

Aus der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
der Universität zu Köln
Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. P. Eysel

Retrospektive Untersuchung und Vergleich der Instrumentationsmethoden für die operative Behandlung der idiopathischen Skoliosen

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Carolin Bay
aus Köln, Deutschland

promoviert am 01. Juni 2026

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink

1. Gutachter: Universitätsprofessor Dr. med. P. Eysel

2. Gutachter: Privatdozent Dr. med. D. Grevenstein

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich keine Unterstützungsleistungen erhalten.

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Der dieser Arbeit zugrunde liegende Datensatz wurde ohne meine Mitarbeit in der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universität zu Köln von Herrn Prof. Dr. med. Peer Eysel zur Verfügung gestellt.

Die zu ermittelnden Daten wurden anhand der Software ORBIS, Version 080436303.0010DACHL, zusammengetragen und hinsichtlich demographischer Merkmale, wie Alter und Geschlecht, sowie operationsspezifischer Parameter ausgewertet. Zu den erfassten Merkmalen gehörten: Operationsmethode (CT-navigiert/nicht CT-navigiert), Alter, Geschlecht, Cobb-Winkel-Korrektur, intraoperativer Blutverlust, Operationszeit, Durchleuchtungszeit, postoperative Komplikationen, postoperative Intensivpflichtigkeit und die stationäre Aufenthaltsdauer.

Die deskriptive und analytische statistische Auswertung der Datensätze erfolgte anhand von Excel für Mac IOS Version 16.99.2 (25072714) und den online verfügbaren Statistikprogrammen von www.statskingdom.com¹, www.socscistatistics.com² und www.graphpad.com.³

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 08.01.2026

Unterschrift:

Danksagung

Ich danke der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universität zu Köln unter der Direktion von Universitätsprofessor Dr. med. Peer Eysel für die großzügige zur Verfügungstellung der Patientendaten. Ebenso gilt mein Dank Privatdozent Dr. Stavros Oikonomidis für die Betreuung der Dissertation.

In Liebe meinen Eltern gewidmet

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	8
1. ZUSAMMENFASSUNG	10
2. EINLEITUNG	12
2.1. Aufbau der Wirbelsäule	12
2.2. Definition der Skoliose	14
2.3. Prävalenz der Skoliose	15
2.4. Ätiologie der idiopathischen Skoliose	15
2.5. Arten der Skoliose	16
2.5.1. Kongenitale Skoliose	16
2.5.2. Neuromuskuläre Skoliose	16
2.5.3. Idiopathische Skoliose	17
2.6. Klassifikation der idiopathischen Skoliose	18
2.6.1. Klassifikation nach Cobb-Winkel	19
2.6.2. Klassifikation nach King	20
2.6.3. Klassifikation nach Lenke	20
2.7. Diagnostik der Skoliose	22
2.8. Prognose der idiopathischen Skoliose	24
2.9. Therapie der idiopathischen Skoliose	25
2.9.1. Konservative Therapie	26
2.9.2. Operative Therapie	26
2.10. Fragestellungen und Ziel der Arbeit	31
3. MATERIAL UND METHODEN	32
3.1. Arbeitsdesign und Patientenpool	32
3.2. Methoden	33

3.2.1.	Auswertung der Röntgenbilder und Cobb-Winkel-Bestimmung	33
3.2.2.	Auswertung Patientendaten und operationsspezifischer Parameter	34
3.2.3.	Statistische Auswertung	34
4.	Ergebnisse	36
4.1.	Statistische Auswertung	36
4.1.1.	Altersverteilung	36
4.1.2.	Geschlechterverteilung	37
4.1.3.	Cobb-Winkel-Korrektur	39
4.1.4.	OP-Dauer	40
4.1.5.	Intraoperativer Blutverlust	41
4.1.6.	Durchleuchtungszeit	43
4.1.7.	Intensivpflichtigkeit	44
4.1.8.	Stationäre Aufenthaltsdauer	45
4.2.	Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse	48
5.	DISKUSSION	49
5.1.	Zusammenfassung der Ergebnisse	49
5.2.	Limitationen der Arbeit	59
5.3.	Ausblick	60
5.4.	Praktische Implikationen	60
6.	LITERATURVERZEICHNIS	62
7.	ANHANG	71
7.1.	Abbildungsverzeichnis	71
7.2.	Tabellenverzeichnis	73
8.	VORABVERÖFFENTLICHUNG VON ERGEBNISSEN	74

Abkürzungsverzeichnis

a	-	annus (Jahr)
Abb.	-	Abbildung
AIS	-	Adoleszente idiopathische Skoliose
a.- p.	-	anterior – posterior
ASA	-	American Society of Anesthesiologists
CT	-	Computertomografie
d	-	dies (Tag)
DRB	-	Dynamic Reference Base
BLV	-	Blutverlust
BWS	-	Brustwirbelsäule
h	-	Hour (Stunde)
HWK	-	Halswirbelkörper
HWS	-	Halswirbelsäule
ICP	-	Infantile cerebrale Parese
Int +	-	intensivpflichtig
Int -	-	nicht intensivpflichtig
Lig.	-	Ligamentum = Band
Ligg.	-	Ligamenta = Bänder
LWS	-	Lendenwirbelsäule
Max	-	Maximum
MCGR	-	Magnetically Controlled Growing Rods
Min	-	Minimum
min	-	Minute
MRT	-	Magnetresonanztomografie
Nav +	-	CT-navigiertes Operationsverfahren
Nav -	-	nicht CT-navigiertes Operationsverfahren
NMS	-	Neuromuskuläre Skoliose
OP	-	Operation
p.– a.	-	posterior – anterior
RVAD	-	Rip Vertebral Angle Difference
s	-	Sekunde
SD	-	Standard deviation (Standardabweichung)

SMA - Shape Memory Alloy
Tab. - Tabelle
vs. - versus
w/m - weiblich/männlich
z.B. - zum Beispiel

1. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist eine retrospektive Untersuchung und ein Vergleich der Instrumentationsmethoden (Computertomographie basierte Navigation (Regio Matching) vs. fluoroskopisch gestützte Instrumentation) für die operative Behandlung der idiopathischen Skoliosen. Das analysierte Patientenkollektiv umfasste 71 Probanden im Alter von 11 bis 22 Jahren, die im Zeitraum von 2011 bis 2018 in der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universität zu Köln operiert wurden.

Die primäre Fragestellung dieser Arbeit ist, zu untersuchen, inwieweit sich die Computertomographie basierte Navigation von der fluoroskopisch gestützten Instrumentation (nicht CT-navigiert) anhand folgender Parameter unterscheidet: Alter, Geschlecht, Cobb-Winkel-Korrektur, intraoperativer Blutverlust, intraoperative Durchleuchtungszeit, OP-Dauer, postoperative Komplikationen, postoperative Intensivpflichtigkeit und stationäre Aufenthaltsdauer.

Die vorhandenen Datensätze wurden retrospektiv analysiert und das vorhandene Bildmaterial röntgenologisch durch die prä- und postoperative Cobb-Winkel-Bestimmung ausgewertet.

Die Datenanalyse zeigte signifikante Unterschiede bezüglich der Computertomographie basierten Navigation und der stationären Aufenthaltsdauer ($p = 0.0002$).

Bei dem CT-navigierten Verfahren zeigte sich eine signifikant längere Operationsdauer ($p = 0.0006$) und Durchleuchtungszeit ($p = 0.002$) sowie Intensivpflichtigkeit ($p = 0.0006$).

Als nicht signifikant unterschiedlich erwiesen sich hingegen die Parameter Alter ($p = 0.94$), Geschlecht ($p = 0.3$), Cobb-Winkel-Korrektur ($p = 0.85$) und intraoperativer Blutverlust ($p = 0.83$).

Die in dieser Studie durchgeführte vergleichende Analyse der beiden, in der Routineversorgung praktizierten OP-Methoden (CT-navigiert und nicht CT-navigiert), ergab hinsichtlich der postoperativen Cobb-Winkel-Korrektur keinen entscheidenden Unterschied zwischen den Methoden, so dass keine Präferenzempfehlung für eine der beiden Operationsmethoden gegeben werden kann.

Zu diskutieren wäre, inwieweit die Signifikanz der Computertomographie basierten Navigation bei der stationären Aufenthaltsdauer im klinischen Alltag ein Entscheidungskriterium sein könnte.

2. Einleitung

Einleitend zu der vorliegenden Studie werden die wesentlichen theoretischen Grundlagen der idiopathischen Skoliose, sowie deren Ätiologie, Klassifikationen und Diagnose dargestellt. Darüber hinaus erfolgt die Veranschaulichung verschiedener therapeutischer Behandlungsmethoden.

2.1. Aufbau der Wirbelsäule

Die menschliche Wirbelsäule ist ein doppel-S-förmiges, flexibles und segmentiertes Achsenskelett.⁴ Ihre Hauptfunktionen bestehen darin die Beweglichkeit des Rumpfes zu ermöglichen, axiale Stöße abzdämpfen und das Rückenmark zu schützen.⁴

Ihr anatomischer Aufbau besteht aus Wirbeln (Vertebrae), den dazwischen liegenden Bandscheiben (Disci intervertebralia) und einem stabilisierenden Bandapparat (Ligamenta).⁴

Aufgrund der Anzahl und variierenden Form der Wirbelkörper, ist eine Gliederung in fünf Abschnitte möglich:

- Halswirbelsäule (HWS) - 7 Wirbelkörper
- Brustwirbelsäule (BWS) - 12 Wirbelkörper
- Lendenwirbelsäule (LWS) - 5 Wirbelkörper
- Kreuzbein (Os sacrum) - 5 Wirbelkörper (fusioniert)
- Steißbein (Os coccygis) - 3-5 Wirbelkörper rudimentär).⁴

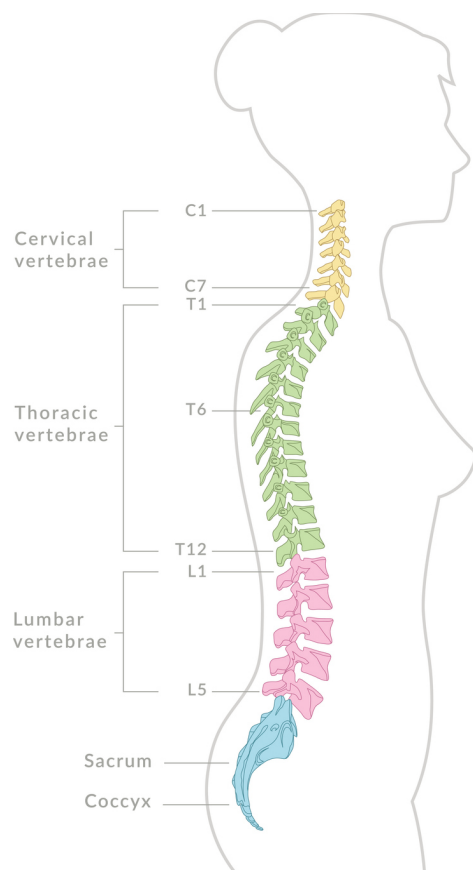


Abb. 1: Aufbau und Abschnitte der Wirbelsäule. Quelle: www.istockphoto.com; Stock-Illustration-ID:523037013

In der sagittalen Ansicht beschreibt die Wirbelsäule physiologisch zervikal und lumbal eine leichte Krümmung nach ventral (Lordose), wobei thorakal eine leichte Krümmung nach dorsal (Kyphose) vorliegt.⁴ Diese spezielle Form dient der Gewichtsverteilung des Rumpfes über die Hüftgelenke und ist Grundvoraussetzung für einen dauerhaft aufrechten Gang.⁴

Des Weiteren ist eine segmentale Strukturierung der Wirbelsäule mit Hilfe des Drei-Säulen-Modells möglich. Dieses wird zwar vornehmlich für die Traumatologie verwendet, veranschaulicht aber die Wirbelkörper und den zugehörigen Bandapparat (siehe Abb. 2):

- Ventrale Säule: Lig. longitudinale anterius (vorderes Längsband), vordere zwei Drittel der Wirbelkörper sowie der Bandscheiben
- Zentrale Säule: hinteres Drittel der Wirbelkörper und Bandscheiben, Lig. longitudinale posterius (hinteres Längsband), bildet ventrale Begrenzung des Spinalkanals
- Dorsale Säule: Wirbelbögen, Wirbelfortsätze, Ligg. flava, Ligg. interspinalia. Lig. supraspinale.^{4,5}

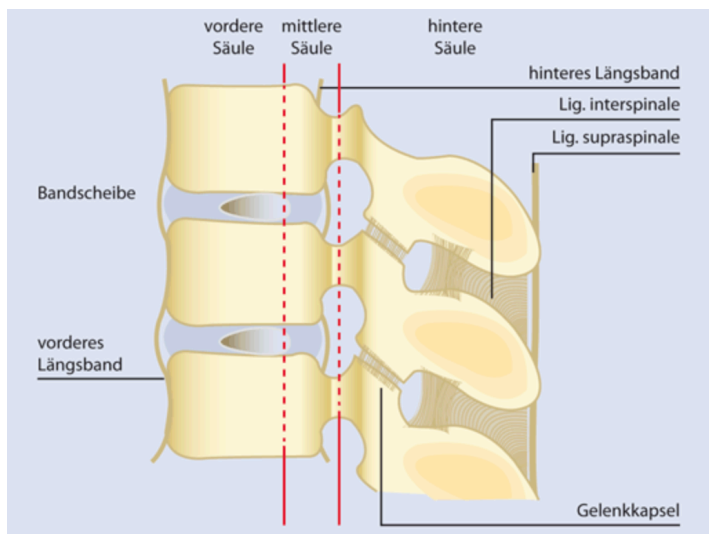


Abb. 2: Drei-Säulen-Modell der Wirbelsäule. Quelle⁶

Darüber hinaus dient die Wirbelsäule als Konnektionsstelle für die Extremitäten und Rippen und stellt eine leitende Struktur für Muskeln, Nerven und Blutgefäße dar. Aufgrund dessen, können sich Erkrankungen der Wirbelsäule vielfältig auf die umliegenden Organsysteme auswirken.

2.2. Definition der Skoliose

Als Skoliose (zu deutsch Krümmung) wird eine strukturell deformierende Wirbelsäulenerkrankung unterschiedlicher Ätiologie bezeichnet, die zu diversen Dekompensationsversuchen in den verschiedenen anatomischen Achsenebenen (sagittal, koronar/frontal, transversal) führt.⁷ Als Maß für die Beurteilung der Skoliose wird der Cobb-Winkel herangezogen. Er wird über eine anterior-posterior (a.-p.) oder posterior-anterior (p.-a.) Röntgenbildaufnahme erfasst und berechnet. Ist dieser Winkel in der Koronarebene gleich oder größer als 10°, so ist die Definition einer Skoliose erfüllt.⁷

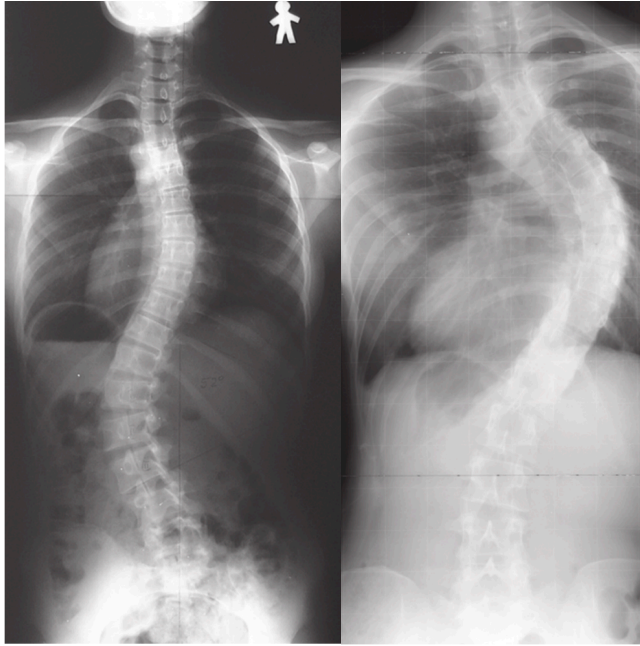


Abb. 3: Doppelbogige thorakolumbale Skoliose (links) und einbogige thorakale Skoliose (rechts).⁸

2.3. Prävalenz der Skoliose

Die Angaben über die Prävalenz der Skoliosen variieren zwischen 0,47 %-5,2 %, ^{7,9} wobei meist eine Gesamtprävalenz von 2-3 % in der Allgemeinbevölkerung angegeben wird.⁹ 10 % davon entwickeln eine Behandlungsbedürftigkeit.¹⁰

Betrachtet man das Geschlechterverhältnis w/m, so liegt bei eher milderen Skoliosen, die einen Cobb-Winkel von 11-20° aufweisen, das Verhältnis w/m bei 1,4:1.^{7,9} Bei schweren Skoliosen mit einem Cobb-Winkel von > 40° verändert sich das w/m-Verhältnis mit 7,2:1^{7,9} deutlich in Richtung der weiblichen Population.

Verwandte 1. Grades von einer, an Skoliose erkrankten Person, haben ein erhöhtes Risiko ebenfalls eine Skoliose zu entwickeln (Prävalenz von 10 %).¹¹

2.4. Ätiologie der idiopathischen Skoliose

Verschiedene Erklärungsansätze hinsichtlich der Genese der idiopathischen Skoliose, wie beispielsweise genetische, biomechanische, metabolische, hormonelle oder umweltassoziierte Aspekte werden diskutiert, jedoch ist das Verständnis zu ihrer Ätiologie noch limitiert.^{7,9} Vermutet wird ein schnelleres ventrales Wachstum der Wirbelkörper, im Vergleich zum dorsalen Wachstum. Dies führt möglicherweise mit zu einer Rotation der Wirbelkörper und bedingt das dreidimensionale Erscheinungsbild der Skoliose.¹⁰ Über 90 % der Patienten mit idiopathischer Skoliose weisen thorakal eine rechts konvexe und lumbal eine links konvexe Krümmung auf.¹¹ Bei

Abweichungen von diesem Erscheinungsbild sollte nach anderen Ursachen geforscht werden.

2.5. Arten der Skoliose

Je nach Ätiologie können verschiedene Arten der Skoliose unterschieden werden.

Eine grobe Einteilung kann in Early-Onset-Skoliosen (vor dem 5. Lebensjahr) und Late-Onset-Skoliosen (nach dem 5. Lebensjahr) vorgenommen werden.¹⁰

Häufige Ursachen für Early-Onset-Skoliosen stellen dabei kongenitale und neuromuskuläre Faktoren dar, sowie Skelettdysplasien.¹⁰ Diese Skoliose-Formen machen ca. 20 % der Skoliosen aus, wobei die übrigen 80 % der Skoliosen unklarer Genese sind und der Kategorie der idiopathischen Skoliosen zugeordnet werden.^{7,9}

Nicht idiopathische Skoliosen, die nach dem fünften Lebensjahr auftreten (Late-Onset-Skoliosen), können mit einer Neurofibromatose, speziellen Bindegewebserkrankungen, wie dem Ehlers-Danlos- oder dem Marfan-Syndrom assoziiert sein.^{7,11}

Bei Erwachsenen können degenerative Veränderungen der Wirbelsäule und Bandscheiben als Ursache für eine nicht idiopathische Skoliose infrage kommen.^{7,11}

2.5.1. Kongenitale Skoliose

Bei der kongenitalen Skoliose kommt es zu einer gestörten Wirbelsäulenentwicklung, während der Embryonalphase, welche sich durch Fehler der Formation (Halbwirbelbildung), Segmentation (Barbildung: knöcherne Spange) oder einer Kombination aus beiden ausdrücken kann.^{7,12} Die kongenitale Skoliose macht ca. 10 % der pädiatrischen Wirbelsäulenfehlbildungen aus und ist häufig mit weiteren intra- (Spina bifida) und extra-spinalen Organfehlbildungen (Herz, Urogenitaltrakt) assoziiert.^{7,12}

2.5.2. Neuromuskuläre Skoliose

Die neuromuskuläre Skoliose (NMS) ist die zweithäufigste Form der Skoliose und zeichnet sich durch einen frühen Erkrankungsbeginn und eine rasche Progression aus.¹³

Im Rahmen neurologischer Grunderkrankung, wie beispielsweise der infantilen Cerebralparese (ICP), kann es aufgrund der starken Muskelkontraktion zu der

Ausbildung einer Skoliose kommen. Dabei ist das Risiko einer Skolioseentwicklung um so höher (64-90 %)⁷, je gravierender die motorische Einschränkung ausgeprägt ist. Im Formenkreis der Muskelatrophien, kommt es aufgrund der starken biomechanischen Instabilität sowie der gestörten Haltungskontrolle meist zur Ausbildung einer Skoliose. Dabei belaufen sich die Angaben einer Skolioseentwicklung bei der Duchenne-Muskelatrophie und einer damit einhergehenden Rollstuhlpflichtigkeit auf 90 %.⁷ Bei der spinalen Muskelatrophie wird eine nahezu 100%ige Ausbildung einer Skoliose angegeben.⁷

Die NMS gehen häufig mit kardio-pulmonalen Beeinträchtigungen und Schmerzen einher.^{13,14}

2.5.3. Idiopathische Skoliose

Die idiopathische Skoliose ist mit ca. 80 % die häufigste Form der Skoliose und stellt eine Ausschlussdiagnose zu den oben aufgeführten Skoliosen dar.^{10,15}

Ihre Pathogenese ist bislang noch unklar, jedoch konnte bei den meisten Wirbelsäulen von AIS-Patienten eine ausgeprägte Wachstumsdifferenz zwischen den Wirbelkörpern und den dorsalen Elementen (Pedikel, Facettengelenke), inklusive des Rückenmarks, festgestellt werden.⁷ Dieses Missverhältnis begünstigt zum einen das skoliotische Wachstum der Wirbelsäule, zum anderen führt es zu einer Lordosierung des betroffenen Wirbelsäulensegmentes, wodurch die rotatorische Stellungskontrolle durch die Facettengelenke reduziert ist und die Skoliose ihre Dreidimensionalität erhält.⁷

Obwohl die idiopathische Skoliose optisch sehr auffällig sein kann, stellt sie sich hinsichtlich Schmerzen als klinisch meist inapparent dar.

Die idiopathische Skoliose wird nach dem Erscheinungsalter eingeteilt in infantile (vor dem 3. Lebensjahr), juvenile (3.- 10. Lebensjahr) und adoleszente Skoliose (ab dem 11. Lebensjahr).¹⁰

Weitere Einteilungen der idiopathischen Skoliose sind möglich und werden im Folgenden aufgeführt.

2.6. Klassifikation der idiopathischen Skoliose

Die idiopathische Skoliose lässt sich hinsichtlich unterschiedlicher Attribute wie folgt klassifizieren:

Manifestationsalter:

- infantil (0-3 Jahre)
- juvenil (3-10 Jahre)
- adoleszent (> 10 Jahre)^{7,10,11}

Lokalisation der Hauptkrümmung:

- zervikal (Scheitelwirbel HWK 2 - 6)
- zerviko-thorakal (Scheitelwirbel HWK 7 – BWK 1)
- thorakal (Scheitelwirbel BWK 2 – BWK 11)
- thorako-lumbal (Scheitelwirbel BWK 12 – LWK 1)
- lumbal (Scheitelwirbel LWK 2 – LWK 4)
- lumbo-sakral (Scheitelwirbel LWK 5 und distal)^{10,16}

Schweregrad der Krümmung

- moderat (20-25°)
- mittelschwer (25-35°)
- höhergradig (35-50°)^{7,17}

Krümmungsmuster

- einfach gebogen
- doppelt gebogen
- dreifach gebogen

Für eine strukturierte Einteilung der Skoliose und der damit verbunden therapeutischen Maßnahmen, wurden komplexe Klassifikationsschemata wie die nach Cobb, King und Lenke entwickelt.

2.6.1. Klassifikation nach Cobb-Winkel

Als aktueller Goldstandard für die quantitative Bestimmung des Schweregrades einer Skoliose wird die Winkelmessung nach J.R. Cobb anhand einer a. - p.-Ganzwirbelkörperröntgenbildaufnahme im Stehen herangezogen.¹⁸ Ist die Röntgenaufnahme erfolgt, so werden zunächst die Neutralwirbel ermittelt. Als Neutralwirbel bezeichnet man jene Wirbel, die am jeweiligen Wendepunkt der lateralen Krümmung liegen und am wenigsten zur Krümmung beitragen. Sind diese identifiziert, so werden anhand der Deckplatte des proximalen Neutralwirbels und an der Bodenplatte des distalen Neutralwirbels Referenzlinien angelegt. Danach wird an jede der beiden Referenzlinien eine Senkrechte im rechten Winkel eingezeichnet. Der eingeschlossene Winkel dieser beiden Senkrechten entspricht dem Cobb-Winkel.¹⁹

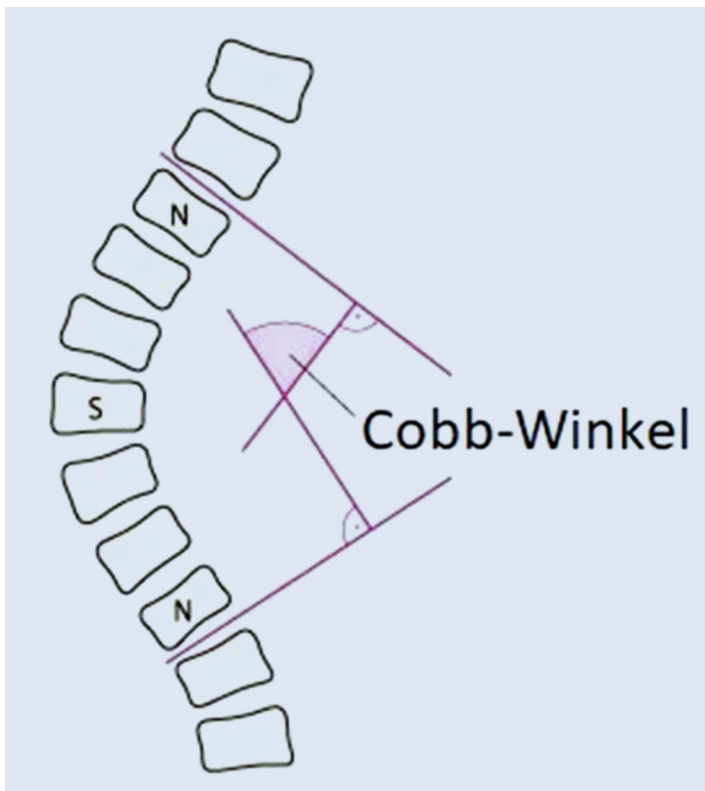


Abb. 4: Schematische Darstellung der Cobb-Winkel-Bestimmung.²⁰

Die Größe des Cobb-Winkels ist hinsichtlich der Therapie wegweisend. Folgende Schweregrade werden unterschieden:

- moderat (20-25°)
- mittelschwer (25-35°)
- höhergradig (35- > 50°)^{7,17}

Im Bereich der moderaten bis mittelschweren Skoliosen wird vornehmlich konservativ therapiert mit Physiotherapie und/oder Korsett. Die höhergradigen Skoliosen stellen je nach Ausprägung und Beschwerdebild eine Operationsindikation dar.¹⁷

2.6.2. Klassifikation nach King

1983 entwickelten Howard King und John Moe erstmalig eine Klassifikation zur Einteilung der Skoliosen. Dabei unterschieden sie zwischen strukturellen und nicht strukturellen/kompensatorischen Krümmungen der Wirbelsäule. Dies brachte sie zu der Beschreibung von fünf verschiedenen Skoliosen-Typen:

- Typ I: s-förmige Krümmung (thorakal und lumbal), größere lumbale Krümmung
- Typ II: s-förmige Krümmung (thorakal und lumbal), thorakale Krümmung ist $\geq$ der lumbalen Krümmung
- Typ III: thorakale Krümmung
- Typ IV: lange c-förmige Krümmung
- Typ V: doppelte thorakale Krümmung²¹

Die Einteilung nach King entspricht nicht mehr den Anforderungen an eine Klassifikation, die eine therapeutische Relevanz aufweist und wurde deshalb von der neueren Lenke-Klassifikation abgelöst.¹⁰

2.6.3. Klassifikation nach Lenke

Das heutzutage am häufigsten verwendete Einteilungsschema der AIS ist die Klassifikation nach Lenke. Sie wurde 2001 von Lawrence Lenke et al.²² entwickelt und basiert auf der zweidimensionalen Analyse von Ganzwirbelkörperröntgenaufnahmen in koronarer und sagittaler Ebene, sowie der Analyse von Bending-Aufnahmen.^{7,16,22}

Die Klassifikation umfasst folgende Aspekte:

- Kurventypen (Typ I-VI)
- Lumbaler Modifier (A, B, C)
- Sagittaler Thorax Modifier (-, N, +)^{7,16,22}

Damit eine Zuordnung in die Lenke-Klassifikation erfolgen kann, wird zunächst der koronare Cobb-Winkel der Primärkrümmung ermittelt. Danach erfolgt eine a.-p.-Bending-Röntgenaufnahme, um die Krümmungsflexibilität zu beurteilen. Dies sind die

Grundvoraussetzungen, um eine Unterscheidung zwischen einer strukturellen und einer nicht-strukturellen Krümmung vornehmen zu können.¹⁶

Eine strukturelle Skoliose liegt dann vor, wenn der Cobb-Winkel der Restkrümmung in der Bending-Aufnahme in Richtung der Konvexität noch 25° oder mehr beträgt.¹⁶ Als ebenfalls strukturell gelten hochthorakale oder thorako-lumbale Krümmungen, wenn sie eine Kyphosierung über 20° aufweisen.¹⁶

Entsprechend gilt eine Krümmung als nicht-strukturell, wenn die Restkrümmung in der reversen Bending-Aufnahme weniger als 25° beträgt.

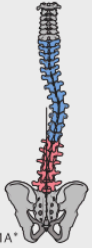
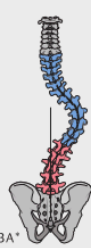
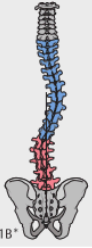
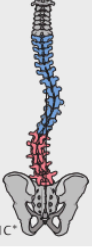
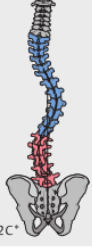
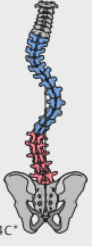
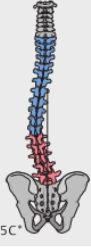
Der lumbale Modifier ist eine Unterklassifizierung der Lenke-Typen I-IV und bringt drei Typen (A, B, C) in Abhängigkeit der lumbalen Krümmungsform hervor.¹⁶

Hierbei orientiert man sich röntgenologisch an der Abweichung der lumbalen Pedikel aus der koronaren Ebene. Zur besseren Veranschaulichung stellt man sich ein Lot vom lumbalen Apex-Wirbel auf die zentrale sakrale Vertikallinie vor.

Ein Typ A liegt vor, wenn das Lot zwischen den Pedikeln des Apex-Wirbels liegt. Von einem Typ B spricht man, wenn die konkaven Pedikel des Scheitelwirbels das Lot schneiden und ein Typ C liegt vor, wenn das Lot medial der Pedikel verläuft, ohne den Apex-Wirbel zu schneiden.¹⁶

Zur Bestimmung des sagittalen Alignment-Modifiers wird der Kyphosewinkel der thorakalen Wirbelsäule zwischen BWK 5 und BWK 12 nach Cobb anhand einer sagittalen Röntgenaufnahme analysiert. Folgende Arten werden unterschieden:

- Kyphose < 10° = -
- Kyphose zwischen 10-40° = N
- Kyphose > 40° = +^{7,16}

Lumbaler Modifikator	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	Typ 6
A	 1A*	 2A*	 3A*	 4A*		
B	 1B*	 2B*	 3B*	 4B*		
C	 1C*	 2C*	 3C*	 4C*	 5C*	 6C*
mögliche sagittale strukturelle Kriterien	 normal	 PT Kyphose ≥ +20°	 TL Kyphose ≥ +20°	 PT + TL Kyphose ≥ +20°		

- : < 10°
 * Th5 – 12 sagittale Alignment Modifikatoren: -, N, oder + N. 10 – 40°
 + : < 40°

Abb. 5: Lenke-Klassifikation.¹⁶

2.7. Diagnostik der Skoliose

Die Diagnostik der Skoliose erfolgt zunächst durch die Anamnese und klinische Untersuchung des Patienten.

Dabei gibt es inspektorisch typische Auffälligkeiten, wie ein Schultertiefstand, Brust- und Taillenasymmetrie oder eine sichtbare laterale Krümmung der Wirbelsäule.²³ Dermatologische Läsionen wie Café au lait- Flecken oder subkutane Fibrome können dabei Hinweis auf eine Neurofibromatose sein.¹¹

Beim Vorbeugetest nach Adams, bei dem sich der Patient mit ausgestreckten Beinen nach vorne über beugt, können bei dorsaler Betrachtung, auf der konvexen Seite der Krümmung vorbestehende Rippenbuckel oder Lendenwulste deutlich stärker sichtbar werden.²³ Die axiale Rotation des Rumpfes kann mit Hilfe eines Inklinometers gemessen werden. Dabei geht eine axiale Rumpf-Rotation von < 7°, mit einer

Wahrscheinlichkeit von 95 %, mit einer Krümmung von $< 30^\circ$ in der radiologischen Auswertung einher.¹¹

Die schlussendliche Diagnose der Skoliose erfolgt durch ein Ganzwirbelsäulen-Röntgen (von HWK 7 bis zur Crista iliaca¹¹) im Stehen (a.-p. und sagittal) und der Bestimmung des Cobb-Winkels. Es sei anzumerken, dass eine p.-a. Röntgenaufnahme bevorzugt erstellt werden sollte, da dadurch eine 3-7-mal geringere Strahlenbelastung der Schilddrüse und des Brustgewebes erreicht werden kann.^{10,11}

Da die Cobb-Winkel Bestimmung einzig den Krümmungsgrad der Skoliose beschreibt und keine dreidimensionale Darstellung bietet, kann für die Ermittlung der Wirbelrotation die Methode nach Nash und Moe angewendet werden, die ebenfalls über das Röntgenbild erfolgt.^{10,24,25}

Für die Beurteilung der Skelettreife nach Risser ist es erforderlich, dass die Beckenkämme röntgenologisch miterfasst werden.^{7,23} Die Bestimmung des Risser-Stadiums ist im Hinblick auf die Progredienz der Skoliose und dem therapeutischen Vorgehen sehr wichtig. Je früher die Skoliose auftritt, umso höher ist das Risiko einer Progredienz.^{7,10} Bei juvenilen Skoliosen mit einem Krümmungswinkel von $> 20^\circ$ und starken Schmerzen empfiehlt sich eine Untersuchung mittels MRT, um eventuelle Spinalkanalanomalien ausschließen zu können.^{10,11}

Um nun das weitere therapeutische Vorgehen festlegen zu können, bietet sich eine Orientierung am Dresdener Skoliosepfad an, da nicht allein der Cobb-Winkel ausschlaggebend für die Therapie ist, sondern auch das Wachstumsalter, respektive die Wachstumsreserve.⁷

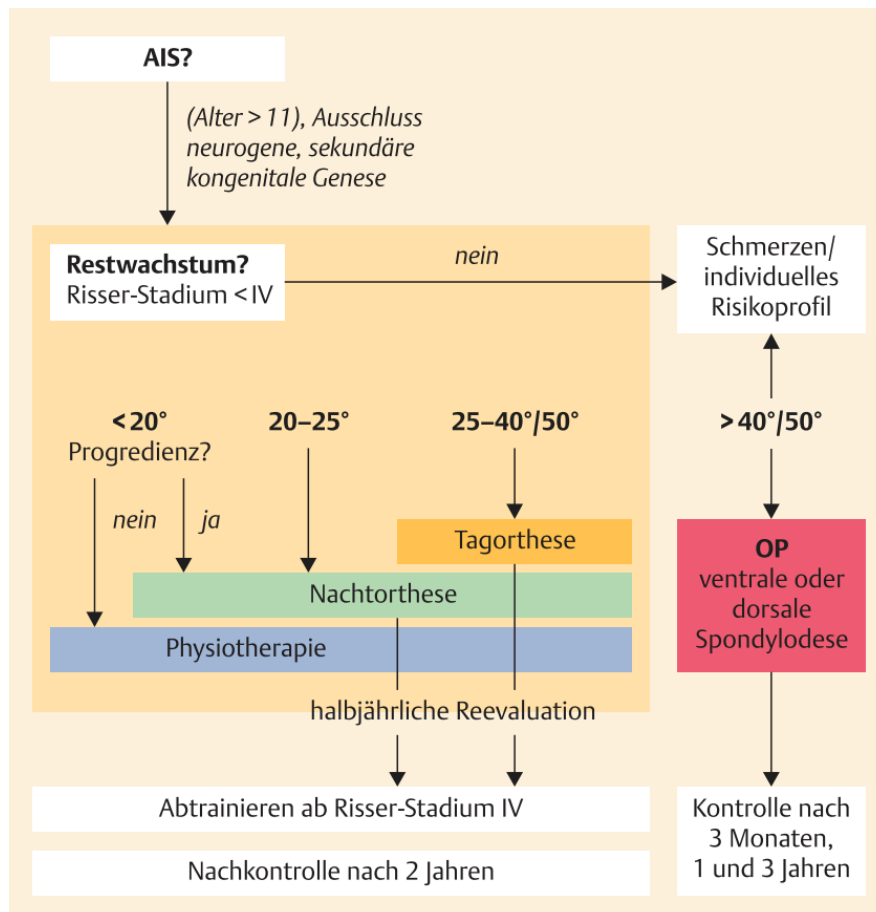


Abb. 6: Dresdener Skoliosepfad, Orientierung für das therapeutische Vorgehen.⁷

2.8. Prognose der idiopathischen Skoliose

Hinsichtlich der Prognose der Skolioseentwicklung, ist das Alter der Manifestation, das Geschlecht sowie die Lokalisation ganz entscheidend. Je früher eine Skoliose auftritt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit einer Progredienz.^{7,10} Bezüglich der Lokalisation, weisen doppelbogige und thorakale Krümmungen eine höhere Progredienz auf als thorako-lumbale oder isolierte lumbale Krümmungen.¹⁰

Für die idiopathischen Skoliosen mit einem frühen Manifestationsalter, ist die Bestimmung des Metha-Winkels von entscheidender prognostischer Bedeutung. Ist dieser Winkel $< 20^\circ$, so ist eine Progredienz sehr gering und eine spontane Remission zu etwa 80 % wahrscheinlich. Liegt der Metha-Winkel $> 20^\circ$, kann mit einem Fortschreiten der Skoliose in 85 % der Fälle gerechnet werden.¹⁰

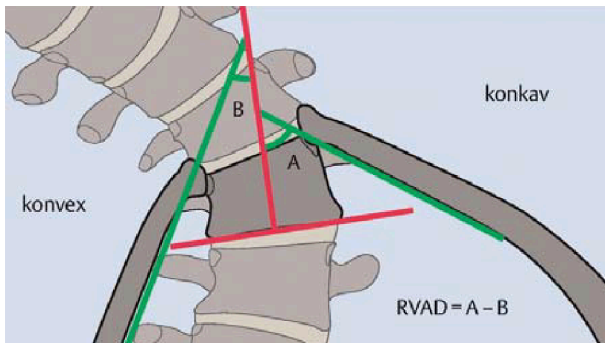


Abb. 7: Darstellung Metha-Winkel-Berechnung; RVAD (Rip Vertebral Angle Difference).¹⁰

Patienten mit einer idiopathischen Skoliose von 25°- 30°, bei denen das skelettale Wachstum noch nicht abgeschlossen ist, zeigen ein höheres Progressionsrisiko.¹¹

Ist das Wachstum bereits abgeschlossen und liegt ein Cobb-Winkel von < 30° vor, so besteht nur ein geringes Risiko für ein Voranschreiten der Skoliose im Erwachsenenalter.¹¹ Ist der Winkel jedoch > 50°, so kann mit einer Progression von 0,75- 1,0° pro Jahr im Laufe des Lebens gerechnet werden.¹¹

2.9. Therapie der idiopathischen Skoliose

Die Therapie der Skoliose richtet sich je nach Schweregrad, Wachstumsalter und Beschwerdebild.

Zu den Therapiezielen zählen:

- Verhinderung einer Skoliose - Progression
- Schmerzlinderung
- Erhalt der Lungenfunktion/ Prävention pulmonaler Restriktionen
- Verbesserung Lebensqualität
- Haltungsverbesserung

2.9.1. Konservative Therapie

Eine konservative Therapie ist vor allem meist bei den sehr früh auftretenden Skoliosen indiziert und beinhaltet die Komponenten Gipsredression, Korsetttherapie und Krankengymnastik. Während die ersten beiden Therapien altersabhängig sind, wird die Krankengymnastik in jedem Alter und unabhängig des Schweregrades der Krümmung begleitend empfohlen.

Eine Gipsredression (Casting) wird vor allem bei den infantilen Skoliosen angewendet und kann bis zu einem Alter von fünf Jahren erfolgen. Die Behandlung wird in Narkose auf einem Risser-Tisch durchgeführt. Dabei wird unter Traktion und mit sanftem seitlichem Druck versucht, die Wirbelsäule zu korrigieren.¹⁰ Die Behandlung erfolgt alle drei Monate, in denen die Gipse immer wieder angepasst werden.

Die Korsetttherapie (Bracing) wird für gewöhnlich bei älteren Kindern und bei Skoliosen mit einem Cobb-Winkel von $> 20^\circ$ und bis zu 50° - 60° vorgenommen. Die Therapie sollte ausschließlich in spezialisierten Zentren erfolgen, da eine Korsetttherapie ein nicht geringes Risiko für Thoraxdeformitäten und daraus folgenden kardio-pulmonalen Einschränkungen birgt.¹⁰ Die Therapie mittels Korsetts kann bei moderaten - höhergradigen Skoliosen oft die Progression vermindern und einen operativen Eingriff hinauszögern. Sollte trotz Korsetttherapie eine starke Zunahme der Krümmung stattfinden, so ist eine Operation indiziert.

2.9.2. Operative Therapie

Die Indikation für eine operative Therapie ist dann gegeben, wenn trotz konservativer Behandlungsmethoden eine rasche Progression der Skoliose auftritt oder aber der Krümmungswinkel bei $> 45^\circ$, bei einem noch nicht vollständig abgeschlossenen Wachstum, liegt.¹¹

Früher wurden meist langstreckige Spondylodesen (Wirbelsäulenversteifung/fusionierendes OP-Verfahren) durchgeführt. Dabei wurden proximal und distal der Neutralwirbel der Krümmung, Pedikelschrauben mit einer Halterungsvorrichtung für Titanstäbe (Harrington-Stäbe) durch Bohrung in den Wirbel angebracht. Anschließend wurden die Titanstäbe in die Halterungen drehend eingeführt, so dass es zu einer Distraction der Krümmung kam, jedoch ohne Rotationskorrektur.

Dieses Verfahren war in den 1960 Jahren wegweisend in der Skoliose-Therapie,¹⁰ beachtete aber das natürliche Wirbelsäulenwachstum zu wenig und führte nicht selten zu starken Einschränkungen der Lungenfunktion und des Lungenwachstums.¹⁰

Darüber hinaus konnte es gegebenenfalls zu Durchblutungsstörungen des Rückenmarks kommen.²⁶

Das operative Vorgehen bei Skoliose hat sich in den letzten Jahren gewandelt. Modernere Techniken achten vermehrt auf die Flexibilität von Thorax und Wirbelsäule, sowie auf das noch stattfindende Wirbelsäulenwachstum. Die verwendeten Implantationsmaterialien ermöglichen ein Mitwachsen und eine bessere Beweglichkeit (nicht-fusionierendes OP-Verfahren) der Wirbelsäule.

Operationsmethoden

Bezüglich der Operationsmethoden gibt es verschiedene Einteilungsmöglichkeiten, bei denen man zwischen fusionierenden und nicht-fusionierend Verfahren, CT-navigierten und nicht CT-navigierten OP-Verfahren unterscheiden kann. Des Weiteren können die Verfahren nach Zugangs-Lokalisation in dorsal, ventral oder einer Kombination beider Zugangsmöglichkeiten unterteilt werden.

Die Wahl des jeweiligen Verfahrens hängt zum einen vom Alter des Patienten und zum anderen von der Expertise des Operateurs ab.

Nicht- fusionierendes Operationsverfahren

Bei den infantilen und juvenilen Skoliosen empfiehlt es sich meist auf ein nicht-fusionierendes OP-Verfahren zurückzugreifen. Die hierbei verwendeten Implantationsmaterialien führen nicht zu einer Versteifung von Wirbelsäulensegmenten (Spondylodese), sondern ermöglichen noch ein kontinuierliches Wirbelsäulenwachstum. Beispielhaft seien hier die SMA-Klammern (Shape Memory Alloy) und die Growing-Rods genannt.

Die Verwendung von SMA-Klammern scheint verschiedentlich vorteilhaft zu sein, da sie nicht nur das Wachstum der Wirbelsäule und ihre natürliche Flexibilität ermöglicht, sondern auch ein minimal invasives Verfahren darstellt. Bei diesem werden die U-förmigen gekühlten Klammern von ventral auf der konvexen Seite der Krümmung zwischen Boden- und Deckplatte von benachbarten Wirbeln angebracht. Sind diese im Körper platziert, erwärmen sie sich auf Körpertemperatur und entfalten so ihre korrigierende Wirkung.¹⁰

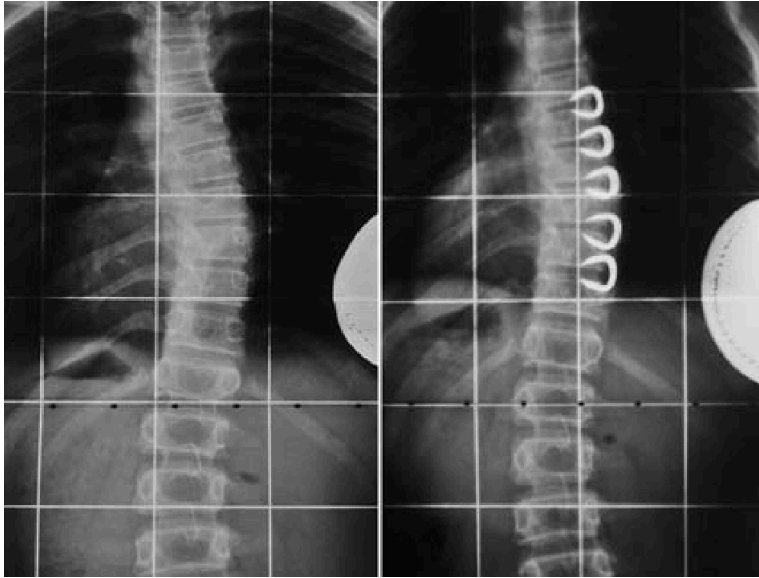


Abb. 8: Skoliose präoperativ und postoperativ versorgt mit SMA-Klammern (Shape Memory Alloy).¹⁰

Bei dem Verfahren der Growing-Rods/ Magnetically Controlled Growing Rods (MCGR) werden im Brust- und Lendenwirbelsäulenbereich Pedikelschrauben oder Haken fixiert. Anschließend werden subkutan zwei Stäbe eingeführt und an den Pedikelschrauben befestigt. Die Stäbe haben einen Teleskopmechanismus, wirken distrahierend und können postoperativ durch einen Magneten dem Wachstum angepasst werden. Dies macht weitere Operationen für den Patienten weitestgehend überflüssig.

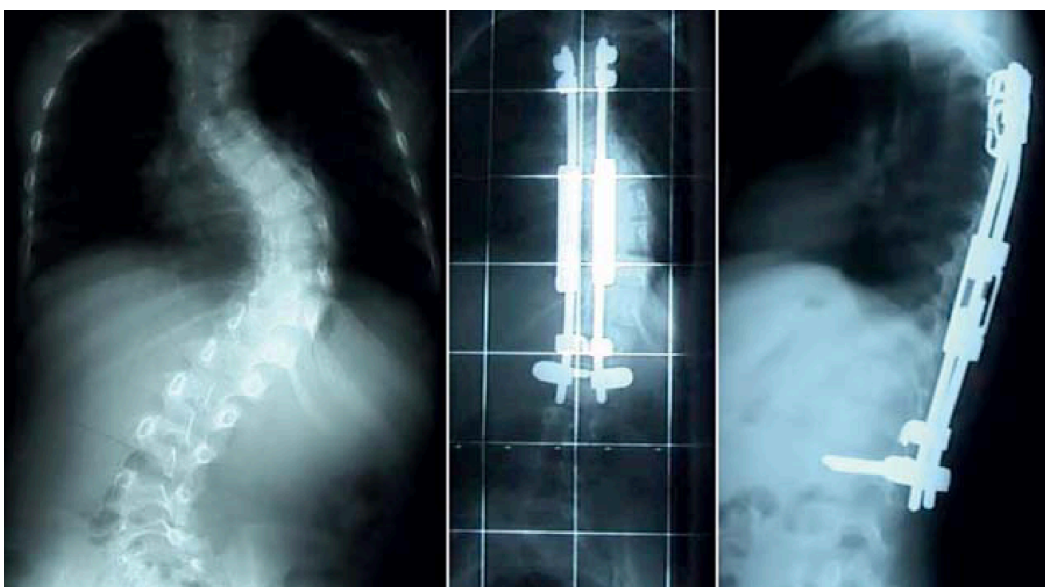


Abb. 9: Skoliose präoperativ; postoperativ versorgt mit Growing Rods; dorsale Ansicht und sagittale Ansicht.¹⁰

Fusionierende Operationsverfahren

Bei einem fusionierenden Operationsverfahren wird die Wirbelsäule über mehrere Segmente versteift (Spondylodese). Früher wurde es mit Hilfe des Harrington-Stab-Systems durchgeführt. Dabei wurden Haken proximal und distal der Krümmung an den jeweiligen Deck-/Bodenplatten der Wirbelkörper angebracht und mit Stahlstäben verbunden, die die Skoliose korrigierten. Diese Technik erzielte allerdings vornehmlich eine Aufrichtung der Wirbelsäule durch Distraction, bot aber kaum eine Rotationskorrektur.

Heutzutage werden modernere Schrauben-Stab-Systeme (Dual-Rod¹¹) verwendet, die sowohl distrahierend korrigieren als auch eine Rotationskorrektur ermöglichen.

Die fusionierenden Operationsverfahren werden meist von dorsal durchgeführt. Generell wohnt ihnen eine geringere Wirbelsäulenbeweglichkeit inne und mögliche pulmonale Restriktionen können auftreten.

Operative Zugangswege

Die Wahl des operativen Zugangs ist sehr variabel und liegt im Ermessen des Operateurs. Folgende Zugangswege können unterschieden werden:

- Dorsal
- Ventral
- Lateral
- Kombinierte Verfahren

CT- navigiertes Operationsverfahren

In den letzten zwei Jahrzehnten finden CT-navigierte Operationsverfahren zunehmend Einzug in die Wirbelsäulenchirurgie.²⁷ Grund dafür ist vor allem die dreidimensionale Darstellung von komplexen anatomischen Strukturen unter Berücksichtigung der intraoperativen Lage des Patienten. Dies ermöglicht eine präzisere Positionierung von Implantationsmaterial, wie z.B. Pedikelschrauben, wodurch das Risiko für Verletzungen des Spinalkanals, Nerven- und Gefäßschäden als auch das Risiko für eine Deviation des implantierten Materials reduziert werden kann.²⁷

Für das CT-navigierte Verfahren werden präoperativ detaillierte CT-Scans des Patienten angefertigt, digitalisiert und an das Navigationssystem übermittelt. Intraoperativ werden mit Hilfe eines mobilen CT-Gerätes (O-Arm) immer wieder neue CT-Scans erstellt und mit den präoperativen Datensätzen fusioniert. Die so entstehenden dreidimensionalen Bilder ermöglichen eine exakte Planung und Auswahl des zu implantierenden Materialdurchmessers und der Materiallänge.

Damit eine kontinuierliche Erfassung der Instrumentenposition möglich ist, arbeiten viele Navigationssysteme mit optoelektronischen Signalen.²⁸ Speziell reflektierende Marker werden sowohl an den zu navigierenden Instrumenten als auch am Patienten selbst angebracht (DRB, Dynamic Reference Base). Das von einer Kamera ausgesendete Infrarotlicht wird an diesen Markern reflektiert, erneut von der Kamera erfasst und dann als elektronisches Signal an das Navigationssystem übermittelt. Dieses errechnet dann die Position der Instrumente zur Patientenposition und visualisiert sie auf einem Bildschirm.²⁸

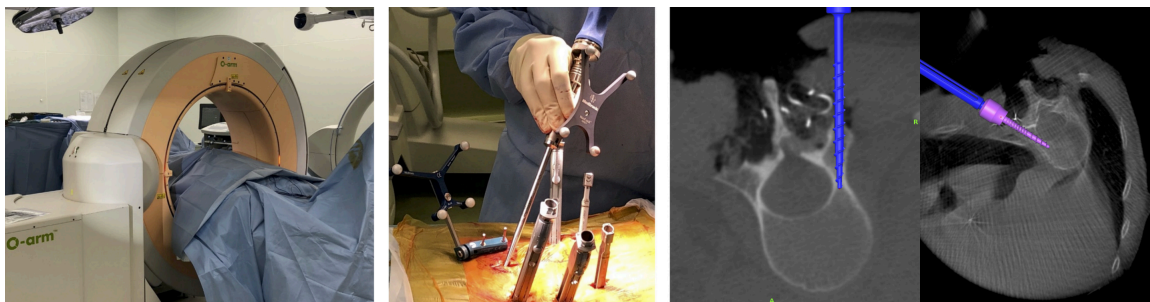


Abb. 10: Mobiles CT-Gerät: O-Arm (außen links); dorsales Einbringen von Pedikelschrauben (zweites Bild von links); Pedikelschraubenplatzierung unter CT-Navigation (erstes und zweites Bild von rechts).²⁷

Nicht CT- navigiertes Operationsverfahren

Bei dem nicht CT-navigierten Verfahren orientiert sich der Operateur an präoperativ angefertigten Röntgenbildern der Wirbelsäule. Anhand dieser wird die Implantationshöhe festgelegt und die Materialstärke ausgewählt. Intraoperativ entscheidet der Operateur rein visuell, wo er die Pedikelschrauben platziert. Der korrekte Winkel und die Tiefe der Einbringung werden sukzessive über intraoperative Röntgenbilder überprüft.

2.10. Fragestellungen und Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist eine retrospektive Untersuchung und ein Vergleich der Instrumentationstechniken für die operative Behandlung der idiopathischen Skoliose. Die primäre Fragestellung dieser Arbeit ist es, zu untersuchen, inwieweit sich die Computertomographie basierte Navigation, von der nicht navigierten Operationsmethode anhand diverser, im empirischen Teil dargestellten Variablen unterscheidet.

Insgesamt ergeben sich aufgrund der im theoretischen Teil dargestellten Daten sechs relevante Parameter, die es näher zu betrachten gilt.

Dazu sind folgende Hypothesen zu prüfen:

Hypothese 1: Das CT-gesteuerte Operationsverfahren ermöglicht eine präzisere Korrektur des Cobb-Winkels als das nicht CT-gesteuerte Verfahren.

Hypothese 2: Das CT-navigierte Operationsverfahren bietet eine Verkürzung der Operationszeit gegenüber einem nicht navigierten Operationsverfahren.

Hypothese 3: Das CT-navigierte Operationsverfahren ist komplikationsärmer hinsichtlich eines intraoperativen Blutverlustes als das nicht navigierte Operationsverfahren.

Hypothese 4: Das nicht CT-navigierte Operationsverfahren weist geringere Durchleuchtungszeiten auf als das navigierte OP-Verfahren.

Hypothese 5: Das nicht navigierte Operationsverfahren zieht mehr intensivpflichtige Patienten nach sich als das CT-navigierte Verfahren.

Hypothese 6: Das jeweilige Operationsverfahren hat einen Einfluss auf die stationäre Aufenthaltsdauer.

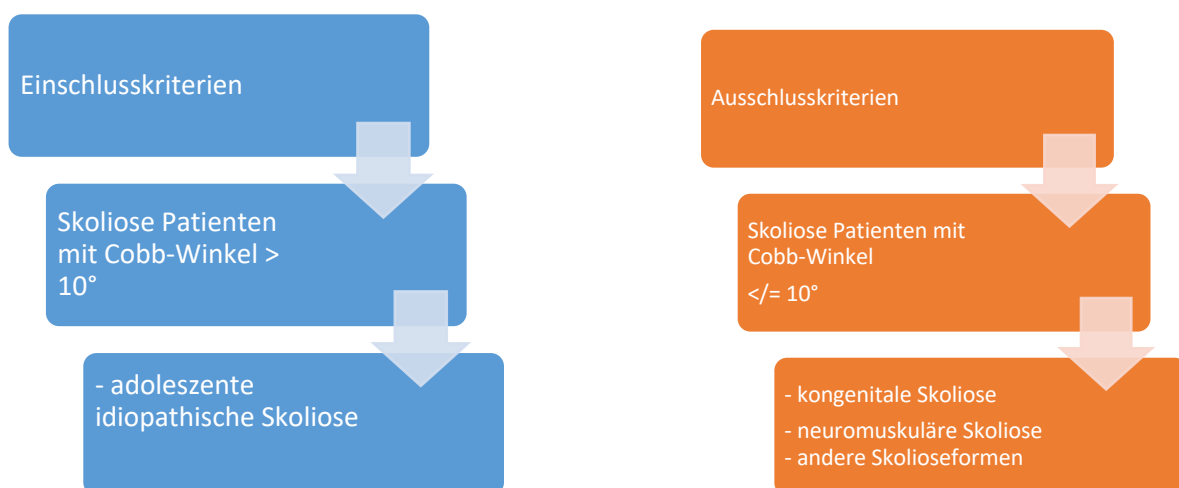
3. Material und Methoden

3.1. Arbeitsdesign und Patientenpool

Die vorliegende Arbeit ist eine retrospektive und röntgenologische Analyse von operativ versorgten Patienten mit idiopathischer Skoliose im Zeitraum der Jahre 2011 bis 2018. Die Operationen wurden in der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universität zu Köln (Prof. Dr. P. Eysel) durchgeführt.

Die Daten wurden über die elektronischen Akten seitens der Klinik zur näheren Analyse zur Verfügung gestellt, um detaillierte Informationen zu dem Vergleich der beiden, in der Routineversorgung praktizierten OP-Methoden (Computertomographie basierte Navigation und fluoroskopisch gestützte Instrumentation (nicht CT-navigiert)) zu gewinnen.

Die beiden Operationsmethoden wurden hinsichtlich der verschiedenen Parameter Alters- und Geschlechterverteilung, postoperative Cobb-Winkel-Korrektur, intraoperativer Blutverlust, Durchleuchtungszeit, postoperative Komplikationen, Intensivpflichtigkeit, sowie der stationären Aufenthaltsdauer verglichen. Die Auswahl für das jeweilige Operationsverfahren war zufällig und lag im Ermessen des Operateurs. Das analysierte Patientenkollektiv umfasst 71 Patienten im Alter von 11 bis 22 Jahren. Es beinhaltet 54 weibliche Patienten und 17 männliche Patienten. Das betrachtete Patientenkollektiv wies anamnestisch keine weiteren Begleiterkrankungen auf.



3.2. Methoden

3.2.1. Auswertung der Röntgenbilder und Cobb-Winkel-Bestimmung

Die Analyse der Daten erfolgte durch prä- und postoperative Cobb-Winkel-Messungen von digitalisierten Röntgenbildern mit Hilfe der Software IMPAX EE/R20XIX von AGFA HealthCare.

Für die Winkelmessungen wurden die Neutralwirbel der jeweiligen zu analysierenden Skoliosen anhand der digitalisierten Röntgenbilder visuell ermittelt. Anschließend wurden an die Deckplatte des proximalen Neutralwirbels und an die Bodenplatte des distalen Neutralwirbels manuell Referenzlinien angelegt. Hier wurde die Röntgenaufnahme der gesamten Wirbelsäule anterior-posterior verwendet. Für die weitere manuelle Winkelbestimmung hätte nun je eine vertikale Linie im 90° Winkel an die jeweiligen Referenzlinien eingezeichnet werden müssen. Dieser Schritt wurde in der vorliegenden Arbeit allerdings software-basiert vollzogen, so dass der entsprechende Winkel abgeleitet und dokumentiert werden konnte.

Zur Berechnung der Korrektur des Cobb-Winkels wurde die Differenz des prä- und postoperativen Wertes ermittelt.

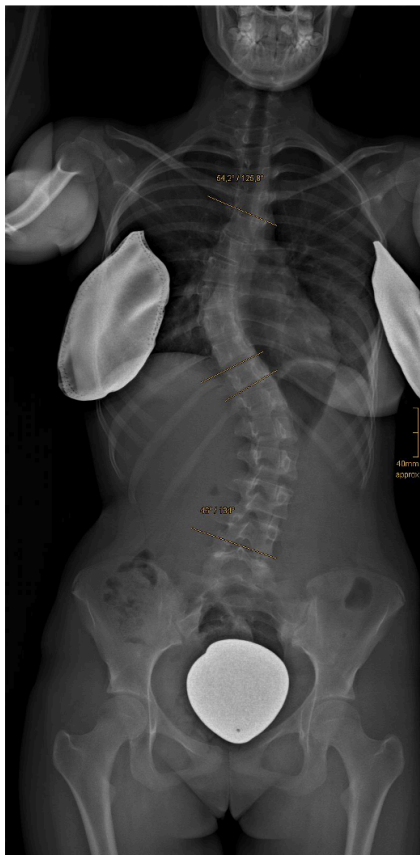


Abb. 11: Cobb-Winkel-Bestimmung einer doppelbogen thorako-lumbalen Skoliose. Quelle: Bildmaterial des analysierten Datensatzes der vorliegenden Studie.

3.2.2. Auswertung Patientendaten und operationsspezifischer Parameter

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Patientenkollektiv von 71 Probanden retrospektiv analysiert. Die zu ermittelnden Daten wurden anhand der Software ORBIS, Version 080436303.0010DACHL, zusammengetragen und hinsichtlich demographischer Merkmale, wie Alter und Geschlecht, sowie operationsspezifischer Parameter ausgewertet. Zu den erfassten Merkmalen gehörten:

- Operationsmethode: CT- navigiert/nicht CT- navigiert
- Alter der Patienten
- Geschlecht der Patienten
- Cobb-Winkel-Korrektur
- Intraoperativer Blutverlust
- Operationszeit
- Durchleuchtungszeit
- Postoperative Komplikationen
- Intensivpflichtigkeit
- Stationäre Aufenthaltsdauer

Um Zusammenhänge zwischen den Operationsverfahren und den einzelnen Parametern aufzudecken, wurden die erfassten Merkmale hinsichtlich des jeweiligen Operationsverfahrens dargestellt und analysiert. In Einzelfällen waren spezifische Parameter nicht verfügbar, weshalb die Anzahl der Patienten für statistische Tests minimal variieren kann.

3.2.3. Statistische Auswertung

Die deskriptive und analytische statistische Auswertung der Datensätze erfolgte anhand von Excel für Mac IOS Version 16.99.2 (25072714) und den online verfügbaren Statistikprogrammen von www.statskingdom.com¹, www.socscistatistics.com² und www.graphpad.com.³

Die Überprüfung der Stichproben auf Normalverteilung wurde mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests durchgeführt und ergab, dass die Stichproben überwiegend nicht normal verteilt waren. Folglich konnte nicht mittels des T-Tests auf signifikante Unterschiede geprüft werden, da dieser eine Normalverteilung der Stichproben erfordert.

Um eine einheitliche Methode zur Ermittlung signifikanter Mittelwertsunterschiede anzuwenden, wurde deswegen durchgehend der robustere Mann-Whitney-U-Test herangezogen.

Zur Überprüfung, ob signifikante Unterschiede hinsichtlich der Verteilung der nominalen Unterschiede vorlagen, wurde der Chi-Quadrat-Test verwendet, bei kleineren Stichproben der Fisher-Exakt-Test.

4. Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden sämtliche Parameter (Altersverteilung, Geschlechterverteilung, Cobb-Winkel-Korrektur, OP-Dauer, intraoperativer Blutverlust, Durchleuchtungszeit, postoperative Komplikationen, Intensivpflichtigkeit, stationäre Aufenthaltsdauer) hinsichtlich der beiden Operationsverfahren (CT-navigiert, nicht navigiert) analysiert, graphisch dargestellt und auf Unterschiede geprüft.

4.1. Statistische Auswertung

4.1.1. Altersverteilung

Das Patientenkollektiv umfasst 71 Patienten im Alter von 11 bis 22 Jahren. Für eine bessere Darstellung wurden diese in vier Altersspannen von je drei Jahren unterteilt. Dabei finden sich 34 Patienten in der Altersgruppe 14-16 Jahre und 26 Patienten in der Altersgruppe 17-19 Jahre. Auf die übrigen Altersgruppen entfallen 9 Patienten in die Kategorie 11-13 Jahre und die übrigen zwei in die Altersgruppe 20-22 Jahre.

Der Mittelwert des Alters beträgt 16 Jahre (SD: $\pm 2,15$ Jahre; Min: 11 Jahre; Max: 22 Jahre), ebenso der Median.

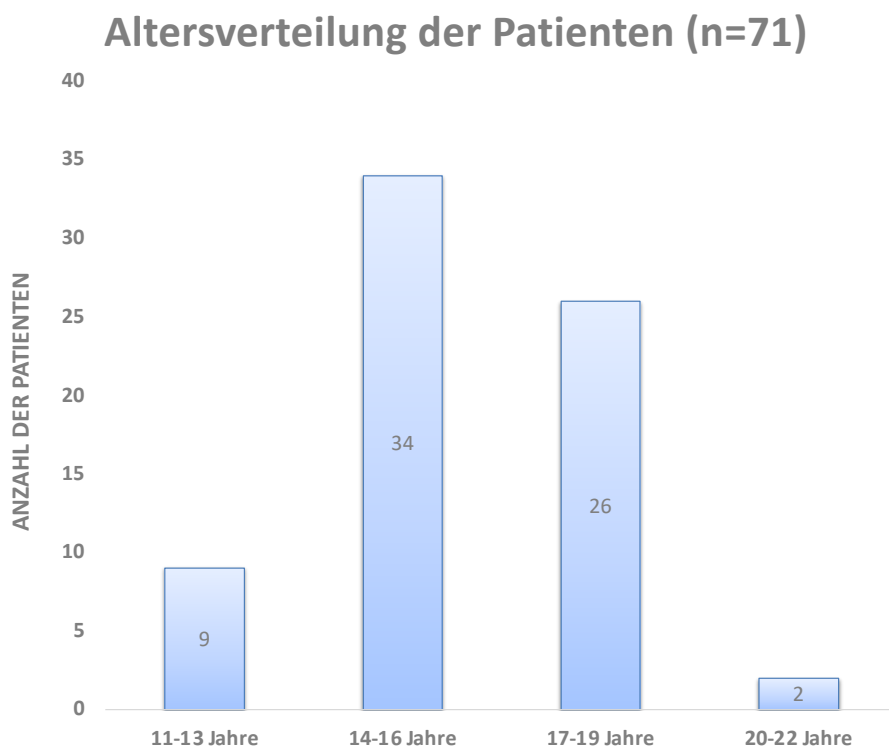


Abb. 12: Anzahl der Patienten (n = 71) in Abhängigkeit des Alters (11-22 Jahre), dargestellt in vier Gruppen mit einer Altersspanne von je drei Jahren.

Das Merkmal Alter wurde hinsichtlich des angewendeten Operationsverfahrens in die Gruppen CT-navigiert und nicht CT-navigiert unterteilt. Dabei umfasste die CT-navigierte Gruppe 37 Probanden, während in der nicht CT-navigierten Gruppe 34 Probanden vertreten waren.

Das durchschnittliche Alter in der CT-navigierten Gruppe betrug 15,8 Jahre (SD: $\pm 2,15$ Jahre; Min: 11 Jahre; Max: 22 Jahre). In der nicht CT-navigierten Gruppe lag das durchschnittliche Alter bei 15,9 Jahren (SD: $\pm 2,26$ Jahren; Min: 12 Jahre; Max: 21 Jahre).

Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied ($p = 0.94$) hinsichtlich der Häufigkeit des Einsatzes des CT-navigierten OP-Verfahrens bei jüngeren Patienten im Vergleich zu älteren.

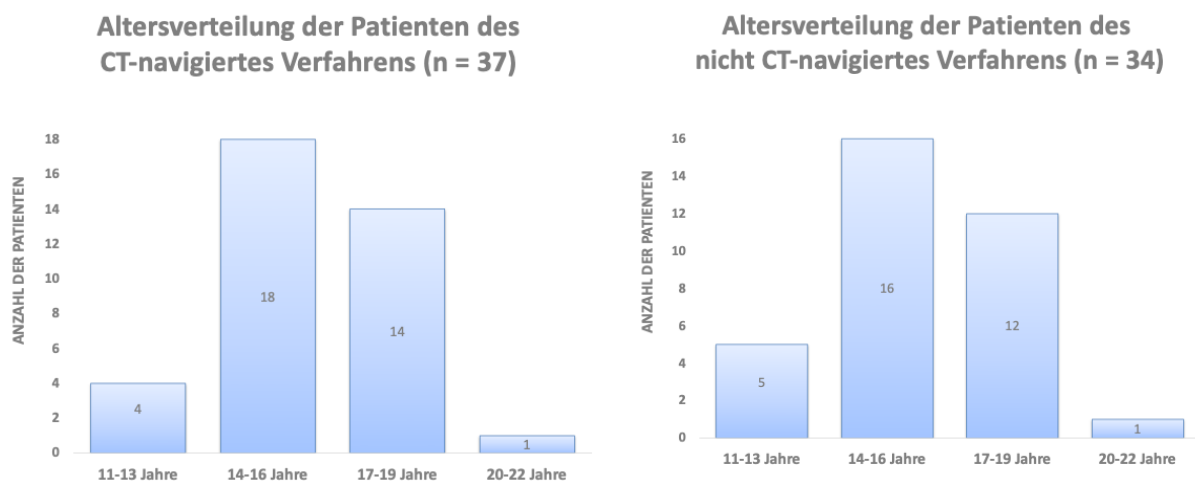


Abb. 13: Darstellung der Patientenanzahl in Abhängigkeit des Operationsverfahren und des Alters.

4.1.2. Geschlechterverteilung

Für die Darstellung der Geschlechterverteilung wurde zunächst die weibliche Population in ihrer Gesamtheit von $n = 54$ aufgeführt und dann je nach Operationsverfahren (Nav +: $n = 30$ / Nav -: $n = 24$) weiter differenziert.

Ebenso wurde mit der männlichen Population ($n = 17$) verfahren. Bei der Betrachtung der Geschlechterverteilung wird deutlich, dass der größere Anteil (76,1 %) bei der weiblichen Population liegt.

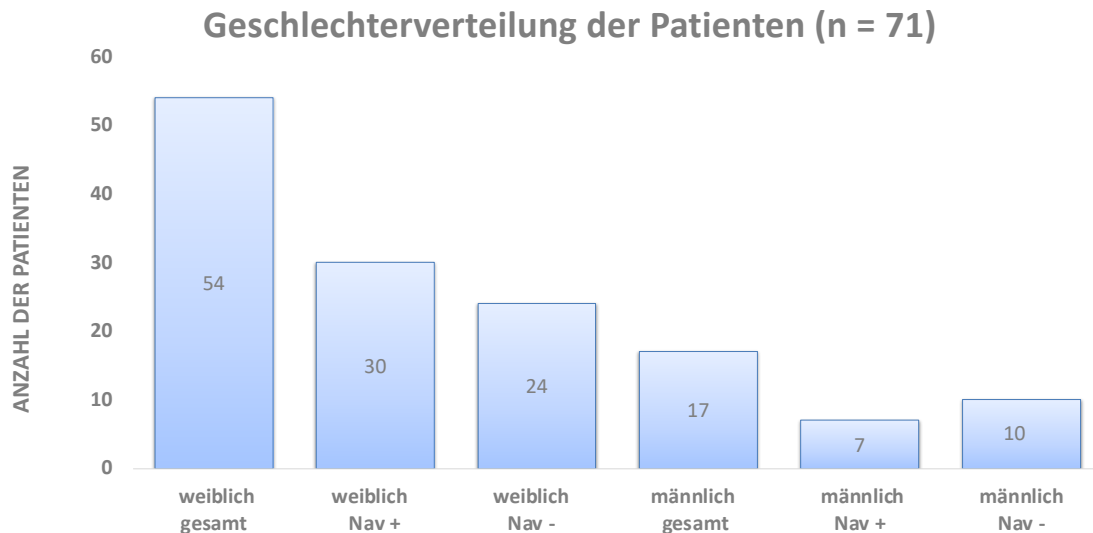


Abb. 14: Geschlechterverteilung von operativ behandelten Skoliose-Patienten, aufgeteilt in die Gruppen: weiblich gesamt und männlich gesamt. Beide Gruppen wurden des Weiteren nach Operationsverfahren (Nav +/ Nav -) differenziert.

Die nachfolgend dargestellte Kontingenztafel zeigt, dass von 54 weiblichen Probanden, 30 CT-navigiert operativ versorgt wurden und 24 Probanden nicht CT-navigiert operiert wurden. In der männlichen Population (n = 17), wurde bei sieben das CT-navigierte Operationsverfahren angewendet und zehn Patienten wurden nicht CT-navigiert operativ versorgt.

Bei einem p-Wert von 0.3, gab es keinen Hinweis darauf, dass ein Geschlecht bevorzugt mit einem bestimmten Operationsverfahren behandelt wurde.

Tab. 1: Darstellung der Geschlechterverteilung in Abhängigkeit des Operationsverfahrens (Nav +/Nav -). Es konnte kein statistischer Zusammenhang ($p = 0.3$) zwischen dem Geschlecht und der Wahl des Operationsverfahrens festgestellt werden.

	♀	♂	Σ
Nav +	30	7	37
Nav -	24	10	34
Σ	54	17	71

4.1.3. Cobb-Winkel-Korrektur

Zur Analyse der Cobb-Winkel-Korrektur wurden verschiedene Gruppen gebildet. Generell wurde in allen Gruppen zwischen einem CT-navigierten und einem nicht CT-navigierten Operationsverfahren unterschieden.

Da einige Patienten innerhalb eines operativen Eingriffes sowohl thorakal als auch lumbal korrigiert wurden, wurde der Eingriff nicht als eine einzelne Korrektur gewertet, sondern hinsichtlich der Lokalisation der Krümmung (thorakal/lumbal) als je ein Eingriff angesehen, wodurch sich eine Gesamtsumme von 113 Korrekturen ergibt.

Des Weiteren wurden thorakale und lumbale Korrekturen separat analysiert. Aufgrund der geringen Patientenzahl mit thorako-lumbalem Eingriff, wurden diese zwar in die Gesamtbetrachtung einbezogen, jedoch nicht separat dargestellt.

Der verfahrensspezifische Vergleich der Cobb-Winkel-Korrekturen von durchschnittlich 24,5° (SD: $\pm 10,67^\circ$; Min: 5°; Max: 56°) bei der CT-navigierten Methode und durchschnittlich 24,7° (SD: $\pm 12,31^\circ$; Min: 0°, Max: 59°) bei der nicht navigierten Operationsmethode, erwies sich als nicht signifikant unterschiedlich ($p = 0.85$).

Ebenso zeigte die lokalisationsfokussierte (thorakal/ lumbal) Auswertung keine signifikanten Unterschiede (thorakal $p = 0.58$; lumbal $p = 0.33$).

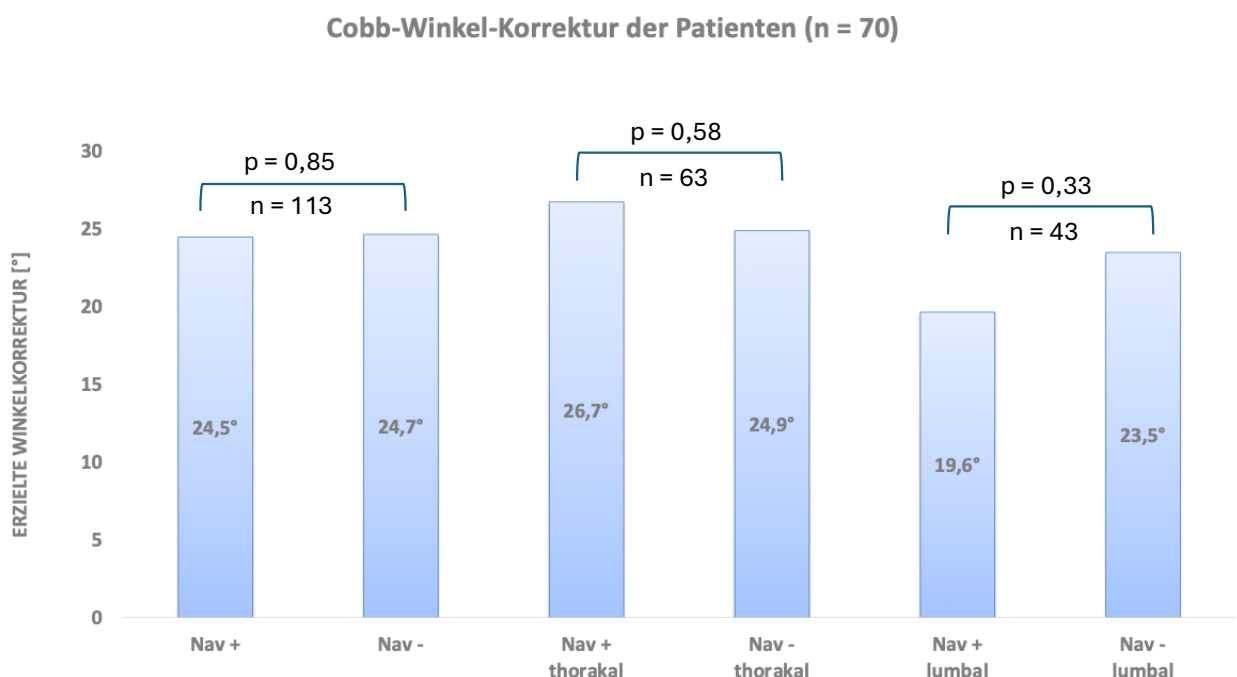


Abb. 15: Erzielte Winkelkorrektur [°] in Abhängigkeit des jeweiligen Operationsverfahrens (Nav +/Nav -).

4.1.4. OP-Dauer

Für die Darstellung der Operationszeiten wurden zwei Gruppierungen vorgenommen. Eine CT-navigierte Gruppe mit 37 Probanden und eine nicht CT-navigierte Gruppe, in welcher 34 Probanden vertreten waren. Die Operationszeit wurde dabei in Minuten angegeben.

Für die CT-navigierte Gruppe ergab sich ein Mittelwert von 230 Minuten (SD: $\pm 46,23$ min; Min: 144 min; Max: 355 min), wobei die nicht CT-navigierte Gruppe eine durchschnittliche Operationszeit von 175 Minuten (SD: $\pm 60,44$ min; Min: 99 min; Max: 329 min) aufwies. Die Ermittlung des Medians bestätigt diese zeitliche Diskrepanz mit 231 Minuten in der CT-navigierten Gruppe und 191 Minuten in der nicht CT-navigierten Gruppe. Bei der Prüfung auf Signifikanz mittels Mann-Whitney-U-Test, ergab sich ein p-Wert von 0.0006, was darauf hindeutet, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Operationsverfahren hinsichtlich der Operationsdauer gibt.

Vergleich der OP-Dauer (n = 71)

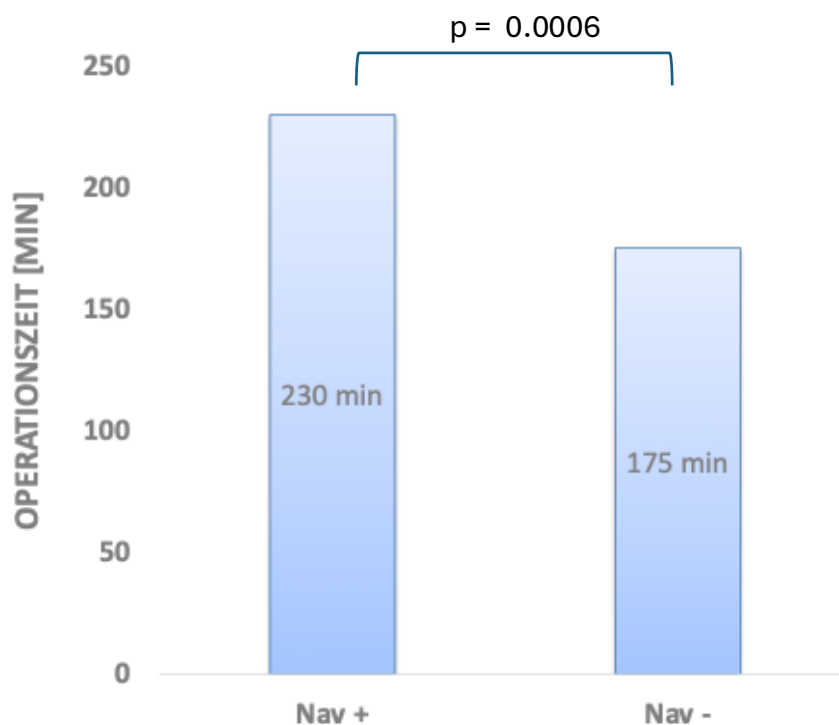


Abb. 16: Das navigierte OP-Verfahren nimmt signifikant mehr Zeit in Anspruch (230 min), als das nicht navigierte Verfahren (175 min).

4.1.5. Intraoperativer Blutverlust

In Abbildung 16 wurde der intraoperative Blutverlust in Abhängigkeit des jeweiligen angewandten OP-Verfahrens dargestellt. Dazu wurden vier Kategorien gebildet. Das navigierte OP-Verfahren (Nav +) mit den jeweiligen Unterkategorien Blutverlust bis 500 mL, Blutverlust von 501-1000 mL, Blutverlust von 1001-1500 mL und ein Blutverlust von > 1500 mL. Entsprechend wurde das nicht navigierte OP-Verfahren unterkategorisiert. Für eine bessere visuelle Vergleichbarkeit wurden die Patienten entsprechend der Operationsverfahren auf jeweils 100 % normiert.

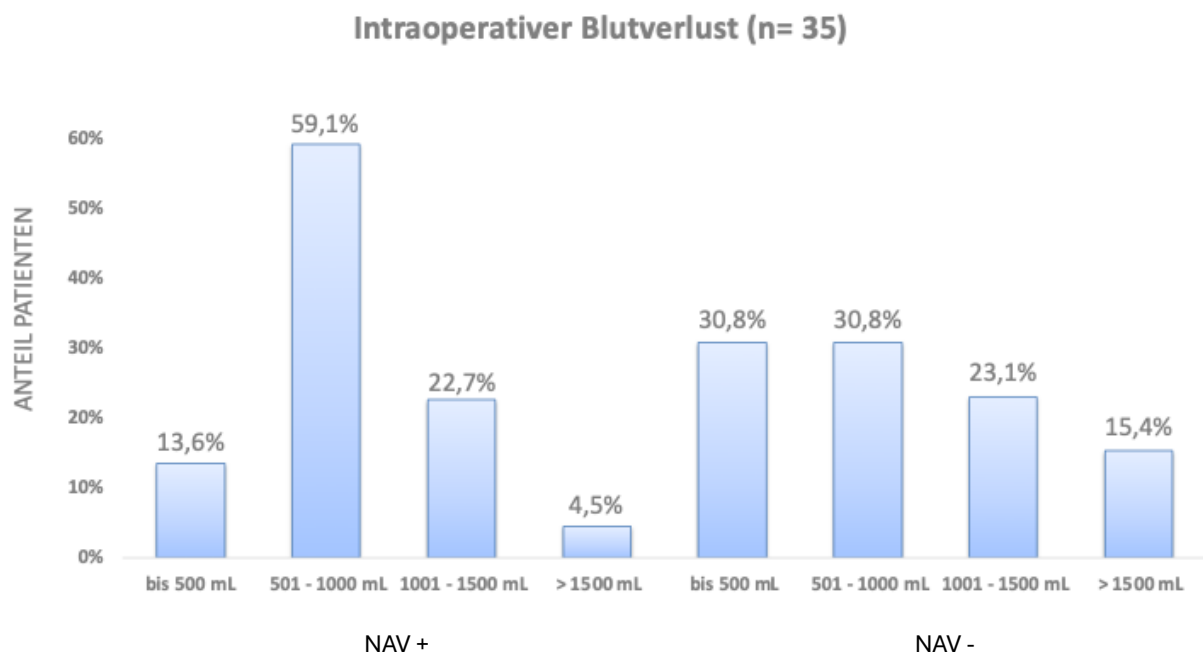


Abb. 17: Der Anteil der Patienten mit intraoperativem Blutverlust (BLV) ist unabhängig vom jeweiligen OP-Verfahren.

Tabelle 2 verdeutlicht, dass von 22 Probanden die CT-navigiert operiert wurden bei 3 Patienten (13,6 %) ein intraoperativer Blutverlust von bis zu 500 mL auftrat, 13 Probanden (59,1 %) einen intraoperativen Blutverlust von 501-1000 mL erlitten, fünf Patienten (22,7 %) einen intraoperativen Blutverlust von 1001-1500 mL aufwiesen und ein Patient einen intraoperativen Blutverlust von > 1500 mL erlitt.

Im Vergleich dazu wiesen von den 13 Probanden der nicht CT-navigierten Gruppe, vier Patienten (30,8 %) einen intraoperativen Blutverlust von bis zu 500 mL auf, vier Patienten (30,8 %) einen intraoperativen Blutverlust von 501-1000 mL, drei Patienten

(23,1 %) erlitten einen intraoperativen Blutverlust von 1001-1500 mL und zwei Patienten (15,4 %) wiesen einen intraoperativen Blutverlust von > 1500 mL auf.

Tab. 2: Verteilung des intraoperativen Blutverlustes (BVL) in Abhängigkeit des jeweiligen Operationsverfahrens (CT- navigiert = Nav + und nicht CT-navigiert = Nav -).

	Nav +				Nav -			
Blutverlust	bis 500 mL	501 - 1000 mL	1001 - 1500 mL	> 1500 mL	bis 500 mL	501 - 1000 mL	1001 - 1500 mL	> 1500 mL
Anteil der Patienten	13,6%	59,1%	22,7%	4,5%	30,8%	30,8%	23,1%	15,4%
Anzahl der Patienten	3	13	5	1	4	4	3	2

Vergleicht man den durchschnittlichen interoperativen Blutverlust der beiden OP-Verfahren, so lag dieser bei dem navigierten Verfahren bei durchschnittlich 850 mL, (SD: $\pm$ 341,57 mL; Min: 300 mL; Max: 1700 mL) im Gegensatz zu durchschnittlich 908 mL (SD: $\pm$ 597,51 mL; Min: 100 mL; Max: 2000mL) bei dem nicht navigierten Verfahren.

Der ermittelte p-Wert von 0.83 bestätigt, dass es keinen signifikanten Unterschied bezüglich des durchschnittlichen intraoperativen Blutverlustes zwischen den beiden Operationsverfahren gibt.

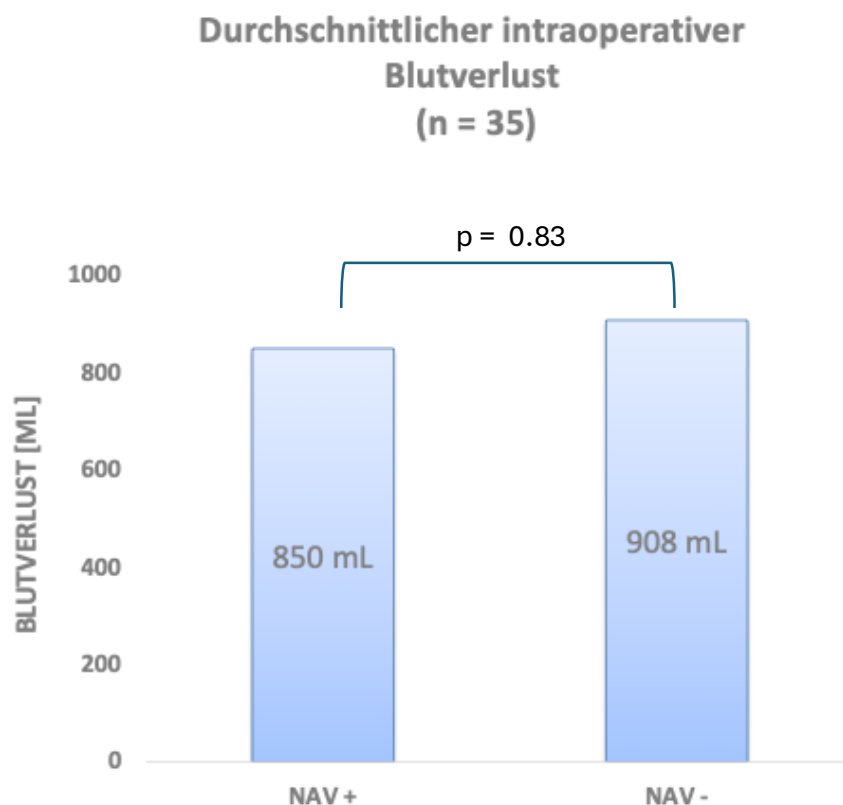


Abb. 18: Durchschnittlicher intraoperativer Blutverlust nach dem jeweiligen OP-Verfahren.

4.1.6. Durchleuchtungszeit

Für die Betrachtung der Durchleuchtungszeit [s] wurde ein Patientenkollektiv von $n = 46$ analysiert. Dabei fanden 30 Operationen CT-navigiert (Nav +) statt und 16 Patienten wurden nicht CT-navigiert (Nav -) operiert.

Die durchschnittliche Durchleuchtungszeit lag bei dem navigierten Verfahren bei 92 s (SD: $\pm 66,93$ s; Min: 0,28 s; Max: 251 s), wohin gegen die Durchleuchtungszeit des nicht navigierten Operationsverfahrens 52 s (SD: $\pm 70,12$ s; Min: 0,018 s; Max: 260 s) dauerte. Da bei den 30 navigierten Operationen einige größere zeitliche Ausreißer der Durchleuchtungszeit auftraten, wurde ebenfalls der Median von 82 s ermittelt. Die mediane Durchleuchtungszeit des nicht CT-navigierten Operationsverfahrens lag bei 52 s.

Der mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests ermittelte p-Wert lag bei $p = 0.002$ und gibt einen Hinweis auf einen statistisch signifikanten Unterschied im Hinblick auf die Durchleuchtungszeit der jeweiligen Operationsverfahren zu Gunsten des nicht navigierten OP-Verfahrens.

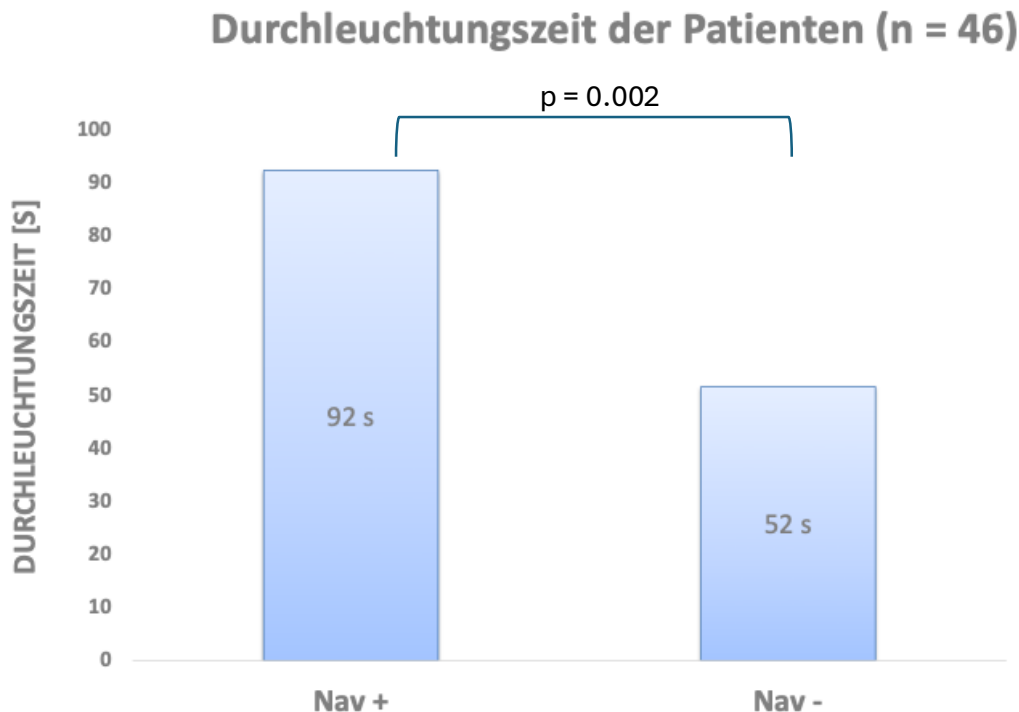


Abb. 19: Vergleichende Darstellung der Durchleuchtungszeit [s] der Patienten in Abhängigkeit des Operationsverfahrens (CT-navigiert = Nav +; $n = 30$; nicht CT-navigiert = Nav -; $n = 16$).

4.1.7. Intensivpflichtigkeit

Zur Analyse des Anteils der postoperativ intensivpflichtigen Patienten wurden die verschiedenen Operationsverfahren einzeln betrachtet. Es wurde differenziert nach intensivpflichtig bei CT-navigiertem Verfahren, intensivpflichtig bei nicht CT-navigierten Verfahren, sowie nicht intensivpflichtig bei CT-navigierten Verfahren und nicht intensivpflichtig bei nicht CT-navigiertem Operationsverfahren.

Dabei betrug der intensivpflichtige navigiert operierte Patientenanteil 73 %, der intensivpflichtige nicht-navigiert operierte Patientenanteil 32 %. Der Anteil der Patienten, die nicht intensivpflichtig wurden bei CT-navigierten Verfahren lag bei 27 %, wohingegen 68 % der Patienten mit nicht CT-navigierten Operationsverfahren nicht intensivpflichtig wurden.

Der p-Wert lag bei $p = 0.0006$, was darauf hindeutet, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den Verfahren und der Konsequenz einer intensivmedizinischen Betreuung, zu Gunsten des nicht navigierten Operationsverfahrens gibt.

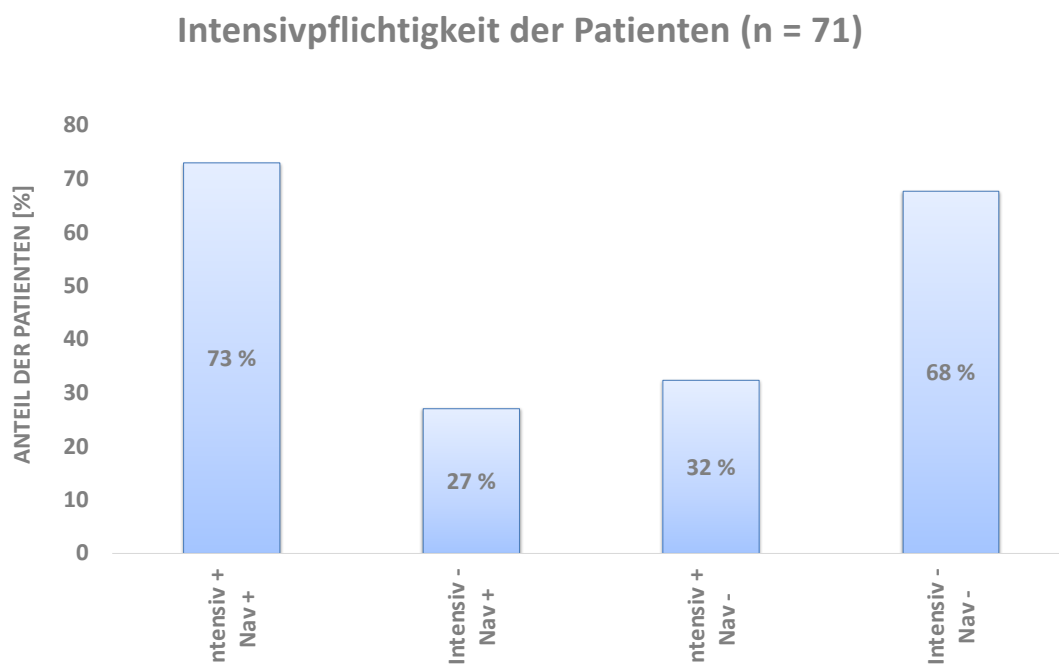


Abb. 20: Prozentualer Anteil der Patienten in Abhängigkeit von der Intensivpflichtigkeit (intensivpflichtig = intensiv +; nicht intensivpflichtig = intensiv -) differenziert nach dem jeweiligen Operationsverfahren.

Die folgende Kontingenztafel verdeutlicht, dass von 37 navigiert operierten Patienten 27 Patienten postoperativ intensivpflichtig und 10 Patienten postoperativ nicht intensivpflichtig wurden.

Im Gegensatz dazu wurden von den 34 nicht navigiert operierten Patienten 11 postoperativ intensivpflichtig und 23 Patienten konnten postoperativ auf die Normalstation verlegt werden.

Tab. 3: Intensivpflichtigkeit (ja = Int +, nein = Int -) in Abhängigkeit des angewendeten Operationsverfahrens (CT-navigiert = Nav +, nicht CT-navigiert = Nav -).

	Int +	Int -	Σ
Nav +	27	10	37
Nav -	11	23	34
Σ	38	33	71

4.1.8. Stationäre Aufenthaltsdauer

Für die vergleichende Betrachtung der stationären Aufenthaltsdauer wurden zwei Differenzierungen vorgenommen (CT-navigiert = Nav +, nicht CT-navigiert = Nav -).

Da es vereinzelt größere zeitliche Differenzen bei der stationären Aufenthaltsdauer gab, wurde zur Ermittlung des durchschnittlichen Verbleibs der Median herangezogen. Patienten, die mit Hilfe des CT-navigierten Verfahrens operiert wurden, hatten eine mediane stationäre Aufenthaltsdauer von 10 Tagen (SD: $\pm 2,31$ Tage; Min: 7 Tage; Max: 16 Tage), im Vergleich dazu, wiesen nicht CT-navigiert operierte Patienten eine mediane stationäre Aufenthaltsdauer von 13 (SD: $\pm 2,97$ Tage; Min: 4 Tage; Max: 19 Tage) Tagen auf. Die Ermittlung des p-Wertes anhand des Mann-Whitney-U-Tests, ergab $p = 0.0002$. Dieses Ergebnis ist hoch signifikant und weist einen möglichen Vorteil des CT-navigierten OP-Verfahrens in Bezug auf die stationäre Aufenthaltsdauer auf.

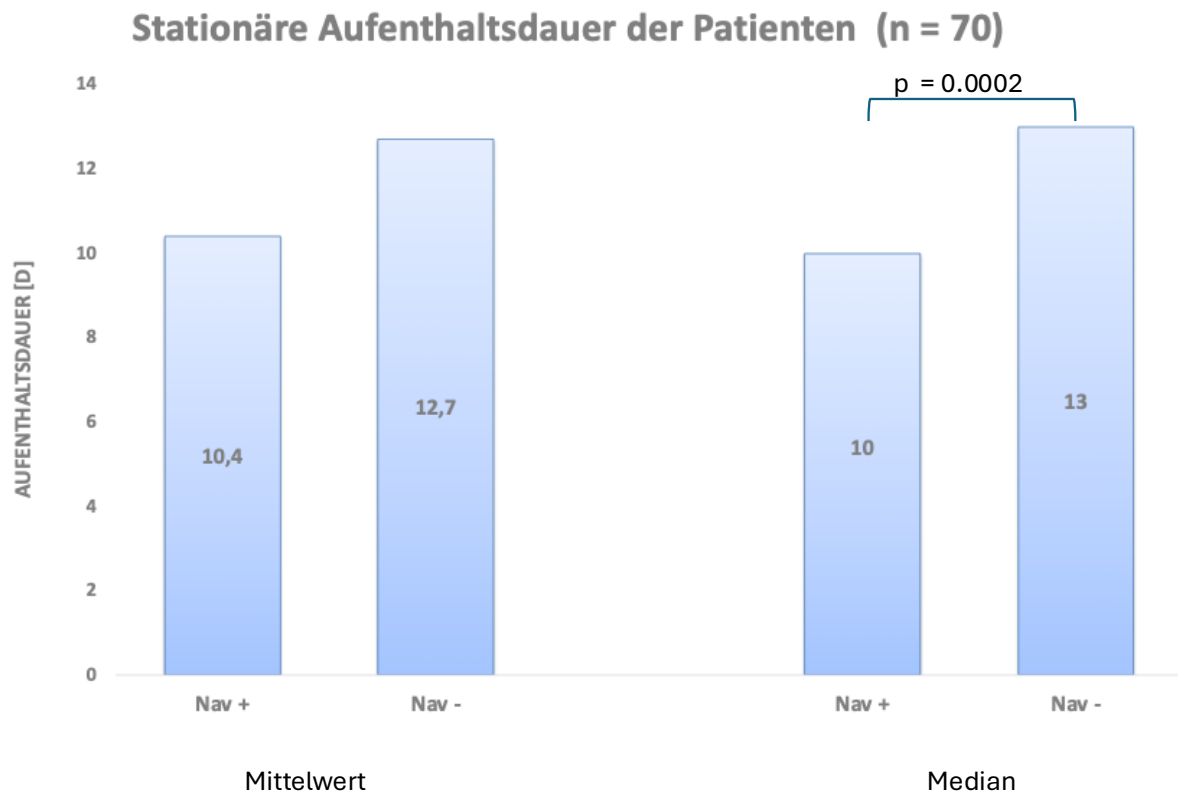


Abb. 21: Stationäre Aufenthaltsdauer [d] der Patienten unterschieden nach der jeweiligen Operationsmethode (CT-navigiert = Nav +, nicht CT-navigiert = Nav -). Dargestellt als Mittelwert und als Median.

Um diesen hochsignifikanten Unterschied näher zu beleuchten, wurde die stationäre Aufenthaltsdauer weiter untergliedert in die Zeitspannen 4-8 Tage, 9-13 Tage, 14-18 Tage und > 18 Tage.

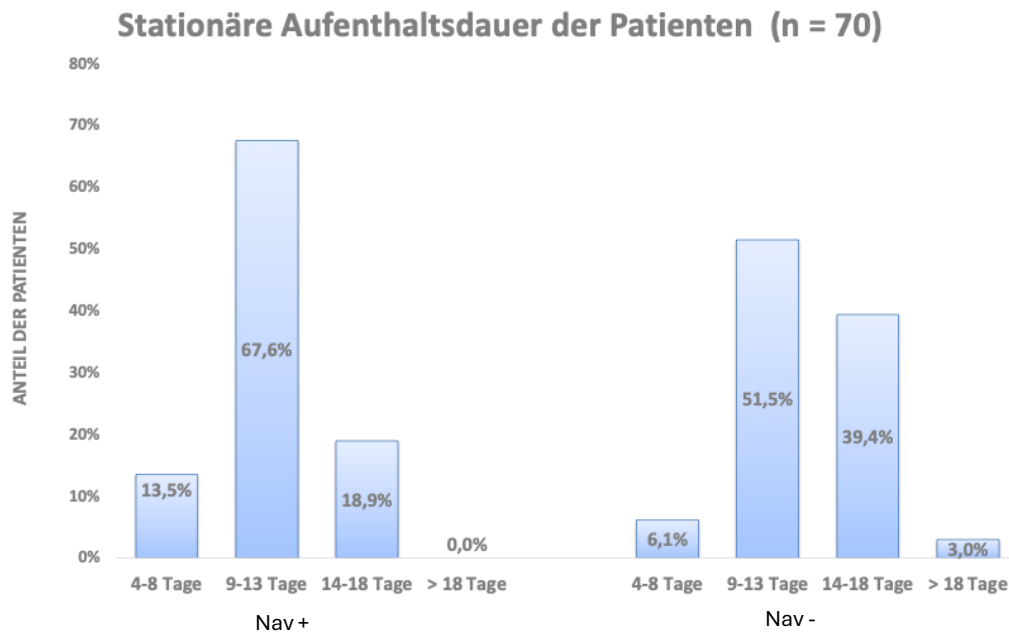


Abb. 22: Stationäre Aufenthaltsdauer [d] der Patienten unterschieden nach der jeweiligen Operationsmethode (CT-navigiert = Nav +, nicht CT-navigiert = Nav -).

Tab. 4: Verteilung der Patientenanzahl nach jeweiliger stationärer Aufenthaltsdauer in Tagen.

Nav +				Nav -			
4-8 Tage	9-13 Tage	14-18 Tage	19-23 Tage	4-8 Tage	9-13 Tage	14-18 Tage	19-23 Tage
5	25	7	0	2	17	13	1

Die generelle stationäre Aufenthaltsdauer scheint durchgehend leicht verkürzt zu sein, wenn navigiert operiert wurde. Besonders lange stationäre Verbleibe konnten nach navigierten OP-Verfahren gar nicht beobachtet werden.

4.2. Zusammenfassender Überblick der Ergebnisse

Zur besseren Veranschaulichung sind in der folgenden Tabelle die Ergebnisse der Signifikanzprüfung der in dieser Arbeit überprüften Daten dargestellt.

Tab. 5: Zusammenfassung der analysierten Parameter mit Angabe des p-Wertes, der Standardabweichungen, sowie des Minimums und Maximums.

Parameter	CT-navigiert	nicht CT-navigiert	p-Wert
Durchschnittliches Alter [a]	15,8 (± 2,15 / Min: 11 / Max: 22)	15,9 (± 2,26 / Min: 12 / Max: 21)	0.94
Geschlecht (w/m)	30 w / 7 m	24 w / 10 m	0.3
Durchschnittliche Cobb-Winkel-Korrektur [°]	24,5 (± 10,67 / Min: 5 / Max: 56)	24,7 (± 12,31 / Min: 0 / Max: 59)	0.85
Durchschnittliche OP-Dauer [min]	230 (± 46,23 / Min: 144 / Max: 355)	175 (± 60,44 / Min: 99 / Max: 329)	0.0006
Durchschnittliche Durchleuchtungszeit [s]	92 (± 66,93 / Min: 0,28 / Max: 251)	52 (± 70,12 / Min: 0,018 / Max: 260)	0.002
Durchschnittlicher intraoperativer Blutverlust [mL]	850 (± 341,57 / Min: 300 / Max: 1700)	908 (± 597,51 / Min: 100 / Max: 2000)	0.83
Anteil Intensivpflichtigkeit [%]	73	32	0.0006
Mediane stationäre Aufenthaltsdauer [d]	10 (± 2,31 / Min: 7 / Max: 16)	13 (± 2,97 / Min: 4 / Max: 19)	0.0002

5. Diskussion

5.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Noch vor ca. 20 Jahren wurde klassischerweise das fluoroskopisch assistierte Verfahren (nicht CT-navigiert) in der operativen Therapie der idiopathischen Skoliose angewandt. Seit den frühen 1990er Jahren²⁹ werden zunehmend auch CT-navigierte Operationen in der Wirbelsäulenchirurgie durchgeführt. Hintergrund für die CT-navigierte Operationstechnik ist die verbesserte Präzision der Pedikelschraubenimplantierung. So zeigten zwei Metaanalysen von Verma et al. (5992 Pedikelschraubenimplantierungen)³⁰ und Shin et al. (8539 Pedikelschraubenimplantierungen) eine präzisere Platzierung der Pedikelschrauben (Nav +: 93,3 % vs. Nav -: 84,7 %³⁰ bzw. Nav +: 94 % vs. Nav -: 85 %)³¹ durch den zusätzlichen Einsatz des computertomographischen Verfahrens.

Weitere untersuchte Faktoren, wie neurologische Komplikationen, Fusionsrate, sowie die Reduktion von Schmerzen, wiesen dabei keine Unterschiede zwischen den beiden Operationsverfahren auf.³⁰

Die vorliegende retrospektive Studie beleuchtet weitere Parameter, wie Alters- und Geschlechterverteilung, postoperative Cobb-Winkel-Korrektur, intraoperativen Blutverlust, Durchleuchtungszeit, postoperative Komplikationen, Intensivpflichtigkeit, sowie die stationäre Aufenthaltsdauer.

Diese Parameter, wurden im Hinblick auf die beiden Operationsmethoden (CT-navigiert, nicht-CT-navigiert) der idiopathischen Skoliose vergleichend analysiert. Interessanterweise finden diese Parameter in der bestehenden Literatur bislang teilweise wenig Beachtung, sie sind jedoch im Hinblick auf eine umfassende Bewertung der beiden Operationsmethoden wichtige Kriterien.

Zusammenfassend lässt sich Folgendes feststellen:

Die betrachtete Korrektur der Krümmung erwies sich in dieser Studie als nicht signifikant unterschiedlich ($p = 0.85$), was darauf hindeutet, dass keines der beiden Verfahren einen Vorteil hinsichtlich der Krümmungskorrektur bietet. Ebenfalls stellte sich der intraoperative Blutverlust ($p = 0.83$) als nicht signifikant unterschiedlich heraus.

Hingegen gab es signifikante Unterschiede zwischen den beiden Operationsmethoden bezüglich der OP-Dauer ($p = 0.03$), der intraoperativen Durchleuchtungszeit ($p = 0.002$) und der postoperativen Intensivpflichtigkeit ($p = 0.0006$). Die Operationen

mit CT-navigiertem Verfahren beanspruchten insgesamt mehr Zeit als die nicht CT-navigierten Eingriffe.

Darüber hinaus wies die CT-navigierte Methode eine vermehrte Intensivpflichtigkeit auf. Als hochsignifikant unterschiedlich ($p < 0.0006$) stellte sich die stationäre Aufenthaltsdauer zu Gunsten des CT-navigierten Verfahrens dar.

Die postoperative Komplikationsrate lag bei 0,71%.

Im Folgenden werden die Parameter Altersverteilung, Geschlechterverteilung, Cobb-Winkel-Korrektur, Durchleuchtungszeit, intraoperativer Blutverlust, postoperative Komplikationen, Intensivpflichtigkeit sowie die stationäre Aufenthaltsdauer näher diskutiert.

Altersverteilung

Die Altersverteilung der 71 analysierten Patienten lag zwischen 11 – 22 Jahren, wobei die Patienten der navigiert operierten Gruppe durchschnittlich $15,8 \text{ Jahre} \pm 2,15 \text{ Jahre}$ alt waren. Das durchschnittliche Alter, der nicht navigiert operierten Gruppe lag bei $15,9 \text{ Jahre} \pm 2,26 \text{ Jahre}$.

Diese Altersverteilung wird auch durch die bestehende Literatur bestätigt. Das analysierte Patientenkollektiv der Studie von Chang et al. befand sich in der Altersspanne von 12-28 Jahren und wies ein durchschnittliches Operationsalter von 16,67 Jahren auf.³²

In diesem Alter ist das Knochenwachstum meist vollständig abgeschlossen, so dass die chirurgische Korrektur der idiopathischen Skoliose vornehmlich zu diesem Zeitpunkt durchgeführt wird.

Dies ist besonders für das fusionierende Verfahren (Spondylodese) relevant, da es postoperativ kein weiteres Wachstum der Wirbelsäule erlaubt. Insofern bestätigt das analysierte Patientenkollektiv das Alter, in dem Operationen der idiopathischen Skoliose meist durchgeführt werden. Dies untermauert, dass in dieser Arbeit ein repräsentatives Patientenkollektiv analysiert wurde.

Geschlechterverteilung

Bei der Betrachtung der Geschlechterverteilung wird deutlich, dass der größere Anteil (76,1 %) bei der weiblichen Population liegt, welches die epidemiologische Prävalenz der Skoliose widerspiegelt.⁹

Die Studie von Chang et al. mit 55 Probanden konnte eine ähnliche Geschlechterverteilung ($w = 78,2 \%$) beobachten.³²

Auch bezüglich dieser Variable zeigt sich, dass in der vorliegenden Arbeit ein repräsentatives Patientenkollektiv untersucht wurde.

Cobb-Winkel-Korrektur

Ein zentraler Aspekt der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der postoperativen Cobb-Winkel-Korrektur bei den unterschiedlichen Operationsverfahren (CT-navigiert, nicht CT-navigiert).

Dieser Aspekt wurde in der bestehenden Literatur höchst selten betrachtet³², da die meisten Untersuchungen den Fokus auf die Präzision der Pedikelschraubenimplantierung legen.

Bei der vergleichenden Analyse der Cobb-Winkel-Korrektur zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen der CT-navigierten und der nicht navigierten Operationsmethode. Die postoperative Cobb-Winkel-Korrektur des navigierten OP-Verfahrens lag durchschnittlich bei $24,5^\circ \pm 10,67^\circ$. Dieses Ergebnis wird auch durch die bestehende Literatur untermauert. So wies die Studie von Chang et al. postoperative Cobb-Winkel-Korrekturen von $23,47^\circ \pm 8,02^\circ$ auf.³²

Ein möglicher Erklärungsansatz für den nicht signifikanten Unterschied der beiden OP-Verfahren könnte darin bestehen, dass die Verwendung von Pedikelschrauben generell eine stabile Korrektur der Krümmung bietet und dies verfahrensunabhängig. So konnten Kim et al. zeigen, dass die Implantierung von Pedikelschrauben zu einer signifikant größeren Krümmungskorrektur führt, verglichen zu der Verwendung von Laminahaken (durchschnittliche Korrektur der Hauptkrümmung bei Verwendung von Pedikelschrauben: 76% vs. durchschnittliche Korrektur der Hauptkrümmung bei Verwendung von Laminahaken: 50 %; $p < 0.001$).³³

Die in Hypothese 1 formulierte Annahme, dass das CT-gesteuerte Operationsverfahren eine präzisere Korrektur des Cobb-Winkels ermöglicht als das nicht CT-gesteuerte Verfahren, wurde somit falsifiziert.

Operationsdauer

Die Operationsdauer zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Operationsmethoden zugunsten des nicht-CT-navigierten Verfahrens mit einer durchschnittlichen Differenz von 40 Minuten und im Median einer Differenz von 55 Minuten, bei einer durchschnittlichen Gesamt-OP-Dauer von $3,85 \text{ h} \pm 0,77 \text{ h}$ (Nav +) vs. $3,18 \text{ h} \pm 1,01 \text{ h}$ (Nav -). Diese Ergebnisse werden auch durch die aktuelle Literatur gestützt.

So zeigte die Studie von Chan et al.³⁴ mit 22.384 Patienten, dass die Operationszeit, der nicht navigierten Methode durchschnittlich 40 Minuten kürzer war ($4,6 \text{ h}$) als die des navigierten Verfahrens ($5,0 \text{ h}$).³⁴ Andere Studien geben zeitliche Differenzen zwischen den Verfahren von 24 - 40 Minuten an.^{32,35-37}

Verschiedene Einflussfaktoren könnten hierbei eine Rolle spielen. Der Einsatz eines Navigationssystem erfordert eine präzise Koordinierung, da das CT-Gerät immer wieder zum Operationsfeld hin- und weg bewegt werden muss. Ein essenzieller Faktor ist hierbei ein fundiert eingearbeitetes Team. Ohne diese Kompetenz kann die Effizienz des Arbeitsablaufes beeinträchtigt werden, so dass es zu Verzögerungen kommt und die OP-Dauer dadurch verlängert wird. Es sei angemerkt, dass die Operationszeit des navigierten Verfahrens zwar insgesamt länger dauert, verschiedene Studien berichten jedoch eine schnellere Pedikelschraubenplatzierung, im Vergleich zu dem nicht navigierten Verfahren.^{34,37,38}

Des Weiteren stellt die intraoperative Überprüfung der Instrumentenposition einen zusätzlichen zeitlichen Einflussfaktor dar, ebenso die Schwere des zu korrigierenden Cobb-Winkels und die Komplexität der Skoliose. Diese Aspekte wurden in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher untersucht.

Die retrospektive Kohortenstudie von Griesse et al. zeigte eine schnellere Operationszeit beim navigierten Verfahren, im Vergleich zu dem nicht navigierten Verfahren ($119,7 \pm 48,7 \text{ min}$ vs. $154,0 \pm 81,0 \text{ min}$; $p = 0,004$).³⁹

Die in dieser Arbeit aufgestellte Hypothese 2, dass das CT-navigierte Operationsverfahren eine Verkürzung der Operationszeit gegenüber einem nicht navigierten Operationsverfahren bietet, konnte nicht bestätigt werden und gilt somit als falsifiziert.

Intraoperativer Blutverlust

Bei Skoliose-Operationen kann es unter Umständen zu größeren Blutverlusten kommen. Bluttransfusionsraten bei derartigen Eingriffen werden zwischen 15 - 27 % angegeben.³⁴ Im Vergleich der beiden Operationsverfahren zeigte sich tendenziell ein geringerer intraoperativer Blutverlust (BLV) bei der CT-navigierten Methode (Nav +: durchschnittlich 850 mL BLV $\pm$ 341,57 mL vs. Nav -: durchschnittlich 908 mL $\pm$ 597,51 mL BLV, jedoch erwies sich dieser Unterschied nicht als statistisch signifikant ($p = 0.83$).

Die Studie von Chang et al. mit einem Patientenkollektiv von 55 ausschließlich navigiert operierten Patienten ermittelte einen intraoperativen Blutverlust von 509,46 mL $\pm$ 302,61 mL.³² Diese Ergebnisse korrelieren mit dem ermittelten intraoperativen Blutverlust in der vorliegenden Studie.

Die bestehende Literatur ist diesbezüglich jedoch nicht einheitlich, so zeigte eine Metaanalyse von Meng et al. einen signifikanten Unterschied des intraoperativen Blutverlustes ($p < 0.01$) zu Gunsten des navigierten Verfahrens.³⁷

Diese Daten scheinen im Widerspruch zu den Daten der hier untersuchten Studie zu stehen. Erklärungsansätze hierfür könnten sein, dass die vorliegende Studie bezüglich des Blutverlustes lediglich ein Patientenkollektiv von $n = 35$ analysiert, während Meng et al. ein Patientenkollektiv von 1723 Patienten zugrunde lag, was die Wahrscheinlichkeit tatsächlich bestehende Unterschiede zu erkennen erhöht.

Bislang ist noch nicht klar, warum das CT-navigierte Verfahren mit einem geringeren Blutverlust einhergeht. Es wird vermutet, dass für die Pedikelschraubenimplantierung weniger Gewebe durchtrennt werden muss und es so zu geringeren Blutungen kommt.³⁴

Die retrospektive Kohortenstudie von Singh et al. mit 28.868 Probanden zeigte hingegen, dass das navigierte OP-Verfahren (posteriorer Zugang wurde gewählt) mit höheren Raten von operativen Komplikationen, darunter auch der intraoperative Blutverlust, einherging.⁴⁰

In Bezug auf die vorliegende Arbeit konnte Hypothese 3, dass das CT-navigierte Operationsverfahren komplikationsärmer hinsichtlich des intraoperativen Blutverlustes ist, im Vergleich zum nicht navigierten Operationsverfahren, nicht bestätigt werden.

Durchleuchtungszeit

Bei der Analyse der Durchleuchtungszeit zeigte die vorliegende Studie signifikante Unterschiede zwischen den beiden OP-Verfahren ($p = 0.002$) zu Gunsten des nicht navigierten OP-Verfahrens.

Die durchschnittliche Durchleuchtungsdauer während des navigierten Verfahrens lag bei $92 \text{ s} \pm 66,93 \text{ s}$ vs. $52 \text{ s} \pm 70,12 \text{ s}$ bei dem nicht navigierten Verfahren. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei beiden Methoden intraoperativ immer wieder die Implantat-Lage überprüft werden muss und es somit zu keinen großen Differenzen in der Gesamt-Durchleuchtungszeit kommt.

Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu Griesse et al.³⁹, welche Unterschiede in den Durchleuchtungszeiten zu Gunsten der navigierten Methode feststellen (Nav -: $223,6 \pm 93,6 \text{ s}$ vs. Nav +: $92,3 \pm 39,7 \text{ s}$) konnten.³⁹

Die formulierte Hypothese 4, dass das nicht CT-navigierte Operationsverfahren geringere Durchleuchtungszeiten aufweist als das navigierte OP-Verfahren, konnte nicht bestätigt werden.

Es ist zu berücksichtigen, dass sowohl der Patient als auch das Operationsteam, je nach Operationsverfahren einer höheren Strahlendosis ausgesetzt sind.

So konnten Bratschitsch et al. zeigen, dass bei der Verwendung eines O-Arms (CT-Navigation) der Patient mit einer signifikant höheren Strahlendosis konfrontiert wird, im Vergleich zum fluoroskopischen Verfahren (Navigation: $43.2 \pm 19.4 \text{ mSv}$, vs. Fluoroskopie: $27.7 \pm 31.3 \text{ mSv}$; $p = 0.02$).⁴¹

Hinsichtlich des Operationsteams verhält es sich genau andersherum. Da das Team den Operationssaal während der Aufnahmen beim computertomographisch navigierten Verfahren verlässt, liegt somit auch keine Strahlenexposition vor.

Während der fluoroskopischen Aufnahmen hingegen, verbleibt das Operationsteam im Operationssaal, wodurch es folglich auch zu einer Strahlenexposition kommt.⁴¹

Postoperative Komplikationen

Die operative spinale Fusion bei der AIS stellt ein effektives und sicheres Verfahren zur Krümmungskorrektur dar.⁴² Die Häufigkeit von postoperativen Komplikationen wird zwischen 5 - 15 % angegeben.^{42,43}

Mögliche Risikofaktoren können laut Tang et al. unter anderem schwere chronisch obstruktive pulmonale Erkrankungen, Rauchen, mehr als zwei Punkte in der American Society of Anesthesiologists Klasse (ASA), Steroideinnahme bei chronischen Erkrankungen, sowie die Operationsdauer sein.⁴³

In der vorliegenden Arbeit kam es im Rahmen eines Harnwegsinfektes zu einer postoperativen Komplikation.

Somit beträgt die postoperative Komplikationsrate 0,71 % (einer von 71 Probanden).

Intensivpflichtigkeit

Zur Frage der Intensivpflichtigkeit zeigte die vorliegende Studie, dass CT-navigiert operierte Patienten eine höhere Intensivpflichtigkeit mit 73 % aufwiesen als die Vergleichsgruppe mit 32 %. Die genauen Ursachen dafür sind aus den vorliegenden Ergebnissen nicht direkt abzuleiten.

Es wurde nachträglich geprüft, ob es einen Zusammenhang zwischen der Menge des intraoperativen Blutverlustes und der Konsequenz einer Intensivpflichtigkeit gibt. Es konnte jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen der Menge des Blutverlustes und der Intensivpflichtigkeit festgestellt werden ($p = 0.25$).

Als mögliche Ursache dafür könnte das kleine Patientenkollektiv von $n = 35$ in Frage kommen. Somit müsste in weiteren Studien mit einem größeren Patientenkollektiv ermittelt werden, ob tatsächlich kein signifikanter Unterschied zwischen der Menge des intraoperativen Blutverlustes und einer Intensivpflichtigkeit besteht.

Tab. 6: Menge des intraoperativen Blutverlustes in Abhängigkeit der Intensivpflichtigkeit.

	BLV bis 500 mL	BLV 501-1000 mL	BLV 1001-1500 mL	BLV > 1500 mL
INT +	6	9	6	1
INT -	1	7	3	2

Eine längere Operationszeit und der intraoperative Blutverlust werden jedoch in der Literatur als Einflussfaktoren genannt.⁴⁴

So konnte die Studie von Tang et al. (212 Patienten) belegen, dass es verschiedene prädiktive Faktoren für den intraoperativen Blutverlust gibt.⁴⁴ Dabei korrelierte ein signifikanter intraoperativer Blutverlust mit dem männlichen Geschlecht und einer Operationsdauer von über 257,5 Minuten.⁴⁴

Diese Parameter Operationszeit und intraoperativer Blutverlust wurden in der vorliegenden Arbeit nachträglich zusätzlich auf signifikante Unterschiede hin geprüft. Es konnte in Bezug auf die OP-Dauer für dieses Patientenkollektiv nicht bestätigt werden, dass ein signifikanter Unterschied besteht ($p = 0.12$). Auch ergab die Signifikanzprüfung keinen Unterschied bezüglich des Geschlechts ($p = 0.11$). Somit konnten die Faktoren Operationsdauer und Geschlecht als Ursache für die Intensivpflichtigkeit nach Tang et al. nicht bestätigt werden.

Tab. 7: Blutverlust in Abhängigkeit der OP-Dauer.

	Durchschnittlicher BLV in mL	Anzahl Patienten
OP-Dauer > 200 min	943	27
OP-Dauer ≤ 200 min	631	8

Tab. 8: Blutverlust in Abhängigkeit des Geschlechts.

Geschlecht	BLV [mL]
♀	940
♂	672

Obwohl sich bei Überprüfung des CT-navigierten und nicht CT-navigierten OP-Verfahrens keine signifikanten Unterschiede beim intraoperativen Blutverlust ergaben, bleibt die interessante Fragestellung, welche Faktoren trotzdem zu der statistisch signifikant erhöhten Intensivpflichtigkeit bei dem CT-navigierten OP-Verfahren führen.

Die Annahme der Hypothese 5, dass das nicht navigierte Operationsverfahren mehr intensivpflichtige Patienten nach sich zieht als das CT-navigierte Verfahren, wurde hiermit falsifiziert.

Stationäre Aufenthaltsdauer

Die stationäre Aufenthaltsdauer wies einen hochsignifikanten Unterschied zum Vorteil des CT-navigierten Verfahrens auf ($p = 0.0002$). Die mediane Gesamtaufenthaltsdauer betrug hierbei 10 Tage, wohingegen sie bei dem nicht-CT-navigierten Verfahren 13 Tage aufwies. Im Median ergab sich somit eine Reduktion der Aufenthaltsdauer von drei Tagen, im Vergleich zu dem nicht-CT-navigierten Verfahren.

Die retrospektive Kohortenstudie von Kauer et al. (12.046 Patienten, 467 navigiert operiert) zeigte eine kürzere stationäre Aufenthaltsdauer von 0,32 Tagen, wenn navigiert operiert wurde.⁴⁵

Hresko gab eine postoperative Aufenthaltsdauer von 4-5 Tagen an, wies jedoch nicht auf ein spezielles Operationsverfahren hin.¹¹

Singh et al. konnten keine signifikanten Unterschiede bezüglich der stationären Aufenthaltsdauer im Vergleich der beiden Operationsmethoden eruieren.⁴⁰

Mögliche Erklärungen für die oben beschriebenen Unterschiede, könnten eine präzisere Platzierung der Pedikelschrauben²⁷ sein, so dass es zu weniger postoperativen Komplikationen wie Nervenschäden kommt. Ebenfalls könnte eine präzisere Platzierung der Pedikelschrauben zu einer besseren Stabilität des implantierten Materials führen, wodurch eine frühere Mobilisierung des Patienten erfolgen kann, was somit zu einer Reduktion der stationären Aufenthaltsdauer führt.

Die in dieser Arbeit formulierte Hypothese 6, dass das jeweilige Operationsverfahren einen Einfluss auf die stationäre Aufenthaltsdauer hat, konnte verifiziert werden, da das CT-navigierte OP-Verfahren zu einer geringeren stationären Verweildauer führt.

Ergänzende Betrachtungen zu Vor- und Nachteilen des CT-navigierten Operationsverfahrens

Unabhängig von den vorliegenden Ergebnissen dieser Arbeit, können zu einer umfassenden Bewertung bezüglich der Wahl des Operationsverfahrens (CT-navigiert/ nicht CT-navigiert), folgende Kriterien ergänzend herangezogen werden:

Zum einen ist in Betracht zu ziehen, dass die CT-Navigation hohe Gerätekosten verursacht und darüber hinaus die Strahlenbelastung für Patienten ein zu berücksichtigender Faktor ist, der allerdings kontrovers diskutiert wird.³⁴

Zum anderen ist von Vorteil die hohe Reproduzierbarkeit durch intraoperativer CT-Bilder mit exakter Position von Instrumenten und Patient zueinander.²⁷ Ferner entsteht kein Zeitverlust bei Überprüfung der Materiallage, da kein Raumwechsel vonnöten ist.²⁷ Darüber hinaus, ist bei Einsatz eines O-Armes die Sterilität des Operationsfeldes uneingeschränkt gegeben, da die Bedienung via Knopfdruck möglich ist.

5.2. Limitationen der Arbeit

Zu den Limitationen dieser Arbeit zählt zunächst die Stichprobengröße von nur 71 Patienten, was die Aussagekraft der Daten im Vergleich zu Studien mit größeren Stichproben und Metaanalysen mit mehreren tausend Patienten begrenzt.

Des Weiteren untersucht die vorliegende Studie prä -, peri- und unmittelbare postoperative Parameter (Intensivpflichtigkeit, Cobb-Winkel-Korrektur, postoperative Komplikationen, stationäre Aufenthaltsdauer), beinhaltet aber keine postoperativen Langzeit-Beobachtungen.

Da die vorliegende Studie eine retrospektive Analyse ist und somit auf bereits bestehende, in der klinischen Praxis erhobene Routinedaten zugreift, ist ein Selektionsbias im Patientenkollektiv nicht auszuschließen.

Bei der Analyse der vorgegebenen Daten wurden ausschließlich vollständige Datensätze für den jeweiligen Parameter ausgewertet. Bezüglich eines Confoundings lassen sich nur schwer Aussagen treffen, da die Daten bereits erhoben wurden und eventuelle Störfaktoren nicht gezielt beeinflusst werden konnten oder möglicherweise nicht dokumentiert wurden.

Eine prospektive, kontrollierte Studie würde verschiedene methodische Vorteile bieten. Zum einen könnten durch klare und gezielte Protokolle mit definierten Variablen, einheitlichen Messmethoden und einheitlicher Dokumentation verlässlichere Daten erhoben werden, zum anderen könnten im Voraus Störfaktoren eliminiert werden. Kontrollierte Studien bieten den Vorteil eines direkten Vergleichs zwischen der Interventionsgruppe und der Kontrollgruppe. Dadurch können Kausalzusammenhänge präziser analysiert und begründet werden, was zu valideren Aussagen führt.

5.3. Ausblick

Für weitere Studien ergeben sich unterschiedlich relevante Faktoren.

Indiziert ist zum einen eine dezidierte Erfassung relevanter Faktoren, die eine intensivmedizinische Betreuung nach sich ziehen.

Zum anderen wäre ein Follow-up wünschenswert. Durch die Erhebung und Analyse von postoperativen Daten hinsichtlich Implantatstabilität, Schmerzen und Lebensqualität, könnten mögliche operationsverfahrensabhängige Langzeit-Unterschiede ermittelt werden.

5.4. Praktische Implikationen

Die vorliegende Studie konnte zunächst zeigen, dass die Korrektur der Krümmung unabhängig von der gewählten Operationsmethode ist.

Unter Betrachtung aller weiteren analysierten Parameter (OP-Dauer, Durchleuchtungszeit, intraoperativer Blutverlust, Intensivpflichtigkeit und stationäre Aufenthaltsdauer) ist der Vorteil des navigierten OP-Verfahrens die deutlich geringere mediane stationäre Aufenthaltsdauer von 10 Tagen im Vergleich zu 13 Tagen des nicht navigierten Verfahrens. Dies hat zum einen den wirtschaftlichen Aspekt der Kostenersparnis. Zum anderen ist eine kürzere stationäre Aufenthaltsdauer auch mit einer Reduktion der Infektionsgefahr mit krankenhausspezifischen Keimen verbunden.

Ein weiterer Vorteil des navigierten Operationsverfahrens ist die, in der bestehenden Literatur bestätigte, präzisere Pedikelschraubenimplantierung^{30,31} im Vergleich zu dem nicht navigierten OP-Verfahren. Allerdings seien, laut Literatur³⁰, keine weiteren signifikanten Unterschiede bezüglich des klinischen Outcomes (neurologische Komplikationen, Fusionsrate, sowie Reduktion von Schmerzen)³⁰ und der beiden OP-Verfahren festzustellen.

Dem gegenüber stehen jedoch auch einige Nachteile. So ist das navigierte OP-Verfahren nach Analyse der vorliegenden Studie, mit einer längeren Operationsdauer (durchschnittlich 40 min länger), einer längeren Durchleuchtungszeit (durchschnittlich 40 s länger) und somit einer erhöhten Strahlenbelastung für den Patienten verbunden. Darüber hinaus war der Anteil der intensivpflichtigen navigiert operierten Patienten (NAV +: 73 %, vs. NAV -: 32 %) deutlich höher, im Vergleich zu den nicht navigiert operierten Patienten.

Zusammenfassend stehen die beiden Vorteile des navigierten OP-Verfahrens, wie der kürzeren stationären Aufenthaltsdauer und der präzisen Pedikelschraubenplatzierung, den vier Nachteilen der längeren OP-Dauer, der längeren Durchleuchtungszeit und der damit einhergehenden erhöhten Strahlenbelastung, sowie der vermehrten Intensivpflichtigkeit gegenüber.

Eine klare Empfehlung für eines der beiden Operationsverfahren auf Grundlage der, in der vorliegenden Studie ermittelten Ergebnisse auszusprechen, ist nicht ganz trivial.

In weiteren Studien, die wünschenswerterweise prospektiv, kontrolliert und randomisiert angelegt sind, sollten ergänzende valide Daten zu einer klaren Operationsverfahrens-Empfehlung beitragen.

6. Literaturverzeichnis

- 1 Mann-Whitney U test.
https://www.statskingdom.com/170median_mann_whitney.html
(accessed Aug 24, 2025).
- 2 Chi Square Calculator - Up To 5x5, With Steps.
https://www.socscistatistics.com/tests/chisquare2/default2.aspx#google_vignette (accessed Aug 24, 2025).
- 3 Analyze a 2x2 contingency table.
<https://www.graphpad.com/quickcalcs/contingency2/> (accessed Sept 26, 2025).
- 4 Aumüller G et al. Anatomie, 3rd edn. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG, 2014.
- 5 Riepl AC. Präklinisches Management von Wirbelsäulenverletzungen. *Der Notarzt* 2016; 4. DOI:10.1055/s-0042-112255.
- 6 Aßmann O, Mein S, Köpcke J. Orthopädie und Traumatologie. *OTA-Lehrbuch* 2014; : 211–61.
- 7 Bernstein P, Seifert J. Die Skoliose im Wachstumsalter. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date* 2015; 10: 259–76.
- 8 Maruyama T, Takeshita K. Surgery for Idiopathic Scoliosis: Currently Applied Techniques. 2009.
- 9 Fadzan M, Bettany-Saltikov J. Etiological Theories of Adolescent Idiopathic Scoliosis: Past and Present. *Open Orthop J* 2018; 11: 1466–89.
- 10 Stücker R. Die idiopathische Skoliose. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date* 2010; 5: 39–56.
- 11 Hresko MT. Idiopathic Scoliosis in Adolescents. *New England Journal of Medicine* 2013; 368: 834–41.
- 12 Mackel CE, Jada A, Samdani AF, et al. A comprehensive review of the diagnosis and management of congenital scoliosis. *Child's Nervous System* 2018; 34: 2155–71.
- 13 Roberts SB, Tsirikos AI. Factors influencing the evaluation and management of neuromuscular scoliosis: A review of the literature. *J Back Musculoskelet Rehabil* 2016; 29: 613–23.
- 14 Halawi MJ, Lark RK, Fitch RD. Neuromuscular scoliosis: Current concepts. *Orthopedics* 2015; 38: e452–6.

- 15 Ovadia D. Classification of adolescent idiopathic scoliosis (AIS). *J Child Orthop* 2012; 7: 25.
- 16 Bullmann V, Liljenqvist U. Die idiopathische Skoliose. 2019; : 571–85.
- 17 Technik O, Selle SA, Seifert J. Skoliose-Cobb-Winkel-ein Vergleichswert mit Schwächen Cobb Angle of Scoliosis-a Reference Value with Weaknesses. .
- 18 Langensiepen S, Semler O, Sobottke R, *et al.* Measuring procedures to determine the Cobb angle in idiopathic scoliosis: a systematic review. *European Spine Journal* 2013; 22: 2360.
- 19 Wang J, Zhang J, Xu R, Chen TG, Zhou KS, Zhang HH. Measurement of scoliosis Cobb angle by end vertebra tilt angle method. *J Orthop Surg Res* 2018; 13: 1–7.
- 20 Krenauer A, Mehren C. 14/f—“bad” posture and a slightly protruding scapula: Preparation for the specialist doctor’s exam: Case 47. *Orthopade* 2021; 50: 130–4.
- 21 Ovadia D. Classification of adolescent idiopathic scoliosis (AIS). *J Child Orthop* 2013; 7: 25–8.
- 22 Slattery C, Verma K. Classifications in Brief: The Lenke Classification for Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Clin Orthop Relat Res* 2018; 476: 2271.
- 23 Trobisch P, Suess O, Schwab F. Die idiopathische skoliose. *Dtsch Arztebl* 2010; 107: 875–84.
- 24 Scoliosis Rotation & Nash-Moe Method. <https://treatingscoliosis.com/blog/nash-moe-method-scoliosis-vertebral-rotation-explained/> (accessed Sept 5, 2025).
- 25 Lam GC, Hill DL, Le LH, Raso J V., Lou EH. Vertebral rotation measurement: A summary and comparison of common radiographic and CT methods. *Scoliosis* 2008; 3: 1–10.
- 26 Buchner H, Pink P, Reinisch H. Fünfjährige Erfahrungen mit dem Harrington-Stab bei der operativen Behandlung der Skoliose. *Arch Orthop Unfallchir* 1974; 80: 343–58.
- 27 Otomo N, Funao H, Yamanouchi K, Isogai N, Ishii K. Computed Tomography-Based Navigation System in Current Spine Surgery: A Narrative Review. *Medicina* 2022, Vol 58, Page 241 2022; 58: 241.

- 28 Wendl. Klaus. Navigiertes Operieren an der Wirbelsäule. *OP-Journal*. 2011; : 138–42.
- 29 Stöckle U, König B, Schaser K, Melcher I, Haas NP. CT- und fluoroskopiebasierte navigation in der Becken-Chirurgie. *Unfallchirurg* 2003; 106: 914–20.
- 30 Verma R, Krishan S, Haendlmayer K, Mohsen A. Functional outcome of computer-assisted spinal pedicle screw placement: a systematic review and meta-analysis of 23 studies including 5,992 pedicle screws. *Eur Spine J* 2010; 19: 370–5.
- 31 Shin BJ, James AR, Njoku IU, Härtl R. Pedicle screw navigation: a systematic review and meta-analysis of perforation risk for computer-navigated versus freehand insertion. *J Neurosurg Spine* 2012; 17: 113–22.
- 32 Chang PL, Chen MJW, Hsiao PH, *et al.* Navigation-Assisted One-Staged Posterior Spinal Fusion Using Pedicle Screw Instrumentation in Adolescent Idiopathic Scoliosis—A Case Series. *Medicina* 2024, Vol 60, Page 300 2024; 60: 300.
- 33 Kim YJ, Lenke LG, Cho SK, Bridwell KH, Sides B, Blanke K. Comparative analysis of pedicle screw versus hook instrumentation in posterior spinal fusion of adolescent idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)* 2004; 29: 2040–8.
- 34 Chan V, Etigunta S, Gausper A, *et al.* Navigation is associated with lower risk of neurological injury and transfusion in pediatric idiopathic scoliosis surgery. *Spine Deform* 2025; : 1–9.
- 35 Baldwin KD, Kadiyala M, Talwar D, Sankar WN, Flynn J (Jack) M, Anari JB. Does intraoperative CT navigation increase the accuracy of pedicle screw placement in pediatric spinal deformity surgery? A systematic review and meta-analysis. *Spine Deform* 2022; 10: 19–29.
- 36 Moore HG, Samuel AM, Burroughs PJ, Pathak N, Tuason DA, Grauer JN. Use of intraoperative navigation for posterior spinal fusion in adolescent idiopathic scoliosis surgery is safe to consider. *Spine Deform* 2021; 9: 403–10.

- 37 Meng X tong, Guan X fei, Zhang H long, He S sheng. Computer navigation versus fluoroscopy-guided navigation for thoracic pedicle screw placement: a meta-analysis. *Neurosurg Rev* 2016; 39: 385–91.
- 38 Vissarionov S, Schroeder JE, Novikov SN, Kokyshin D, Belanchikov S, Kaplan L. The Utility of 3-Dimensional-Navigation in the Surgical Treatment of Children with Idiopathic Scoliosis. *Spine Deform* 2014; 2: 270–5.
- 39 Gierse J, Zimmermann F, Grützner PA, Stallkamp J, Vetter SY, Mandelka E. Analysis of Screw/Pedicle-Width Ratio and Accuracy in Navigated Versus 3D-Controlled Fluoroscopy-Guided Pedicle Screw Placement. *Global Spine J* 2025; 0(0): 1–9.
- 40 Singh A, Kotzur T, Peterson B, Koslosky E, Emukah C, Chaput C. Computer Assisted Navigation Does Not Improve Outcomes in Posterior Fusion for Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Global Spine J* 2025; 15: 1957–65.
- 41 Bratschitsch G, Leitner L, Stücklschweiger G, *et al.* Radiation Exposure of Patient and Operating Room Personnel by Fluoroscopy and Navigation during Spinal Surgery. *Scientific Reports* 2019 9:1 2019; 9: 17652-.
- 42 Murphy RF, Mooney JF. Complications following spine fusion for adolescent idiopathic scoliosis. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2016; 9: 462.
- 43 Tang H, Zhu J, Ji F, Wang S, Xie Y, Fei H. Risk factors for postoperative complication after spinal fusion and instrumentation in degenerative lumbar scoliosis patients. *J Orthop Surg Res* 2014; 9. DOI:10.1186/1749-799X-9-15.
- 44 Tang CYK, Kamath VHD, Cheung PWH, Cheung JPY. Predictive factors for intraoperative blood loss in surgery for adolescent idiopathic scoliosis. *BMC Musculoskelet Disord* 2021; 22. DOI:10.1186/S12891-021-04104-Z.
- 45 Kaur J, Koltsov JCB, Kwong JW, Cheng I, Vorhies JS. Does Navigation Make Spinal Fusion for Adolescent Idiopathic Scoliosis Safer? Insights From a National Database. *Spine (Phila Pa 1976)* 2021; 46: E1049–57.
- 46 Burger JA, Becker L, Li Z, *et al.* In idiopathic scoliosis distances of spinal cord to thoracic pedicle are within 2 mm in a large region of the thoracic apex. *Sci Rep* 2024; 14. DOI:10.1038/s41598-024-64971-z.

- 47 Singh A, Kotzur T, Peterson B, Koslosky E, Emukah C, Chaput C. Computer Assisted Navigation Does Not Improve Outcomes in Posterior Fusion for Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Global Spine J* 2025; 15: 1957–65.
- 48 Alomari S, Lubelski D, Lo SFL, *et al.* Surgeon specialty effect on early outcomes of elective posterior spinal fusion for adolescent idiopathic scoliosis: a propensity-matched analysis of 965 patients. *European Spine Journal* 2022; 31: 2355–61.
- 49 Katz AD, Song J, Hasan S, *et al.* Navigated versus conventional pediatric spinal deformity surgery: Navigation independently predicts reoperation and infectious complications. *J Craniovertebr Junction Spine* 2023; 14: 165–74.
- 50 Kaur J, Koltsov JCB, Kwong JW, Cheng I, Vorhies JS. Does Navigation Make Spinal Fusion for Adolescent Idiopathic Scoliosis Safer? Insights From a National Database. *Spine (Phila Pa 1976)* 2021; 46: E1049–57.
- 51 Lehman RA, Lenke LG, Keeler KA, Kim YJ, Cheh G. Computed tomography evaluation of pedicle screws placed in the pediatric deformed spine over an 8-year period. *Spine (Phila Pa 1976)* 2007; 32: 2679–84.
- 52 Soini V, Syvänen J, Helenius I, Helenius L, Raitio A. Perioperative Risk Factors for Bleeding in Adolescents Undergoing Pedicle Screw Instrumentation for Scoliosis. *Children (Basel)* 2023; 10. DOI:10.3390/children10020381.
- 53 Soini V, Raitio A, Helenius I, Helenius L, Syvänen J. A retrospective cohort study of bleeding characteristics and hidden blood loss after segmental pedicle screw instrumentation in neuromuscular scoliosis as compared with adolescent idiopathic scoliosis. *North American Spine Society journal* 2022; 12: 100190.
- 54 Li X, Ding W, Zhao R, Yang S. Risk Factors of Total Blood Loss and Hidden Blood Loss in Patients with Adolescent Idiopathic Scoliosis: A Retrospective Study. *Biomed Res Int* 2022; 2022. DOI:10.1155/2022/9305190.
- 55 Fichtner J, Hofmann N, Rienmüller A, *et al.* Revision Rate of Misplaced Pedicle Screws of the Thoracolumbar Spine—Comparison of Three-Dimensional Fluoroscopy Navigation with Freehand Placement: A

- Systematic Analysis and Review of the Literature. *World Neurosurg* 2018; 109: e24–32.
- 56 Ughwanogho E, Patel NM, Baldwin KD, Sampson NR, Flynn JM. Computed tomography-guided navigation of thoracic pedicle screws for adolescent idiopathic scoliosis results in more accurate placement and less screw removal. *Spine (Phila Pa 1976)* 2012; 37. DOI:10.1097/BRS.0B013E318238BBD9.
 - 57 Yson SC, Sembrano JN, Sanders PC, Santos ERG, Ledonio CGT, Polly DW. Comparison of Cranial Facet Joint Violation Rates Between Open and Percutaneous Pedicle Screw Placement Using Intraoperative 3-D CT (O-arm) Computer Navigation. *Spine (Phila Pa 1976)* 2013; 38: 251–8.
 - 58 Verma R, Krishan S, Haendlmayer K, Mohsen • A. Functional outcome of computer-assisted spinal pedicle screw placement: a systematic review and meta-analysis of 23 studies including 5,992 pedicle screws. DOI:10.1007/s00586-009-1258-4.
 - 59 Elmi-Terander A, Burström G, Nachabe R, *et al.* Pedicle Screw Placement Using Augmented Reality Surgical Navigation with Intraoperative 3D Imaging: A First In-Human Prospective Cohort Study. *Spine (Phila Pa 1976)* 2019; 44: 517–25.
 - 60 Conrads N, Grunz JP, Huflage H, *et al.* Accuracy of pedicle screw placement using neuronavigation based on intraoperative 3D rotational fluoroscopy in the thoracic and lumbar spine. *Arch Orthop Trauma Surg* 2023; 143: 3007–13.
 - 61 Chan A, Parent E, Wong J, Narvacan K, San C, Lou E. Does image guidance decrease pedicle screw-related complications in surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis: a systematic review update and meta-analysis. *European Spine Journal* 2020; 29: 694–716.
 - 62 Berlin C, Platz U, Quante M, Thomsen B, Köszegvary M, Halm H. Collected data on freehand technique instrumentation and literature comparison on fluoroscopic and CT-assisted navigation. *Orthopade* 2020; 49: 724–31.
 - 63 Chan A, Parent E, Narvacan K, San C, Lou E. Intraoperative image guidance compared with free-hand methods in adolescent idiopathic

- scoliosis posterior spinal surgery: a systematic review on screw-related complications and breach rates. *Spine Journal* 2017; 17: 1215–29.
- 64 Von Stempel A, Neckritz A, Sukopp C. Posterior Instrumentation and Fusion for Progressive Idiopathic Scoliosis. *Oper Orthop Traumatol* 2000; 12: 173–96.
- 65 Wimmer C, Siam AE, Pfandlsteiner T. Operative Behandlung von Skoliosen: Präoperative Planung, intraoperatives Monitoring und postoperatives Management. *Orthopade* 2015; 44: 859–68.
- 66 Cheung KMC, Cheung JPY, Samartzis D, *et al.* Magnetically controlled growing rods for severe spinal curvature in young children: A prospective case series. *The Lancet* 2012; 379: 1967–74.
- 67 Fisher's Exact Test Calculator. <https://www.omnicalculator.com/statistics/fishers-exact-test> (accessed Aug 24, 2025).
- 68 Kuznia AL, Hernandez AK, Lee LU. Adolescent Idiopathic Scoliosis: Common Questions and Answers. *Am Fam Physician* 2020; 101: 19–23.
- 69 Adoleszente Idiopathische Skoliose S2k-Leitlinie der Deutsche Wirbelsäulengesellschaft DWG, Vereinigung für Kinderorthopädie VKO, Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie DGOU. www.dgou.de (accessed Aug 16, 2025).
- 70 van Royen BJ (Barend). Understanding the Lenke Classification for Adolescent Idiopathic Scoliosis (AIS). *Curr Probl Diagn Radiol* 2023; 52: 233–6.
- 71 Seifert J, Thielemann F, Bernstein P. Adoleszente idiopathische Skoliose: Leitfaden für die praktische Anwendung. *Orthopade* 2016; 45: 509–17.
- 72 Murphy RF, Mooney JF. Current concepts in neuromuscular scoliosis. *Curr Rev Musculoskelet Med* 2019; 12: 220–7.
- 73 DeSai C, Reddy V, Agarwal A. Anatomy, Back, Vertebral Column. *StatPearls* 2023; published online Aug 8. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK525969/> (accessed Aug 15, 2025).
- 74 Grifka J. Aufbau und Funktion der Wirbelsäule. *Ratgeber Rücken* 2024; : 5–15.

- 75 Baldwin KD, Kadiyala M, Talwar D, Sankar WN, Flynn J (Jack) M, Anari JB. Does intraoperative CT navigation increase the accuracy of pedicle screw placement in pediatric spinal deformity surgery? A systematic review and meta-analysis. *Spine Deform*. 2022; 10: 19–29.
- 76 Łajczak P, Ayesha A, Jabbar R, *et al*. Comparison of accuracy of pedicle screw placement for adolescent idiopathic scoliosis using freehand fluoroscopic, navigation, and robotic-assisted techniques - a systematic review and bayesian network meta-analysis. *Neurosurg Rev*. 2025; 48. DOI:10.1007/s10143-025-03333-3.
- 77 Cárcamo M, Espinoza P, Rodas M, Urrejola Ó, Bettany-Saltikov J, Grivas TB. Prevalence, risk of progression and quality of life assessment in adolescents undergoing school screening for adolescent idopathic scoliosis. *Andes Pediatrica* 2023; 94: 78–85.
- 78 Börm W, Meyer F, Bullmann V, Knop C. Wirbelsäule interdisziplinär : operative und konservative Therapie. Schattauer, 2017.
- 79 Urbanski W, Jurasz W, Wolanczyk M, *et al*. Clinical Research Increased Radiation but No Benefits in Pedicle Screw Accuracy With Navigation versus a Freehand Technique in Scoliosis Surgery. *Clin Orthop Relat Res* 2018; 476: 1020–7.
- 80 Khan MA, Quiceno E, Ravinsky RA, *et al*. Is young adult idiopathic scoliosis a distinct clinical entity from adolescent idiopathic scoliosis? a Systematic Review and Meta-analysis comparing pre-operative characteristics and operative outcomes. *Spine Deform* 2024; 12: 1241–51.
- 81 Liljenqvist U. Ätiologie der idiopathischen Skoliose. *OP-Journal* 2009; 2/2009: 132–5.
- 82 Qiu G, Zhang J, Wang Y, *et al*. A new operative classification of idiopathic scoliosis: A Peking Union Medical College method. *Spine (Phila Pa 1976)* 2005; 30: 1419–26.
- 83 Zhang J, Li H, Zhang Y. Application of computer-aided approaches to the PUMC classification of scoliosis. *Biomed Eng Lett* 2017; 7: 245.
- 84 Yaman O, Dalbayrak S. Idiopathic scoliosis. *Turk Neurosurg* 2014; 24: 646–57.
- 85 Konieczny MR, Senyurt H, Krauspe R. Epidemiology of adolescent idiopathic scoliosis. *J Child Orthop* 2013; 7: 3–9.

- 86 Lonstein JE. Scoliosis: Surgical versus nonsurgical treatment. *Clin Orthop Relat Res* 2006; 443: 248–59.
- 87 Negrini S, Minozzi S, Bettany-Saltikov J, *et al.* Braces for idiopathic scoliosis in adolescents. Cochrane Database of Systematic Reviews. 2015; 2015. DOI:10.1002/14651858.CD006850.pub3.
- 88 Weinstein SL, Dolan LA, Wright JG, Dobbs MB. Effects of Bracing in Adolescents with Idiopathic Scoliosis. *New England Journal of Medicine* 2013; 369: 1512–21.
- 89 Riewruja K, Tanasansomboon T, Yingsakmongkol W, *et al.* A Network Meta-Analysis Comparing the Efficacy and Safety of Pedicle Screw Placement Techniques Using Intraoperative Conventional, Navigation, Robot-Assisted, and Augmented Reality Guiding Systems. *Int J Spine Surg* 2024; 18: 551–70.
- 90 Al-Naseem AO, Al-Muhannadi A, Ramadhan M, *et al.* Robot-assisted pedicle screw insertion versus navigation-based and freehand techniques for posterior spinal fusion in scoliosis: a systematic review and meta-analysis. *Spine Deform.* 2024; 12: 1203–15.
- 91 Ferraris L, Koller H, Meier O, Hempfing A. Die Bedeutung der sagittalen Balance in der Wirbelsäulenchirurgie. *Deutscher Ärzte-Verlag OUP* 2012; 1: 502–8.

7. Anhang

7.1. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufbau und Abschnitte der Wirbelsäule. Quelle: www.istockphoto.com ; Stock-Illustration-ID:523037013	13
Abb. 2: Drei-Säulen-Modell der Wirbelsäule. Quelle ⁶	14
Abb. 3: Doppelbogige thorakolumbale Skoliose (links) und einbogige thorakale Skoliose (rechts). ⁸	15
Abb. 4: Schematische Darstellung der Cobb-Winkel-Bestimmung. ²⁰	19
Abb. 5: Lenke-Klassifikation. ¹⁶	22
Abb. 6: Dresdener Skoliosepfad, Orientierung für das therapeutische Vorgehen. ⁷	24
Abb. 7: Darstellung Metha-Winkel-Berechnung; RVAD (Rip Vertebral Angle Difference). ¹⁰	25
Abb. 8: Skoliose präoperativ und postoperativ versorgt mit SMA-Klammern (Shape Memory Alloy). ¹⁰	28
Abb. 9: Skoliose präoperativ; postoperativ versorgt mit Growing Rods; dorsale Ansicht und sagittale Ansicht. ¹⁰	28
Abb. 10: Mobiles CT-Gerät: O-Arm (außen links); dorsales Einbringen von Pedikelschrauben (zweites Bild von links); Pedikelschraubenplatzierung unter CT-Navigation (erstes und zweites Bild von rechts). ²⁷	30
Abb. 11: Cobb-Winkel-Bestimmung einer doppelbogigen thorako-lumbalen Skoliose. Quelle: Bildmaterial des analysierten Datensatzes der vorliegenden Studie.	33
Abb. 12: Anzahl der Patienten (n = 71) in Abhängigkeit des Alters (11-22 Jahre), dargestellt in vier Gruppen mit einer Altersspanne von je drei Jahren.	36
Abb. 13: Darstellung der Patientenanzahl in Abhängigkeit des Operationsverfahren und des Alters.	37
Abb. 14: Geschlechterverteilung von operativ behandelten Skoliose-Patienten, aufgeteilt in die Gruppen: weiblich gesamt und männlich gesamt. Beide Gruppen wurden des Weiteren nach Operationsverfahren (Nav +/- Nav -) differenziert.	38
Abb. 15: Erzielte Winkelkorrektur [°] in Abhängigkeit des jeweiligen Operationsverfahrens (Nav +/-Nav -).	39
Abb. 16: Das navigierte OP-Verfahren nimmt signifikant mehr Zeit in Anspruch (230 min), als das nicht navigierte	40
Abb. 17: Der Anteil der Patienten mit intraoperativem Blutverlust (BLV) ist unabhängig vom jeweiligen OP-Verfahren.	41
Abb. 18: Durchschnittlicher intraoperativer Blutverlust nach dem jeweiligen OP-Verfahren.	42

Abb. 19: Vergleichende Darstellung der Durchleuchtungszeit [s] der Patienten in Abhängigkeit des Operationsverfahrens (CT-navigiert = Nav +; n = 30; nicht CT-navigiert = Nav -; n = 16).	43
Abb. 20: Prozentualer Anteil der Patienten in Abhängigkeit von der Intensivpflichtigkeit (intensivpflichtig = intensiv +; nicht intensivpflichtig = intensiv -) differenziert nach dem jeweiligen Operationsverfahren.....	44
Abb. 21: Stationäre Aufenthaltsdauer [d] der Patienten unterschieden nach der jeweiligen.	46
Abb. 22: Stationäre Aufenthaltsdauer [d] der Patienten unterschieden nach der jeweiligen Operationsmethode (CT-navigiert = Nav +, nicht CT-navigiert = Nav -).	47

7.2. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Darstellung der Geschlechterverteilung in Abhängigkeit des Operationsverfahrens (Nav +/Nav -). Es konnte kein statistischer Zusammenhang ($p = 0.3$) zwischen dem Geschlecht und der Wahl des Operationsverfahrens festgestellt werden.	38
Tab. 2: Verteilung des intraoperativen Blutverlustes (BVL) in Abhängigkeit des jeweiligen Operationsverfahrens (CT- navigiert = Nav + und nicht CT-navigiert = Nav -).	42
Tab. 3: Intensivpflichtigkeit (ja = Int +, nein = Int -) in Abhängigkeit des angewendeten Operationsverfahrens	45
Tab. 4: Verteilung der Patientenzahl nach jeweiliger stationärer Aufenthaltsdauer in Tagen.	47
Tab. 5: Zusammenfassung der analysierten Parameter mit Angabe des p-Wertes, der Standardabweichungen, sowie des Minimums und Maximums.	48
Tab. 6: Menge des intraoperativen Blutverlustes in Abhängigkeit der Intensivpflichtigkeit.	55
Tab. 7: Blutverlust in Abhängigkeit der OP-Dauer.	56
Tab. 8: Blutverlust in Abhängigkeit des Geschlechts.	56

8. Vorabveröffentlichung von Ergebnissen

Am 19.12.2025 wurde dem Springer Nature Verlag das Manuskript mit der Submission ID cd2ff551-b67a-4de5-a7d1-b0fd9969d8e4 und dem Titel “Comparison of navigation and fluoroscopic assisted posterior spinal fusion in adolescent idiopathic scoliosis surgery” vorgelegt. Es soll im European Spine Journal veröffentlicht werden.

Co-Autoren sind: Sarter M, Bay C, Lenz M, Kernich N, Sircar K, Eysel P, Oikonomidis S.