

UNIVERSITÄTSKLINIKUM HAMBURG-EPPENDORF
ALTONAER KINDERKRANKENHAUS

Abteilung Kinderorthopädie

Prof. Dr. med. Ralf Stücker

**2-Jahres-Ergebnisse von magnetisch gesteuerten Growing Rods
(MCGR) bei Patienten mit Early Onset Skoliose**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Humanmedizin
an der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

vorgelegt von

Jana Frederike Burstein, geb. Füllbrandt

aus Hamburg

Hamburg 2020

Angenommen von der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg am: 3.07.2020

Veröffentlicht mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

Prüfungsausschuss, der/die Vorsitzende: Prof. Dr. med Ralf Stücker

Prüfungsausschuss, zweite/r Gutachter/in: Prof. Dr. med Sven Oliver Eicker

Prüfungsausschuss, dritte/r Gutachter/in: PD Dr. Matthias Priemel

Inhaltsverzeichnis

1. Arbeitshypothese und Fragestellung	1
2. Einleitung	2
3. Material und Methoden	5
Patienten	5
Magnetisch kontrollierbare Wachstumsstäbe und deren Implantation	5
Ambulante Verlängerungen	7
Röntgenuntersuchung	7
Statistische Analyse	8
4. Ergebnisse	9
Röntgenauswertung	9
Komplikationen	10
5. Diskussion	11
6. Zusammenfassung	16
7. Abbildungen und Tabellen	17
8. Literaturverzeichnis	21
Danksagung	24
Lebenslauf	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Eidesstattliche Versicherung	26

1. Arbeitshypothese und Fragestellung

Das Ziel dieser Studie ist es, Ergebnisse von Patienten mit frühkindlicher Skoliose (Early Onset Skoliose (EOS)), welche mit einem magnetisch verlängerbaren Wachstumsstab (Growing Rod) operiert wurden nachzuuntersuchen. Es sollen hierbei chirurgische und implantatassoziierte Komplikationen, erreichte Korrekturraten und Folgekorrekturen aufgeführt und statistisch ausgewertet werden. Es ist eine retrospektive Studie über 22 Kinder, die in einem Zeitraum von Anfang Juli 2011 bis Ende Mai 2013 im Altonaer Kinderkrankenhaus bei Vorliegen einer Early Onset Skoliose unterschiedlicher Ätiologie, mittels magnetisch verlängerbaren Growing Rods operiert wurden. Es wurden radiologisch der prä- und postoperative Cobbwinkel, die Thoraxhöhe T1-T12, die spinale Länge T1-S1, und die lumbale Lordose sowie thorakale Kyphose vermessen. Des Weiteren wurden die vorher genannten Auswertparameter zum Zeitpunkt der jeweiligen viermonatlichen ambulanten magnetischen Distraktionszeitpunkte erhoben und statistisch ausgewertet. Anhand der Aktenlage wird über peri- und postoperative Komplikationen sowie die Durchführung und Abläufe der ambulanten Distraction berichtet.

2. Einleitung

Das Wort Skoliose kommt aus dem Altgriechischen und bedeutet so viel wie „Krümmung“. Die Skoliose ist eine dreidimensionale Deformität mit Seitverbiegung der Wirbelsäule und gleichzeitiger Verdrehung der Wirbelkörper, die nicht mehr durch den Einsatz der Muskulatur aufgerichtet werden kann (Trobisch et al., 2010). Frühkindliche Skoliosen (Early Onset Skoliosen, EOS) treten vor dem 10. Lebensjahr auf (Akbarinia, 2015). Mithilfe einer a.p. Röntgenaufnahme der Wirbelsäule kann das Ausmaß der Skoliose mit der Methode nach Cobb in Grad bestimmt werden. Dafür werden auf der Deckplatte des oberen und auf der Grundplatte des unteren Endwirbels Senkrechte errichtet. Der Winkel, der durch die beiden Senkrechten gebildet wird, bezeichnet das Ausmaß der Deformität nach Cobb. Ab einem Krümmungswinkel von 10 Grad spricht man von einer Skoliose. Die Gründe für die Entstehung von Skoliosen sind vielfältig. Neben idiopathischen und kongenitalen Skoliosen unterscheidet man neuromuskuläre Krümmungen, wie z.B. die spinale Muskelatrophie und Meningomyelozele, oder auch Deformitäten, die auf dem Boden von Skelettdysplasien und Syndromen entstehen. Zu diesen Syndromen gehören z.B. das Marfan- oder das Ehlers-Danlos-Syndrom. Insbesondere die kongenitalen Skoliosen mit angeborenen Wirbelkörperfehlbildungen oder die komplexen Fehlbildungen, einschließlich Thoraxdysplasien, bedürfen einer spezifischen und frühzeitigen Behandlung (Ridderbusch et al., 2018). Unbehandelt tritt in vielen Fällen eine Deformität von Wirbelsäule und Brustkorb ein. In den meisten Fällen deformiert sich der Brustkorb während der kritischen Phase der Lungenentwicklung, so dass es zu restriktiven Lungenfunktionsstörungen kommt. Die Lebenserwartung wird dadurch deutlich reduziert (Stücker, 2016). Muirhead (1985) schreibt, dass das Risiko, an einer moderaten und schweren Ventilationsstörung zu erkranken, bei infantiler EOS bei 34% liegt. Die Behandlung der Early Onset Skoliose verschiedenster Ätiologie ist eine große Herausforderung für den behandelnden Arzt und hat sich in den vergangenen Jahren stetig weiterentwickelt. Ein wesentliches Therapieziel ist die Verbesserung der Lebensqualität des Kindes. Neben der Korrektur der Skoliose sollten das Brustkorbwachstum und die Lungenentwicklung im Fokus stehen (Ridderbusch et al., 2013; Stücker, 2010). Als mögliche Therapieoptionen kommen sowohl konservative Behandlungen, sowie chirurgische Verfahren zum Einsatz. Zu den konservativen Verfahren gehören unter anderem die physiotherapeutische Behandlung, das Casting und die Korsetttherapie. Die physiotherapeutische Behandlung zielt durch bestimmte Techniken darauf ab, die Rumpfmuskulatur zu stabilisieren, sowie sekundäre Funktionsstörungen zu vermeiden. So konnte laut Rigo et al (2008), Schreiber et al (2015) und Weiss (2006) eine gewisse Wirksamkeit in der wirbelsäulenspezifischen Krankengymnastik nachgewiesen werden.

Bei der seriellen Gipsredression, auch Casting genannt, wird in Narkose auf einem speziellen Gipstisch eine derotierende und extendierende Gipsredression durchgeführt. Insgesamt wird die Wirbelsäule dreimal in entsprechender Weise redressiert und das Gipskorsett für jeweils einen Monat getragen. Anschließend erfolgt eine Korsetttherapie (Ridderbusch et al., 2018). Dieses Verfahren kann in der Regel bei Kindern, bei denen die Skoliose nicht syndrombedingt besteht, bis zum fünften Lebensjahr gut durchgeführt werden und zeigt laut Mehta (2005) nennenswerte Erfolge.

Der Erfolg des dritten Bausteines in der konservativen Skoliose-therapie, die Korsetttherapie, hängt im Wesentlichen von der täglichen Tragezeit des Korsetts ab. Weinstein, Dolan, Wright, & Dobbs (2013) konnten einen klaren Zusammenhang zwischen täglicher Tragezeit des Korsetts und Wirksamkeit der Therapie feststellen. Eine Korsetttragedauer von 0-6h/Tag führte zu einer fehlenden Progredienz von 41%. Bei einer Tragedauer > 12,9h/Tag lag die Erfolgsquote bei 90-93%. Aus diesem Grund ist nicht nur eine gute, individuelle Passform des Korsetts, sondern auch eine gute Patientenführung mit ausreichender Aufklärung über die Wichtigkeit der Tragedauer ausschlaggebend für die Wirksamkeit dieser Therapieform. Die Begleitung durch ein multidisziplinäres Team, bestehend aus behandelnden Ärzten, Orthopädietechnikern und Physiotherapeuten, mit regelmäßigen Kontrollen der Passform ist unabdingbar, um eine weitere Progredienz der Krümmung zu verhindern.

Die konservativen Methoden der Skoliosebehandlung sind weit verbreitet, stoßen jedoch bei kongenitalen Skoliosen schnell an ihre Grenzen und wurden von einigen Autoren als ineffektiv beschrieben (McMaster, 1979). Um eine Versteifung der Wirbelsäule und im schlimmsten Fall ein thorakales Insuffizienzsyndrom zu verhindern, bei dem es durch die knöcherne Deformität und die Einengung der Lunge zur Ateminsuffizienz kommt (Karol, 2011; Karol et al., 2008) ist in den meisten Fällen ein operatives Vorgehen vonnöten.

Kritisch sind die in früher Kindheit durchgeführten Spondylodesen bei Early Onset Skoliosen zu bewerten. Äußerst kritisch ist dieses bei Kindern mit signifikantem Restwachstum, da es nachfolgend zu einem disproportionierten Körperwachstum mit hypoplastischem Thorax und assoziierten Begleiterkrankungen kommt (Ridderbusch et al., 2013). Karol et al. (2008) konnten zeigen, dass die Anzahl der fusionierten Wirbelsäulensegmente eng mit einer Verringerung der Vitalkapazität korreliert. In den letzten Jahren wurden daher verschiedene fusionslose Verfahren (sogenannte „Non-fusion“-Techniken) entwickelt, die sich zum Ziel gemacht haben, die Krümmung der Wirbelsäule zu korrigieren während das Wachstum der Wirbelsäule nicht verhindert wird.

Zu den fusionslosen Techniken gehören zum Beispiel das VEPTR- Verfahren („vertical expandable prosthetic titanium rib“), welches ursprünglich zur Behandlung des Thoraxinsuffizienzsyndroms bei zugrundeliegender kongenitaler Thorakalskoliose mit Rippenfusionen entwickelt wurde. Auch für andere Formen der Skoliose, wie Syndrom assoziierte oder neuromuskuläre Skoliosen wurde das VEPTR-Verfahren erfolgreich eingesetzt. Kyphotische Deformitäten sind für das VEPTR-Verfahren grundsätzlich nicht geeignet, da Kyphosen durch dorsal distrahierende Verfahren sich grundsätzlich verschlechtern.

Die operative Nachstellung, die alle 6 Monate erfolgt, wird über eine kleine Hautinzision unmittelbar über der Verlängerungseinheit durchgeführt. Ist die Verlängerungsstrecke erschöpft, muss das einliegende Implantat bei noch nicht abgeschlossenem Wachstum gegen ein längeres ausgetauscht werden.

Ein anderes Verfahren, das sogenannte Staple Verfahren, beruht auf einem Epiphyseodeseeffekt. Hier wird durch sogenannte Shaped-memory-alloy(SMA)-Staples eine wachstumslenkende Behandlung durchgeführt. Das eher kleine Indikationsspektrum ist Grund für die seltene Anwendung dieses Verfahrens.

Ein heutiger Goldstandard unter den Nonfusionstechniken ist die duale Growing Rod Technik, bei der die Distraction über zwei parallele Wachstumsstäbe erfolgt. Bis vor einigen Jahren mussten die Growing Rods zur Aufrechterhaltung der Distraction bis zum Wachstumsabschluss etwa alle 6 Monate operativ nachgestellt werden. Eine hohe Komplikationsrate bei dieser Technik ergab sich hauptsächlich durch diese Nachstelloperationen (Bess et al., 2010). In Deutschland ist seit 2011 ein neuer Growing Rod (MAGEC ®) verfügbar. Die Implantation erfolgt operativ, wobei die Wachstumsstäbe submuskulär vorgeschoben und im Bereich der Lenden- und Brustwirbelsäule verankert werden (Ridderbusch et al., 2013). Zur Distraction der aus Titan bestehenden MCGR (Magnetically-controlled Growing Rods) sind keine weiteren Operationen notwendig, da sie durch einen externen Elektromagneten distrahiert werden. So bleibt es zunächst bei einem einmaligen operativen Eingriff. Die Verlängerung erfolgt etwa alle 4 Monate transkutan über den extrakorporal aufzusetzenden Elektromagneten. Nach Abschluss des Wirbelsäulenwachstumes, müssen die Magnetstäbe operativ entfernt werden. Daraufhin wird eine abschließende Behandlung in Form einer Spondylodese durchgeführt. Eine ersatzlose Entfernung ohne Spondylodese empfiehlt sich nicht, da in der Regel komplette oder inkomplette Spontanfusionen eintreten. Das Ziel dieser Studie ist es, über die ersten Erfahrungen in der Behandlung der Early Onset Skoliose mit magnetisch verlängerbaren Growing Rods zu berichten.

3. Material und Methoden

Patienten

Die Beratung durch die Ethik- Kommission erfolgte vor Beginn der Studie. 22 Patienten, davon 15 Mädchen und 7 Jungen mit EOS unterschiedlicher Ätiologie wurden von 2011 bis 2013 im Altonaer Kinderkrankenhaus mit der MCGR-Technik operiert und erfüllten die folgenden Einschlusskriterien: (I) Skolioseerkrankung unterschiedlicher Ätiologie (siehe Abbildung 1); (II) Skolioseerkrankung mit einem Cobb-Winkel von $> 40^\circ$ und/oder einer jährlichen Progression von $>5^\circ$ und/oder eine erfolglose konservative Behandlung, inklusive Physiotherapie und Korsetttherapie; (III) ein Minimum Follow- Up (FU) von mindestens 24 Monaten und (IV) mindestens 6 ambulante, postoperative magnetische Distractionen. Das Durchschnittsalter zum Zeitpunkt der Operation betrug 8,8 Jahre (von 4,6 bis 14,3 Jahre). Im Allgemeinen haben alle Patienten, die an einer idiopathisch bedingten Skoliose erkrankt sind sowie teilweise auch Patienten mit syndromaler Skolioseerkrankung eine vorherige Korsetttherapie erhalten. Die Durchführung der MCGR-Implantation erfolgte bei verbleibendem Wirbelsäulenrestwachstum.

Anhand von Röntgenaufnahmen wurde die präoperative Wirbelsäulenverkrümmung, die postoperative Primärkorrektur, die Folgekorrekturen nach magnetischer Distraction und die Wirbelsäulenlänge von T1-T12 und T1-S1 beurteilt sowie intra- und postoperative Komplikationen berücksichtigt.

Magnetisch kontrollierbare Wachstumsstäbe und deren Implantation

Das MAGEC[®] spinale Schienungs- und Distractionssystem besteht aus einem sterilen Wirbelsäulenstab aus Titan, der anhand geeigneter Pedikelschrauben, Haken und/oder Konnektoren implantiert und fixiert wird.

Die kaudale Verankerung erfolgt durch Pedikelschrauben, ggf. auch Haken oder insbesondere bei neuromuskulären Skoliosen, mit speziellen Verankerungen am Becken (Ilium Haken). Die proximale Fixierung sollte möglichst in Höhe der oberen Brustwirbel (T2–4) durchgeführt werden, um Anschlusskyphosen zu vermeiden. Hier können Schrauben, Haken oder sublaminäre Bänder verwendet werden. Es empfiehlt sich, eine monosegmentale Spondylodese im kaudalen und kranialen Verankerungssegment vorzunehmen, um langfristig eine sichere Verankerung der Implantate zu gewährleisten.

Der implantierte Wirbelsäulenstab dient der Schienung der Wirbelsäule während des Wachstums, um das Fortschreiten einer Skoliose zu minimieren. Die Auswahlkriterien für die Implantation der MCGR unterscheiden sich nicht von denen der Standard-Growing Rod-Techniken (Akbarinia et al., 2005). Der Stab enthält einen kleinen internen Magneten,

der über einen Teleskopmechanismus eine Verlängerung des Stabes mithilfe des externen Elektromagneten ermöglicht.

Die nicht invasive, externe Fernsteuerung wird elektrisch betrieben. Das Gerät wird über der Wirbelsäule des Patienten platziert und manuell aktiviert. In der Fernsteuerung befindet sich ein Elektromagnet der die Magneteinheit innerhalb des implantierten Stabes antreibt und den Teleskopmechanismus des Growing Rod somit verlängern kann. Der Stab wird periodisch verlängert, um die Wirbelsäule zu dehnen, eine richtige Schienung während des Wachstums zu gewährleisten und somit die Progression einer Skoliose zu minimieren (Ridderbusch et al., 2013; Technologies, 2014).

Alle an der Studie teilnehmenden Patienten wurden in Allgemeinanästhesie mit endotrachealer Intubation, in Bauchlage auf einem gepolsterten Operationstisch operiert. Allen Patienten wurde die zweite Generation der MCGR implantiert. Alle Verfahren wurden mit der Standard-/Offset-Stab Konfiguration durchgeführt.

Entsprechend der Standardmethode wurden zunächst über 2 separate, längsverlaufende Hautschnitte die dorsalen Elemente der jeweiligen Verankerungspunkte an der Wirbelsäule dargestellt. Es wurden dann in der Regel jeweils 2 Wirbelkörper proximal und kaudal mit Pedikelschrauben besetzt und eine monosegmentale Fusion durchgeführt. Bei unzureichender anatomischer Weite von Pedikeln wurden gelegentlich Laminahaken eingesetzt. Zusätzlich wurden sublaminäre Bänder im Bereich der angrenzende Rippe des obersten instrumentierten Wirbels verwendet, um eine festere Konstruktion zu ermöglichen und Lockerungen oder Migration der obersten Verankerungspunkte möglichst zu vermeiden. Dabei handelt es sich um Polyesterbänder, die mit dem Stab konnektiert werden. (F-a. Zimmer Spine, 7375 Minneapolis, USA.)

Hiernach wurden die Magnetstäbe entsprechend der geforderten Länge gekürzt und das sagittale Profil in die Stäbe eingebogen. Anschließend erfolgte die extrakorporale Testung des Distraktionsmechanismus der Magnetstäbe. Nach lockerer Befestigung der Stäbe mit den Verankerungspunkten wurde die Distraction und Korrektur der Skoliose über manuellen Druck mit der „push prone Technik“; also mit erheblichen Druck auf den Apex der Krümmung durchgeführt und dann die Verankerungspunkte final verriegelt.

Die Patienten verweilten im Durchschnitt postoperativ 7-10 Tage stationär. Nach Physiotherapie zur Gang- und Rückenschulung konnten die Patienten dann schmerz kompensiert in die häusliche Umgebung entlassen werden.

Ambulante Verlängerungen

Die ambulanten Distractionen wurden im regelmäßigen Abstand von 4 Monaten durchgeführt. Die erforderliche Distractionstrecke von durchschnittlich 3-5 mm wurde anhand der von Dimeglio entwickelten Wachstumskurven in Abhängigkeit vom Patientenalter und der jeweiligen Instrumentationspunkte berechnet (Dimeglio, 1993). Dabei wurde die konkave Krümmung zumeist 1mm mehr als die konvexe Krümmung distrahert, um eine zusätzliche Korrektur der Deformität zu erreichen. Die maximale Distractionstrecke eines Standard MCGR 5.5 mm beträgt 4.8 cm. Ist diese Länge erreicht, muss der Stab operativ ausgetauscht werden. Alle Patienten erhielten vor und nach der Verlängerung eine a.p.- Röntgenaufnahme der Wirbelsäule, um eventuelle Komplikationen, wie zum Beispiel Materialbruch oder Dislokationen der Verankerungen zu erkennen. Anhand des Röntgenbildes nach Distraction wurde die erfolgreiche Distraction dokumentiert. Zur Reduktion der Strahlenbelastung erfolgt in letzter Zeit die Kontrolle der Distraction mittels Ultraschall anstelle eines Röntgenbildes. Dieses alternative Verfahren wurde in einer Studie von Yoon et al. (2015) als durchaus gleichwertig dargestellt, um den Verlängerungserfolg zu dokumentieren.

Die Stabverlängerung wurde ohne jeweilige Anästhesieverfahren oder Schmerzmedikationen durchgeführt. Die Patienten lagen dabei auf dem Bauch. Die Wirbelsäule wurde dabei durch ein weiches Kissen, was unter dem Thorax positioniert wurde, in leichte Flexionsstellung gebracht. Durch einen kleinen externen Magneten konnte die Lokalisation des Magneten innerhalb des Stabes erkannt werden, worauf eine Hautmarkierung vorgenommen wurde, auf die die große Distractionseinheit aufgesetzt werden konnte. Die zu verlängernde Millimeteranzahl wurde über ein Display kontrolliert. Die Verlängerung selbst beschrieben die Patienten als ein etwas unangenehmes, jedoch schmerzloses Gefühl. Jede Seite wurde im Wechsel etwa dreimal um je ca. 1-2mm verlängert. Nach ungefähr 10 Minuten konnten die Patienten den Behandlungsraum ohne jegliche Einschränkungen wieder verlassen.

Röntgenuntersuchung

Vor der Erstimplantation der Wachstumsstäbe erhielten alle Patienten im Rahmen eines 3 tägigen stationären Aufenthaltes zur Risikoevaluation vor geplanter Wirbelsäulenoperation eine WS Ganzaufnahme in 2 Ebenen. Um die Flexibilität der einzelnen Krümmungen besser evaluieren zu können, wurden zusätzlich Bending- Aufnahmen angeordnet. Alle Röntgenvermessungen wurden prä- und postoperativ von zwei unabhängigen Untersuchern vorgenommen. Zur Bestimmung des Ausmaßes der Wirbelsäulenkrümmung wurde die Methode nach Cobb verwendet (Cobb, 1948) und das Ausmaß der Skoliose damit bestimmt. Um das sagittale Profil zu bestimmen wurde die

BWS-Kyphose von T2-T12 und die lumbale Lordose von L1-L5 in gleicher Weise ermittelt. Zudem wurden standardisierte Längenmessungen der Thoraxhöhe T1-T12 sowie der Wirbelsäule T1-S1 im a.p. Strahlengang vorgenommen. Es konnte eine hohe Korrelation der Messergebnisse der beiden unterschiedlichen Untersucher durch die Intra-Klassen-Korrelation (engl. Intra-Class-Correlation oder ICC) gezeigt werden. Der ICC für T1-12 liegt bei 0,996, für T1-S1 bei 0,999 und für den Cobb-Winkel bei 0,989.

Statistische Analyse

Die statistische Analyse wurde mit dem SPSS Statistikprogramm (Version 20, SPSS Inc., Chicago, IL) erstellt. Die deskriptive Statistik wurde mit dem Durchschnitt +/- Standardabweichung und dem Intervall (Minimum bis Maximum) angegeben. Der Vergleich der Daten vor und nach der Behandlung erfolgte mit Hilfe des Student's T-test. Die statistische Signifikanz wurde p-Werten $< 0,05$ zugeordnet. Die Intraobserver-Variabilität wurde durch den ICC bemessen.

4. Ergebnisse

Von insgesamt 22 Patienten, die an der Studie teilgenommen haben, hatten 19 eine thorakale, 2 eine lumbale und 1 eine thorakolumbale Skoliose. Davon beruhten 7 auf einer syndromalen Ursache, 4 traten idiopathisch auf, 5 waren neuromuskulär bedingt, 4 hatten eine Neurofibromatose in Assoziation mit einer Skoliose und 2 eine kongenitale Ätiologie.

Insgesamt erhielten alle Patienten durchschnittlich 8 Verlängerungen (Min. 6, Max. 11) (siehe Tabelle 1) in einem Zeitintervall von durchschnittlich 31 Monaten (Min. 24, Max. 46). Keiner dieser Patienten benötigte postoperativ ein Korsett und keiner erreichte im Behandlungszeitraum die Skelettreife.

Röntgenauswertung

Bei Behandlungsbeginn betrug der durchschnittliche Cobb Winkel 61° (40° - 96°) und verbesserte sich nach der initialen operativen Behandlung auf 28° (11° - 53°). Dies bedeutet eine Korrekturrate von 54% ($p < 0,001$). Der durchschnittliche Cobb Winkel nach der letzten Verlängerung betrug 26° (11° - 64° ; $p = 0,54$). Eine signifikante Veränderung im Vergleich zu postoperativen Werten trat somit nicht ein.

Der Durchschnittswert der thorakalen Kyphose (T1-T12) betrug präoperativ 44° (-32° - 86°) und verringerte sich postoperativ auf 28° (9° - 50° ; $p < 0,001$). Bei der letzten Verlängerung wurde die thorakale Kyphose mit einem Durchschnittswert von 35° gemessen (8° - 62° ; $p < 0,05$). Somit kam es im Vergleich zu postoperativen Werten zu einer signifikanten Zunahme der BWS-Kyphose.

Die lumbale Lordose (L1-L5) veränderte sich von präoperativ 41° (17° - 70°) auf postoperativ 31° (7° - 54° ; $p < 0,001$) und stieg im Beobachtungszeitraum wieder auf 41° an (26° - 58° , $p = 0,84$), jedoch nicht statistisch signifikant.

Die Wirbelsäulenhöhe T1-T12 nahm präoperativ von 18,3cm (13,1cm - 23,4cm) auf postoperativ 20,4cm zu (15,2cm - 25,9cm; $p < 0,001$) und stieg im Beobachtungszeitraum signifikant auf durchschnittlich 22,5cm an (17,4cm - 28,2cm; $p < 0,001$). Von Beginn bis Ende des Beobachtungszeitraumes betrug das durchschnittliche monatliche Wachstum von T1-T12 0,7mm ($p < 0,001$).

Die Wirbelsäulenhöhe T1-S1 nahm präoperativ von 29,6cm (21,7cm - 37,7cm) auf postoperativ 33,1cm zu (25,9cm - 40,8cm; $p < 0,001$) und stieg im Beobachtungszeitraum signifikant auf durchschnittlich 35,9cm an (28,6cm - 44,4cm; $p < 0,001$). Von Beginn bis

Ende des Beobachtungszeitraumes betrug das durchschnittliche monatliche Wachstum von T1-S1 1mm. Die radiologischen Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Komplikationen

In dieser Studie konnten perioperativ keine bedeutenden Komplikationen festgestellt werden. Es kam einmal im Behandlungsverlauf zu einer Schraubenlockerung im Bereich der proximalen Fixation. Dies ereignete sich bei einem Patienten mit Loews- Dietz Syndrom, bei welchem eine erhebliche Osteopenie vorlag. Bei 4 Patienten stellte sich eine proximale junktionale Kyphose im Verlauf ein. Drei der vier Patienten mussten sich aus diesem Grund einer Revisionsoperation unterziehen. Hierbei wurde die Instrumentation um ein weiteres Segment nach kranial erweitert. Bei diesen Patienten handelte es sich präoperativ um jeweils sehr rigide Kyphosen, die vor der Operation eine Krümmung von mehr als 50° aufwiesen. Das Auftreten dieser junktionalen proximalen Kyphosen ist ein bekanntes Problem bei den fusionslosen Techniken.

Zu Materialbrüchen kam es im gesamten Beobachtungszeitraum bei keinem Patienten. Bekannterweise passiert dies bei den konventionellen Verfahren, vor allem bei der Single Rod Technik und bei Anwendung von 4,5mm dicken Stäben. Dannawi et al. (2013) berichten jedoch auch von 2 Materialbrüchen unter der Benutzung von MCGR.

Ein Patient entwickelte im Verlauf eine tiefe Wundinfektion und eine weiterer ein lumbales Adding-on-Phänomen, welches mit einer kaudalen Verlängerung und zusätzlicher Instrumentation von zwei weiteren Wirbeln therapiert wurde.

5. Diskussion

Wirbelsäulendeformitäten, wie sie bei den EOS auftreten, erfordern eine frühzeitige Behandlung, um das Fortschreiten der Deformität zu verhindern. Verschiedene Ätiologien, Komorbiditäten und ein breites Spektrum von Behandlungsmodalitäten machen das Management von EOS zu einer Herausforderung für den Behandler (Campbell et al., 2003; Fernandes, 2007; McMaster, 1979; Sponseller et al., 2007; Yang et al., 2011). Korsettbehandlungen sind besonders bei neuromuskulären und syndromalen Ursachen weniger wirksam. Konventionelle Fusionstechniken führen zu einer Versteifung der Wirbelsäule, die das Wachstum der Brustwirbelsäule und des Brustkorbs einschränken. Demzufolge ist nicht ausreichend Platz für das alveoläre Lungenwachstum und es kann zu restriktiven Lungenerkrankungen kommen (Burri, 2006).

Angesichts der neuen chirurgischen Verfahren hat die Skoliosebehandlung im Vergleich zu früher erhebliche Fortschritte gemacht. Durch die Einführung konventioneller Wachstumsstäbe und später dann der mitwachsenden MCGR ist es nicht mehr notwendig, frühzeitig langgestreckte Fusionsoperationen vorzunehmen. Dadurch kann die Lungenfunktionseinschränkung der Patienten mit Skoliose signifikant gesenkt werden (Karol, 2011; Karol et al., 2008). Ziel ist es, ein Längenwachstum T1-T12 von mindestens 22,5cm zu erreichen, um das Risiko von restriktiven Lungenerkrankungen zu reduzieren. Bis vor einiger Zeit war es notwendig, die konventionellen Stäbe in regelmäßigen Abständen, zumeist alle 6 Monate operativ zu verlängern. Wird eine invasive Verlängerungsmethode angewendet, besteht bei jedem Eingriff neben dem allgemeinen Operationsrisiko auch ein vermehrtes Risiko von Wundinfektionen (Sankar et al., 2010).

Jeder zusätzliche operative Eingriff erhöht das Komplikationsrisiko um 24% und führt demzufolge zu wiederholten Klinikaufenthalten, welche das Auftreten psychischer Belastungen verstärken (Bess et al., 2010; Flynn et al., 2012; Sankar et al., 2010). Die Studie von Sankar et al. (2010) berichtet über verschiedene Komplikationen, die alle im Zusammenhang mit konventionellen fusionslosen Techniken (duale Growing Rod Technik und VEPTR- Verfahren) auftraten. Dank der Entwicklung der Magnetically controlled Growing Rods (MAGEC®) besteht die Möglichkeit einer extrakorporalen magnetischen Distraction, die die operativen Nachstellungen entbehrlich macht. So bietet die Behandlung mit MCGR eine Korrektur der Deformität und die Aufrechterhaltung des Wachstums ohne wiederholte operative Eingriffe und somit mit viel weniger assoziierter Morbidität (Akbarnia et al., 2013; Cheung et al., 2012; Dannawi et al., 2013).

Das T1-S1-Wachstum der kindlichen Wirbelsäule zwischen dem 5. und 10. Lebensjahr beträgt physiologischerweise 11mm pro Jahr (Dimeglio et al., 2011). In dieser Studie

beträgt das Längenwachstum, gemessen an thorakalen Wirbeln T1-T12 im Durchschnitt 7mm jährlich, gemessen von T1-S1 12mm jährlich und entspricht somit dem physiologischen Wirbelsäulenwachstum. Die erreichte Distractionslänge ist ebenfalls vergleichbar mit den Ergebnissen der konventionellen Growing Rods. Akbarnia et al. (2005) beschrieben für die duale Standard Growing Rod-Technik bei progressiv früh beginnenden Skoliosen eine durchschnittliche T1-S1 -Längenzunahme von 12,1 mm pro Jahr.

Dabei ist die Anzahl der Verlängerungen maßgeblich entscheidend für das Wachstumsergebnis. Akbarnia et al. (2008) schreiben in einer Studie über signifikant bessere Ergebnisse des Längenwachstums der Wirbelsäule und der Korrektur der Verkrümmung, wenn die Verlängerungen in einem Abstand von unter sechs Monaten durchgeführt werden. In dieser Studie wurden die Verlängerungen einheitlich im Abstand von vier Monaten durchgeführt. Viele der Patienten haben einen langen Anreiseweg, so dass logistische Gründe für die Wahl der Distractionsintervalle verantwortlich waren. Hinzu kommt noch die Röntgenstrahlung, die der Patient bei jeder Verlängerungskontrolle ausgesetzt ist und die es gilt, so gering wie möglich zu halten, um Spätfolgen zu vermeiden. Ob kürzere Verlängerungsintervalle vorteilhafter sind, kann aus den derzeit vorliegenden Informationen aus der Literatur nicht beantwortet werden. Kürzere Distractionsintervalle haben theoretisch den Vorteil, dass sie ggf. mehr Distractionslänge generieren. Allerdings führt das auch zu erheblicher Entlastung der Wirbelkörper und Bandscheibenstrukturen mit Veränderungen der Wirbelkörpermorphologie (eigene Untersuchungen – noch nicht publiziert).

Nach der initialen Behandlung verbesserte sich der Cobb-Winkel in der Frontalebene von 61° auf 28° ($p < 0,001$). Dieses entspricht auch Ergebnissen von Akbarnia et al. (2013) und Hickey et al. (2014), die von einer Verbesserung des Cobb-Winkels um 32°-57° berichten. In den darauffolgenden Verlängerungen bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes konnten wir eine Veränderung des Cobb-Winkels auf durchschnittlich 26° beobachten, was statistisch nicht signifikant war ($p = 0,54$). Demzufolge mussten wir feststellen, dass wir nach anfänglicher Verbesserung der Krümmung in der Frontalebene nur noch einen Erhalt des zuvor erreichten Krümmungsgrades erzielen konnten. Eine Verbesserung der Korrektur durch unterschiedliche Distraction von Konkavität und Konvexität konnte nicht in einem signifikanten Ausmaß erzielt werden.

Die Röntgenauswertungen der thorakalen Kyphose zeigen im Vergleich zu den präoperativ gemessenen Werten postoperativ eine Verbesserung der Brustwirbelsäulenkrümmung um durchschnittlich 16°. In den darauffolgenden Verlängerungen konnten wir eine Zunahme der thorakalen Kyphose von durchschnittlich

28° postoperativ auf durchschnittlich 35° beobachten. Die Zunahme der Kyphose im Beobachtungszeitraum ist darauf zurückzuführen, dass vier von den behandelten Patienten eine proximale junktionale Kyphose entwickelt hatten.

Im Falle der gemessenen Werte der lumbalen Lordose konnte zwar eine postoperative Verbesserung der Krümmung von 41° auf 31° beobachtet werden. Am Ende des Beobachtungszeitraumes wurden jedoch Werte gemessen, die dem Ausgangswert gleich waren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass postoperativ ein Teil der LWS fusioniert ist oder innerhalb der Verlängerungsstrecke liegt, was dazu führt, dass die Lendenlordose sich zunächst reduziert, da eine Entlordosierung entsteht. Die anschließende Zunahme erklärt sich dadurch, dass die frei gebliebenen lumbalen Segmente wieder mehr in die Lordose gehen.

Vergleicht man die hier dargestellten Röntgenauswertungen mit Daten aus der Literatur, bei denen die Behandlung mit konventionellen Wachstumsstäben durchgeführt wurden, findet man für die erreichte Distraktionslänge der Wirbelsäule sowie für die Korrekturrate der lumbalen Lordose vergleichbare Ergebnisse. Eine minimale Abweichung zugunsten der MCGR findet sich lediglich in der Korrekturrate der thorakalen Kyphose wieder (Akbarnia et al., 2005).

In einer Studie von Akbarnia et al. (2014), geht es um einen direkten Vergleich von traditionell verwendeten Magnetstäben und magnetisch verstellbaren Stäben. Hier zeigen sich ebenfalls keine relevanten Unterschiede bei den Ergebnissen der Längenzunahme der Wirbelsäule sowie der Korrektur der Hauptkrümmung. Ein wesentlicher Unterschied zeigt sich bei der Anzahl der vorgenommenen Operationen. Bei je 17 Patienten wurden in einem Beobachtungszeitraum von 2 Jahren im Falle der konventionellen Magnetstäbe 73 offene Operationen durchgeführt, wobei davon 56 invasive Verlängerungen waren. Bei den 17 Patienten mit MCGR wurden nur 16 offene Operationen und 137 nicht invasive Verlängerungen durchgeführt. Der relevante Unterschied von konventionellen Wachstumsstäben und magnetisch verstellbaren Stäben nach Zhang et al., (2020) ist die verringerte Rate von Infektionen und Wundheilungsproblemen bei den MCGR, die bei den konventionellen Wachstumsstäben in Folge der wiederholten offen chirurgischen Verlängerungsverfahren vermehrt auftreten.

Um die Röntgenbelastung auf lange Sicht zu reduzieren, haben wir angefangen ein Röntgenbild durch Ultraschalluntersuchung zu ersetzen. Kürzlich veröffentlichte Ergebnisse zeigen äquivalente Messungen mit Ultraschall und Röntgenbildern (Stokes et al., 2014; Yoon et al., 2015). Das Lösen von Ankerpunkten, die Lockerung von Schrauben

oder Stabbrüchen kann jedoch nur auf einer Röntgenaufnahme erkannt werden und macht diese deswegen unabdingbar.

Patienten mit strukturellen thorakalen Kyphosen $> 50^\circ$ scheinen ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung von proximalen junktionalen Kyphosen (PJK) zu haben. Aus dieser Erkenntnis heraus hat sich ein Algorithmus entwickelt, so dass Kinder mit solchen Kyphosen präoperativ eine Haloextension von mehreren Wochen unterzogen werden. Die Instrumentation erfolgt dann zumeist bis Th1 oder Th2 unter ausreichender Kyphosierung des proximalen Stabanteils. Mit diesem Vorgehen wurde in neueren Fällen keine PJK mehr beobachtet. Bei einem Patienten mit Loeys-Dietz Syndrom trat 2,5 Jahre nach der Implantation eine Lockerung der proximalen Fixation an der konvexen Seite auf, die zur Revision der proximalen Fixation führte. Unter Benutzung von Doppelstab- 5,5mm-Konstrukten kam es zu keinen Stabbrüchen. Stabbrüche treten häufiger bei Einzelstab-Techniken und bei Nutzung von 4,5 mm dicken Stäben auf. Yang et al. (2011) berichten von 86 Stabfrakturen bei 49 Patienten aus einer prospektiv gesammelten Datenbank von 327 Patienten bei Benutzung konventioneller Wachstumsstäbe. Bisher sind Stabbrüche bei MCGR selten. Dannawi et al. (2013) berichten über 2 von 34 Fällen, die mit MCGR behandelt wurden und bei denen es zum Materialbruch kam. Die Verwendung von 5,5-mm-Konstruktionen verleiht der Wirbelsäule sehr wahrscheinlich mehr Steifigkeit. Es ist jedoch wünschenswert, ein gewisses Maß an Flexibilität beizubehalten, so dass die Verwendung von 5,0-mm-Stangen ein guter Kompromiss zwischen Flexibilität und Stabilität sein könnte.

Eines der bedeutendsten Probleme bei der Verwendung von herkömmlichen Growing Rods ist die Entwicklung von Autofusionen. Gründe für eine solch spontane Fusion der instrumentierten Segmente könnten sein, die wiederholten chirurgischen Traumata, die kraftvollen Verlängerungen mit Mikroverletzungen von Weichteilgeweben mit Einblutungen und nachfolgender Kalzifikation, das Entlasten von Gewebe oder das Vorhandensein der Implantate, die selbst intramuskulär neben der Wirbelsäule lokalisiert sind. Bis jetzt ließen sich in dem hier beschriebenen Patientenkollektiv alle Implantate problemlos verlängern, so dass davon ausgegangen wird, dass in unseren Fällen nach aktuell mehr als 4 Jahren noch keine komplette Autofusion stattgefunden hat. Diese Vermutung kann jedoch erst bei endgültigem Behandlungsabschluss belegt werden. Um festzustellen, dass MCGR die Autofusion verringern, ist eine längere Nachverfolgung mit noch mehr behandelten Patienten erforderlich.

Ein großer Vorteil unserer Studie ist, dass alle Patienten mit dem gleichen chirurgischen Verfahren und dem gleichen Distraktionsprotokoll behandelt wurden. Dies macht sie leicht

vergleichbar, wenn es darum geht, andere chirurgische Verfahren oder Protokolle auszuwerten.

Abschließend lässt sich sagen, dass das MAGEC System eine sichere und effektive Methode für die Behandlung der progressiven EOS ist. Neben einer effektiven Korrektur der Wirbelsäulenkrümmung ermöglicht es ein kontinuierliches Wirbelsäulenwachstum, welches dem von gesunden Kindern ähnelt. Multiple Operationen, die mit konventioneller Technik erforderlich sind, können durch nicht-invasive ambulante Distraction vermieden werden. Folglich sinken die Komplikationsrate und die Morbidität signifikant, was letztendlich eine verbesserte Lebensqualität und Zufriedenheit von Patienten und Eltern mit sich bringt. Ein wichtiges Therapieziel ist somit erreicht.

6. Zusammenfassung

Der Durchschnitts Cobb-Winkel betrug präoperativ 61° (40°-96°) und verbesserte sich nach der Operation auf 28° (11°-53°) ($p < 0,001$). Bei der Nachuntersuchung wurde der Cobb-Winkel weiter auf 26° (11-64) reduziert ($p = 0,54$). Die T1-T12- sowie die T1-S1-Länge nahmen signifikant zu ($p < 0,001$). Die durchschnittliche präoperative thorakale Kyphose sank von 44° (-32°-86°) auf 28° (9°-50°) nach der Operation bzw. auf 35° (8°-62°) zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung. Vier Patienten entwickelten eine junctionale Kyphose. Drei von ihnen mussten operativ revidiert werden. Ein Patient entwickelte ein lumbales "Adding-On"-Phänomen, ein Patient eine tiefe Wundinfektion und bei einem anderen Patienten trat eine Schraubenlockerung auf, die alle eine Revision erforderlich machten. Die Studie zeigt, dass die MCGR-Technik eine effiziente und sichere Methode zur Behandlung von EOS ist. Morbidität und Komplikationen sind geringer als bei der Behandlung mit konventionellen Growing Rods. Nach mindestens 2 Jahren Beobachtungszeitraum ist eine transkutane Verlängerung ohne Korrekptionsverlust immer noch möglich und eine Autofusion konnte nicht beobachtet werden.

The mean preoperative curve measured 61° (40-96) and improved to 28° (11-53) ($p < 0.001$) after surgery. At follow-up the Cobb angle was further reduced to 26° (11-64) ($p = 0.54$). The T1-T12- as well as the T1-S1- length increased significantly ($p < 0.001$). The average preoperative thoracic kyphosis decreased from 44° (-32-86) to 28° (9-50) after surgery, respectively to 35° (8-62) at the time of FU. Four patients developed a junctional kyphosis. Three of them had to be revised. One patient developed a lumbar "adding on", one patient a deep wound infection and in another patient a screw pullout occurred that all required revision. The study supports that the MCGR is an efficient and safe technique to treat EOS. Morbidity and complications are less than treatment with conventional GR's. After a minimum of 2 years transcutaneous lengthening is still possible without loss of correction and autofusion has not yet been detected.

7. Abbildungen und Tabellen



Abbildung 1: 11-jähriges Mädchen mit thorakaler Skoliose mit Entwicklung einer junctionalen Kyphose 6 Monate nach MCGR-Implantation,

(A) Präoperativ, (B) Postoperativ, (C) junctionale Kyphose 6 Monate post OP, (D) nach Korrektur



Abbildung 2: 6-jähriges Mädchen mit unbekannter Muskelerkrankung,
 (A-B) präoperativ, (C-D) nach MCGR Implantation, (E-F) 42 Monate später

Tabelle 1: Demographische Daten und Komplikationen.

Patient	Ge- schlecht	Alter zum Zeitpunkt der OP (in Monaten)	Diagnose	Skoliose	Haupt- krümmung	Zeitraum bis Nachunter- suchung (in Monaten)	Ver- längerungen (Anzahl)	Komplika- tionen
1	W	70	Unbekannte muskuläre Erkrankung	Neuro- muskulär	thorakal	39	8	keine
2	W	55	Prader-Willi- Syndrom	Syndrom- bedingt	Thora- kolumbal	39	10	keine
3	W	92	Loeys Dietz- Syndrom	Syndrom- bedingt	thorakal	42	11	Schrauben- lockerung, junktionale Kyphose
4	W	113	Spinale Muskelatrop- hie Typ III	Neuro- muskulär	lumbal	46	11	keine
5	W	74	Unbekannte muskuläre Erkrankung	Neuro- muskulär	thorakal	37	9	keine
6	M	68	Dandy- Walker- Syndrom	Syndrom- bedingt	thorakal	37	8	keine
7	M	99	NF Typ I	NF	thorakal	37	9	keine
8	W	91	NF Typ I	NF	thorakal	36	9	keine
9	W	102	Nemalin- Myopathie	Neuro- muskulär	thorakal	29	7	keine
10	W	145	Rippenfusion	kongenital	thorakal	29	7	junktionale Kyphose
11	W	110	Infantile Cerebral- parese	Neuro- muskulär	lumbal	28	7	keine
12	W	117	Prader-Willi- Syndrom	Syndrom- bedingt	thorakal	28	7	junktionale Kyphose
13	M	105	Hamartosis	kongenital	thorakal	28	7	keine
14	W	126	Infantil	idiopathisch	thorakal	28	6	keine
15	W	123	infantiles Marfan Syndrome	Syndrom- bedingt	thorakal	27	7	keine
16	M	172	Infantil	idiopathisch	thorakal	27	7	keine
17	W	130	Infantil	idiopathisch	thorakal	26	5	keine
18	M	71	NF Typ I	NF	thorakal	25	5	Spät- infektion
19	W	97	NF typ I	NF	thorakal	25	6	keine
20	W	127	Chromosom etrans- lokation	Syndrom- bedingt	thorakal	24	6	Adding-on
21	M	80	Infantil	idiopathisch	thorakal	24	6	keine
22	M	154	Di Georg Syndrom	Syndrom- bedingt	thorakal	24	6	junktionale Kyphose
M	15w/7m	106				31	8	
SD		30				7	2	

OP: Operation; w: weiblich; m:männlich; M: Mittelwert SD: Standartabweichung; NF: Neurofibromatose

Tabelle 2: Röntgenauswertungen

	präoperativ	postoperativ	Korrekturrate (%)	Nach- untersuchung	Korrektur- rate (%)
Cobb (°)	61 ± 14	28 ± 19	54	26 ± 13	57
Kyphose (°)	44 ± 24	28 ± 12	36	35 ± 14	21
Lordose (°)	41 ± 15	31 ± 12	24	41 ± 9	0
T1-T12 (cm)	18.3 ± 2.5	20.4 ± 2.6	12	22.5 ± 2.7	23
T1-S1 (cm)	29.6 ± 4.3	33.1 ± 4.3	12	35.9 ± 3.9	21

8. Literaturverzeichnis

- Akbarnia, B. A., Pawelek, J. B., Cheung, K. M. C., Demirkiran, G., Elsebaie, H., Emans, J. B., ... Group, S. (2014). Traditional Growing Rods Versus Magnetically Controlled Growing Rods for the Surgical Treatment of Early-Onset Scoliosis : A Case-Matched 2-Year Study, 2.
- Akbarnia BA, Marks, DS, Boachie-Adjei O, Thompson AG, A. M. (2005). Dual growing rod technique for the treatment of progressive earlyonset scoliosis: A multicenter study. *Spine*, 30, 46–57.
- Akbarnia BA, E.-H. (2015). Letter to the editor, early onset scoliosis: time for consensus. *Spine Deform*, 3, 105–106.
- Akbarnia BA1, Breakwell LM, Marks DS, McCarthy RE, Thompson AG, Canale SK, Kostial PN, Tambe A, A. M. G. S. S. G. (2008). Dual growing rod technique followed for three to eleven years until final fusion: the effect of frequency of lengthening. *Spine*, 33, 984–990.
- Akbarnia BA1, Cheung K, Noordeen H, Elsebaie H, Yazici M, Dannawi Z, K. N. (2013). Next generation of growth-sparing techniques: preliminary clinical results of a magnetically controlled growing rod in 14 patients with early-onset scoliosi. *Spine*, 38(8), 665–670.
- Bess, & Shay MD; Akbarnia, Behrooz A. MD; Thompson, George H. MD; Sponseller, Paul D. MD; Shah, Suken A. MD; El Sebaie, Hazem FRCS, MD; Boachie-Adjei, Oheneba MD; Karlin, Lawrence I. MD; Canale, Sarah BS; Poe-Kochert, Connie RN, CNP; Skaggs, D. L. M. (2010). Complications of growing-rod treatment for early-onset scoliosis: analysis of one hundred and forty patients. *J Bone Joint Surg Am*, 92, 2533–2543.
- Burri PH. (2006). Structural aspects of postnatal lung development – alveolar formation and growth. *Biol Neonate.*, 89(4), 313–322.
- Campbell RM Jr, Smith MD, M. T. et al. (2003). The characteristics of thoracic insufficiency syndrome associated with fused ribs and congenital scoliosis. *J Bone Joint Surg (Am)*, 85-A, 399–408.
- Cheung KM1, Cheung JP, Samartzis D, Mak KC, Wong YW, Cheung WY, Akbarnia BA, L. K. (2012). Magnetically controlled growing rods for severe spinal curvature in young children: a prospective case series. *Lanet*, 379, 1967–1974.
- Cobb JR. (1948). Outline for the study of scoliosis. *Am Acad Orthop Surg Instr Course Lect.*, 5, 261–275.
- Dannawi, Z., Altaf, F., Harshavardhana, N. S., El Sebaie, H., & Noordeen, H. (2013). Early results of a remotely-operated magnetic growth rod in early-onset scoliosis. *The Bone & Joint Journal*, 95-B(1), 75–80. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.95B1.29565>
- Dimeglio A. (1993). Growth of the Spine Before Age 5 Years. *J Pediatr Orthop.*, 1-B, 102–107.
- Dimeglio A. Canavese F, C. Y. (2011). Growth and Adolescent Idiopathic Scoliosis: When and how much? *J Pediatr Orthop.*, Jan-Feb;31, S28-36.

- Fernandes P, W. S. (2007). Natural history of early onset scoliosis. *J Bone Joint Surg Am*, 89, 21–33.
- Flynn JM1, Matsumoto H, Torres F, Ramirez N, V. M. (2012). Psychological dysfunction in children who require repetitive surgery for early onset scoliosis. *J Pediatr Orthop*, 32 (6), 594–599.
- Hickey, B. A., Towriss, C., Baxter, G., Yasso, S., James, S., Jones, A., ... Ahuja, S. (2014). Early experience of MAGEC magnetic growing rods in the treatment of early onset scoliosis. *European Spine Journal*. <https://doi.org/10.1007/s00586-013-3163-0>
- K. Ridderbusch, M. Rupperecht, P.Kunkel, R. S. (2013). Nonfusionstechniken zur Behandlung der kindlichen Skoliose. *Der Orthopäde*, 42, 1030–1037.
- Karol, L. A. (2011). Early definitive spinal fusion in young children: What we have learned. In *Clinical Orthopaedics and Related Research*. <https://doi.org/10.1007/s11999-010-1622-z>
- Karol, L. A., Johnston, C., Mladenov, K., Schochet, P., Walters, P., & Browne, R. H. (2008). Pulmonary function following early thoracic fusion in non-neuromuscular scoliosis. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. <https://doi.org/10.2106/JBJS.G.00184>
- McMaster MJ, M. M. (1979). The management of progressive infantile idiopathic scoliosis. *Bone Joint Surg (Br)*, 61-B, 36–42.
- Mehta, M. H. (2005). Growth as a corrective force in the early treatment of progressive infantile scoliosis. *Journal of Bone and Joint Surgery - British Volume*, 87-B(9), 1237–1247. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.87B9.16124>
- Muirhead A, C. A. (1985). The assessment of lung functions in children with scoliosis. *J Bone Joint Surg (BR)*, 67B, 699–702.
- Ridderbusch, K., Spiro, A. S., Kunkel, P., Grolle, B., Stücker, R., & Rupperecht, M. (2018). Strategien in der Behandlung der frühkindlichen Skoliose. *Deutsche Ärzteblatt*, 115. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2018.0>
- Rigo M, Quera-Salvá G, Villagrasa M, et al. . (2008). Scoliosis intensive outpatient rehabilitation based on Schroth method. *Health Technol Inform*, 135, 208–227.
- Sankar, W. N., Acevedo, D. C., & Skaggs, D. L. (2010). Comparison of complications among growing spinal implants. *Spine*, 35. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3181c6edd7>
- Schreiber S, Parent E, Moez E, et al. . (2015). The effect of Schroth exercises added to the standard of care on the quality of life and muscle endurance in adolescents with idiopathic scoliosis—an assessor and statistician blinded randomized controlled trial. *Scoliosis*, 10, 24.
- Sponseller PD, Yazici M, D. C. et al. . (2007). Evidence basis for management of spine and chest wall deformities in children. *Spine*, 32, 81–90.
- Stokes, O. M., O'Donovan, E. J., Samartzis, D., Bow, C. H., Luk, K. D. K., & Cheung, K. M. C. (2014). Reducing radiation exposure in early-onset scoliosis surgery patients: Novel use of ultrasonography to measure lengthening in magnetically-controlled growing rods. *Spine Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2014.01.039>

- Stücker, R. (2010). Die idiopathische Skoliose. *Orthopädie Und Unfallchirurgie Up2date*5, 39–56.
- Stücker, R. (2016). The growing spine:normal and abnormal development. *Orthopäde*, 45, 534–539.
- Technologies, E. (2014). MAGEC® Spinales Schienungs- und Distractionssystem - Ellipse Technologies. Retrieved from ellipse-tech.com/wp-content/uploads/2015/06/LC0002-P-GERMAN-Artwork.pdf
- Trobisch, P., Suess, O., & Schwab, F. (2010). Idiopathic scoliosis. *Deutsches Ärzteblatt International*, 107(12), 1–39. <https://doi.org/10.5137/1019-5149.JTN.8838-13.0>
- Weinstein, S. L., Dolan, L. A., Wright, J. G., & Dobbs, M. B. (2013). Effects of Bracing in Adolescents with Idiopathic Scoliosis. *New England Journal of Medicine*, 369(16), 1512–1521. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1307337>
- Weiss HR, K. R. (2006). Improving excellence in scoliosis rehabilitation: a controlled study of matched pairs. *Pediatr Rehabil*, 9, 190–200.
- Yang, J. S., Sponseller, P. D., Thompson, G. H., Akbarnia, B. A., Emans, J. B., Yazici, M., ... Poe-Kochert, C. (2011). Growing rod fractures: Risk factors and opportunities for prevention. *Spine*. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e31822a982f>
- Yoon, W. W., Chang, A. C., Tyler, P., Butt, S., Raniga, S., & Noordeen, H. (2015). The use of ultrasound in comparison to radiography in magnetically controlled growth rod lengthening measurement: a prospective study. *European Spine Journal*. <https://doi.org/10.1007/s00586-014-3589-z>
- Zhang, Y., & Zhang, J. (2020). Treatment of early-onset scoliosis : techniques , indications , and complications, 0(3). <https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000000614>

Danksagung

Besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Stücker für die Möglichkeit, die Dissertation in seiner Abteilung schreiben zu können. Ein großer Dank geht an Herrn Dr. Karsten Ridderbusch, der mir bei der Umsetzung der Arbeit von der Erfassung der Daten bis zum Schreiben stets eine große Unterstützung war. Er war sehr hilfsbereit, wenn es um Fragen oder Probleme ging und war jederzeit erreichbar. Vielen Dank dafür.

Außerdem danke ich meinem Mann, der mich auf meinem gesamten Weg durch das Studium begleitet hat und mir das Studieren mit Kindern oft erleichtert hat.

Zuletzt danke ich noch meiner Schwester Marieke und meiner Freundin Annika, die mir beide hilfsbereit bei der Korrektur der Arbeit zur Seite standen.

Lebenslauf entfällt aus datenschutzrechtlichen Gründen.

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Unterschrift: