenhalgh, R., Zealley, I. A., Halligan, S., & Taylor, S. A. (2010). MR Enterographic Manifestations of Small Bowel Disease. *Radiographics* , 30, 367-384.
- [42] Umschaden, H. W., Szolar, D., Gasser, J., Umschaden, M., & Haselbach, H. (2000). Small bowel disease: Comparison of MR enteroclysis images with conventional enteroclysis and surgical findings. *Radiology* , 215, 717-725.
- [43] Vecchi, M., Saibeni, S., Devani, M., Rondonotti, E., & De Franchis, R. (2003). Review article: diagnosis, monitoring and treatment of distal colitis. *Alimentary Pharmacology and Therapeutics* , 17 (Suppl. 2), 2-6.
- [44] Vermeire, S., Van Assche, G., & Rutgeerts, P. (2004). C-reactive protein as a marker for inflammatory bowel disease. *Inflammatory Bowel Disease* , 10, 661-665.
- [45] Vermeire, S., Van Assche, G., & Rutgeerts, P. (2006). Laboratory markers in IBD: useful, magic, or unnecessary toys? *Gut* , 55, 426-431.

- [46] Wehkamp, J., Harder, J., Weichenthal, M., Schwab, M., Schäffeler, E., Schlee, M., et al. (2004). NOD2 (CARD15) mutations in Crohn's disease are associated with diminished mucosal α -defensin expression. *Gut*, 53, 1658-1664.
- [47] Weishaupt, D., Köchli, V., & Marincek, B. (2009). *Wie funktioniert MRI?* Heidelberg: Springer Verlag.
- [48] Wetzke, M., & Happle, C. (2009). *BASICS Bildgebende Verfahren*. München: Elsevier.
- [49] Wilks, S., & Moxon, W. (1875). *Lectures on pathological anatomy*. London: J&A Churchill Ltd.
- [50] Yamamoto, H. (2005). Double-ballon endoscopy. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, 3, 27-29.

11 Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Privatdozent Dr. Andreas Schreyer für die Überlassung des Dissertations-Themas und seine Unterstützung und Betreuung.

Herrn Dr. Chris Friedrich danke ich für die Unterstützung bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit, seine vielen hilfreichen Tipps und Korrekturen.

Herrn Dr. Michael Pawlik möchte ich für seine Bemühungen und Hilfe bei der statistischen Auswertung danken.

Für das Korrekturlesen und ihre große Unterstützung danke ich meiner Ehefrau Susanne und meinen beiden Töchtern Franziska und Johanna.

12 Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Insbesondere habe ich nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder andere Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeit erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Beilngries, 14.04.2011

Unterschrift