

# Mysterium Ligamentum alare Ruptur: Stellenwert der MRT-Diagnostik des Schleudertraumas – biomechanische, anatomische und klinische Studien

## Mystery of Alar Ligament Rupture: Value of MRI in Whiplash Injuries – Biomechanical, Anatomical and Clinical Studies

### Autoren

H. Bitterling<sup>1</sup>, A. Stäbler<sup>2</sup>, H. Brückmann<sup>1</sup>

### Institute

<sup>1</sup> Abteilung für Neuroradiologie, Klinikum der LMU, München  
<sup>2</sup> Radiologische Praxis, Radiologie in München Harlaching

### Key words

- effective dose
- dose area product
- conversion coefficient

### Zusammenfassung

**Ziel:** Das Schleudertrauma ist häufig Gegenstand medizinischer Gutachten verschiedener Fachgebiete, und es verursacht enorme Folgekosten bei Kfz-Haftpflichtversicherungen. Posttraumatische Veränderungen der Ligamenta alaria werden von einigen Autoren als ursächlich für chronische Beschwerden nach einer Beschleunigungsverletzung der HWS angesehen.

**Material und Methoden:** Die Ergebnisse biomechanischer, anatomischer und klinischer MRT-Studien werden analysiert.

**Ergebnisse:** In Beschleunigungsversuchen mit Leichenpräparaten konnten keine entsprechenden Verletzungen erzeugt werden. In der MRT sind die Ligamenta alaria sehr gut darstellbar, Normvarianten müssen jedoch von morphologischen Veränderungen abgegrenzt werden. Funktionsuntersuchungen im MRT zeigen z. T. widersprüchliche Ergebnisse.

**Schlussfolgerungen:** Biomechanische Studien sprechen gegen eine Beteiligung der Ligamenta alaria beim Schleudertrauma. Die Interpretation der morphologischen Veränderungen der Bänder ist aufgrund des weiten Spektrums an Normvarianten problematisch. Funktionsuntersuchungen bieten keinen Vorteil.

### Abstract

**Purpose:** Whiplash injury of the cervical spine is a frequent issue in medical expertise and causes enormous consequential costs for motor insurance companies. Some authors accuse posttraumatic changes of alar ligaments to be causative for consequential disturbances.

**Materials and Methods:** Review of recent studies on biomechanics, anatomical and clinical MR imaging.

**Results:** Biomechanical experiments can not induce according injuries of alar ligaments. Although MRI provides excellent visualization of alar ligaments, the range of normal variants is high.

**Conclusion:** Biomechanical studies give no evidence of alar ligament involvement in whiplash disease. Using MRI, signal alterations of alar ligaments can hardly be differentiated from common normal variants. Functional MRI provides no diagnostic yield.

eingereicht 23.4.2007

akzeptiert 24.7.2007

### Bibliografie

DOI 10.1055/s-2007-963426

Online-Publikation: 2007

Fortschr Röntgenstr 2007; 179: 1127–1136 © Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York · ISSN 1438-9029

### Korrespondenzadresse

**Dr. Harro Bitterling**

Abteilung für Neuroradiologie,  
Klinikum Großhadern der LMU  
Marchioninistraße 15  
81377 München  
Tel.: ++ 49/89/70 95 25 01  
Fax: ++ 49/89/70 95 32 70  
harro.bitterling@med.uni-muenchen.de

### Einleitung

Das Schleudertrauma stellt eine der am häufigsten diagnostizierten Verletzungen bei Autounfällen dar, seine Inzidenz ist in den letzten Jahrzehnten trotz kontinuierlich verbesserter passiver Sicherheitssysteme deutlich angestiegen. 90% der Forderungen, die wegen eines Personenschadens bei den Kfz-Haftpflichtversicherern geltend gemacht werden, beruhen auf reinen HWS-Verletzungen [1]. Entsprechend anderen Angaben von Versicherungsstatistiken

treten allein in Deutschland jährlich 200 000 Schleudertraumata auf, deren Folgekosten 1998 auf 750 Mio. € beziffert wurden [2]. In den USA fallen jedes Jahr entsprechende Kosten von 4,5 Mrd. US\$ an [3].

In Übersichtsarbeiten [4, 5], welche auf einer international angelegten Literaturrecherche basieren, zeigen Ferrari et al., dass die Epidemiologie von Beschleunigungsverletzungen der HWS erhebliche interkulturelle Unterschiede zeigt: In westlichen Ländern wie in Deutschland, Großbritannien oder den USA und Kanada wird von

Patienten über chronische Beschwerden nach Beschleunigungstrauma geklagt, derartige Verläufe sind in Litauen, Griechenland, Singapur oder Neuseeland unbekannt. Als Begründung postuliert die Arbeitsgruppe, dass in Ländern mit hoher Prävalenz eine kulturelle und soziale „Information“ ein chronisches Beschwerdeverhalten nach HWS-Beschleunigungsverletzungen fördere: In Ländern und Kulturen mit sehr geringer oder fehlender Prävalenz eines chronischen HWS-Syndroms nach Beschleunigungsverletzung werden Unfallbeteiligte gewöhnlich nicht durch Berichte über chronische Symptome oder Einschränkungen nach HWS-Beschleunigungsverletzungen informiert. Sie werden nicht Zeuge eines chronischen Leidensverhaltens anderer und haben daher auch selbst keinerlei Erwartungshaltung für einen chronischen Verlauf. Sie werden nach einem Unfall auch nicht in einen Behandlungsprozess mit Symptomsuggestion oder -sensibilisierung gedrängt. Folglich existieren hier viele Faktoren nicht, die bekanntlich eine Symptomauslösung, -verstärkung und -verlängerung fördern. Außerdem nehmen die Unfallbeteiligten in diesen Ländern und Kulturen nicht an einem „Verarbeitungsprozess“ mit Angst, Frustration und Ärger (v.a. im Rahmen von Auseinandersetzungen mit Versicherungsgesellschaften und bei dem Versuch, die eigenen Beschwerden zu beweisen) teil [5].

Das Schleudertrauma der Halswirbelsäule stellt ein diagnostisches Dilemma dar, den subjektiv stark empfundenen Beschwerden stehen oft keine klinisch objektivierbaren Befunde gegenüber. Objektivierbare Befunde wie z.B. eine traumatisch verursachte Liquorfistel [6] stellen eine Seltenheit dar. Dennoch wird in der klinischen Praxis häufig unkritisch die Diagnose einer „HWS-Distorsion“ oder eines „Schleudertraumas“ gestellt, wenn ein Patient nach einem Unfall entsprechende subjektive Beschwerden vorgibt. Mitunter wird die Beurteilung des Krankheitsbildes noch durch mögliche Entschädigungsansprüche oder finanzielle Begehren des Patienten erschwert.

Vor diesem Hintergrund liegt es nahe, dass hohe Erwartungen an die radiologische Diagnostik gestellt werden, um subjektive Beschwerden mit objektiven Bildbefunden zu untermauern oder zu zerstreuen.

Selbst bei tödlich verlaufenden Schädel-Hirn-Traumata stehen im Zervikalbereich Weichteilverletzungen deutlich im Vordergrund, während knöcherne Verletzungen der HWS nur eine untergeordnete Rolle spielen [7]. So ist es nicht verwunderlich, dass beim Schleudertrauma die konventionelle Röntgendiagnostik oder die Computertomografie selten pathologische Veränderungen zeigen [8–10]. Daher ist seit Mitte der 80er-Jahre [9, 11, 12] die MRT bei der komplexen klinischen Symptomatik des Schleudertraumas die wegweisende Untersuchung geworden.

Im Folgenden geben wir einen Überblick über grundlegende Arbeiten zur Biomechanik beim Schleudertrauma und über die aktuelle Literatur zur Bildgebung bei Beschleunigungsverletzungen der HWS mit Fokus auf die Kernspintomografie.

## Biomechanische Studien



In ersten Untersuchungen zum Verletzungsmechanismus bei Beschleunigungsverletzungen der Halswirbelsäule wurde bereits vor 40 Jahren ein Hyperextensionsmodell postuliert [13], welches schließlich zur Entwicklung der Kopfstütze geführt hat. Dennoch hat deren Einführung laut einer schwedischen Untersuchung von 1985 zu einem Rückgang aller HWS-Verlet-

zungen um nur 20% geführt [14]. Panjabi et al. haben in einer Studie mit frischen, humanen HWS-Präparaten experimentelle Traumastudien unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt [15, 16]. Anhand eines Schlittenmodells wurden Beschleunigungstraumata mit Belastungen zwischen 2,5 und 10,5 G simuliert [17], das Bewegungsverhalten der Präparate wurde in allen Segmenten mit Hochgeschwindigkeitskameras aufgezeichnet. Vor und nach jedem Trauma wurde das jeweilige Präparat Funktionsröntgenaufnahmen und „Flexibilitätstests“ [18] unterzogen, um Hinweise auf Ausmaß und Lokalisation der erlittenen Verletzungen zu erhalten. Zusätzlich wurden am Ende eines jeden Versuchs CT-, MRT- und Kryomikrotomieschnitte angefertigt. Die Autoren fanden eine biphasische Antwort im Bewegungsverhalten der HWS, bei dem in den ersten 50–75 ms eine S-förmige Verkrümmung mit Flexion in den oberen und Extension in den unteren Segmenten stattfindet. Der Kopf wandert dabei ohne nennenswerte Flexions- oder Extensionsbewegung um ca. 6 cm nach hinten. In der 2. Phase, zwischen 100 und 125 ms nach dem Stoß, geht die gesamte HWS in eine Extensionsbewegung über. Verletzungen treten vor allem im Rahmen der frühen, S-förmigen Verkrümmung auf und sind bevorzugt in den unteren Segmenten lokalisiert. Nach Meinung der Autoren widerlegen die Ergebnisse dieser Studien die Hypothese, dass der kraniozervikale Übergang die Prädilektionsstelle für Verletzungen bei einem Beschleunigungstrauma sei sowie die Hypothese, dass die (späte) Hyperextensionsbewegung des Kopfes hauptverantwortlich für die beobachteten Verletzungen im Rahmen eines Schleudertraumas sei. Hierdurch könnte auch die nichtbefriedigende Wirkung der Kopfstütze miterklärt werden, da diese in der Regel zu weit vom Kopf entfernt sei und damit nicht rechtzeitig ihre Wirkung entfalten könnte.

In einer weiteren experimentellen Untersuchung wurden frische humane HWS-Präparate untersucht, dabei wurden insbesondere die Belastungen an den Bändern im Bereich der Kopfgelenke, speziell an den Ligamenta alaria, am Ligamentum transversum atlantis und am Ligamentum apicis dentis analysiert [19]. Es wurde der gleiche Versuchsaufbau wie in den weiter oben zitierten Studien gewählt [15, 16]. Bei Horizontalbeschleunigungen bis 8 G wurden an den untersuchten Bandstrukturen lediglich Belastungen gemessen, die deutlich unter den in vorhergehenden Untersuchungen experimentell ermittelten Belastungen lagen, welche zu einer Schädigung geführt hatten. Die Autoren schlossen daraus, dass bei Beschleunigungsverletzungen bis 8 G eine Verletzung der Ligamenta alaria oder der anderen untersuchten Bänder nicht zu erwarten sei [19].

Entsprechende Ergebnisse wurden auch in experimentellen Probandenstudien ermittelt. Die Münsteraner Arbeitsgruppe von Castro et al. [20] setzte 19 Probanden unter kontrollierten Bedingungen Heckkollisionen mit Geschwindigkeiten zwischen 8,7 und 14,2 km/h aus, die Beschleunigungen der getroffenen Fahrzeuge lagen im Mittelwert bei 2,7 G (2,1–3,6 G). In der folgenden klinischen Untersuchung wurden keinerlei Verletzungen diagnostiziert, ebenso erbrachten eine computergestützte Bewegungsanalyse sowie kontrastverstärkte MRT-Studien am Folgetag sowie nach 4–5 Wochen keine Veränderungen zu den Ausgangsuntersuchungen vom Vortag des Experiments. Die Beschleunigungswerte lagen im gleichen Bereich wie bei einem parallel durchgeführten Kontrollexperiment mit Autoscooterfahrzeugen, wie man sie üblicherweise auf Jahrmärkten findet. Die Autoren folgerten daraus, dass bei einem Heckaufprall eine „Harmlosigkeitsgrenze“ zwischen 10 und 15 km/h anzusetzen

sei, unterhalb derer nicht mit Verletzungen der HWS zu rechnen sei [20].

Im Gegensatz zu den vorgenannten Studien, die jeweils Beschleunigungen in bzw. gegen die Fahrtrichtung untersuchten, betrachtete eine biomechanische Studie aus Ulm das Verletzungsrisiko für die Ligamenta alaria bei einem Seitenaufprall [21]. Die Autoren vermuten, dass aufgrund des anatomischen Verlaufs der Ligamenta alaria und ihrer physiologischen Anspannung bei einer axialen Rotation und einer Lateralbeugung das Verletzungspotenzial bei einem Seitenaufprall erhöht sein könnte. Es wurden an 6 frischen, humanen HWS-Präparaten konsekutiv Seitenaufprälle zwischen 1 G bis maximal 4 G mit einem Schlittenmodell [22] simuliert, Endpunkt war jeweils das Auftreten struktureller Läsionen. Diese traten ausschließlich im Bereich der unteren HWS auf: In 5 Fällen kam es zum Riss der (gegenseitigen) Facettengelenkscapsel in Kombination mit Teilruptur des Diskus intervertebralis, in einem Fall riss zusätzlich die Facettengelenkscapsel der Aufprallseite. Jeweils 2 Präparate rissen auf den Höhen HWK 5/6, HWK 6/7 und HWK 7/BWK1. In 4 Fällen trat der Schaden bei einer Belastung von 2 G ein, in je einem Fall bei 3 bzw. 4 G. In keinem Fall kam es zu einer Läsion der Ligamenta alaria, sodass die Autoren die These der besonderen Verletzlichkeit der Ligamenta alaria bei seitlicher Beschleunigung als widerlegt ansehen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass diese Ergebnisse nur für streng rechtwinklig einwirkende Kräfte gelten und möglicherweise die in der Praxis häufig schräg wirkenden Kräfte nicht korrekt repräsentiert sind [21].

Es liegt eine einzige experimentelle Studie vor, in der eine direkte Verletzung der Ligamenta alaria nachgewiesen werden konnte [23]. 19 Leichenpräparate der HWS wurden mit einer speziellen Vorrichtung einem gezielten Rotationstrauma unterworfen, bei dem der Schädel mit einem Drehmomentimpuls von  $34 \text{ kg} \times \text{m}^2 / \text{s}^2$  rotiert und in der Folge im unteren Kopfgelenk um etwa  $60^\circ$  unphysiologisch nach lateral dorsal ausgelenkt wurde. Unter diesen extremen Belastungen resultierten in 10 Fällen Verletzungen der Ligamenta alaria, nämlich 4 Avulsionsfrakturen an den Occipitalkondylen und 6 Rupturen. 8 weitere Präparate wiesen unterschiedliche knöcherne Verletzungen auf, lediglich in einem Fall entstand keine Verletzung. Diese Studie wurde seinerzeit durchgeführt, um die Wertigkeit von digitaler Röntgentechnik, CT und MRT bei Verletzungen der oberen HWS zu vergleichen, es handelt sich also nicht um ein Modell zur Simulation des Schleudertraumas.

Eine schwedische Arbeitsgruppe der Universität Göteborg hat den Zusammenhang zwischen Beschleunigungsverletzungen und Nervenzellschäden tierexperimentell untersucht [24]. Ihren Arbeiten liegt die Hypothese zugrunde, dass es im Rahmen von Extensions- und Flexionsbewegungen der HWS u. a. zu Volumenänderungen des Spinalkanals kommt, sodass kurzzeitige Druckveränderungen im ZNS resultieren können. Schließlich könne es zu Nervenzellschäden durch eine mechanische Überbeanspruchung kommen. Die Hypothese wurde in einer Versuchsreihe an narkotisierten Schweinen überprüft, die vor Versuchsbeginn eine Evans-Blau Injektion als Fluoreszenzmarker erhalten hatten. Während nach einer forcierten Beschleunigung des Kopfes bei der Sektion keine makroskopischen Verletzungen wie Blutungen oder Frakturen gefunden werden konnten, zeigten die fluoreszenzmikroskopischen Untersuchungen Hinweise auf Membranschäden an Satelliten- und Nervenzellen der Spinalganglien. Druckmessungen während der Beschleunigung hatten zuvor einen deutlichen Druckgra-

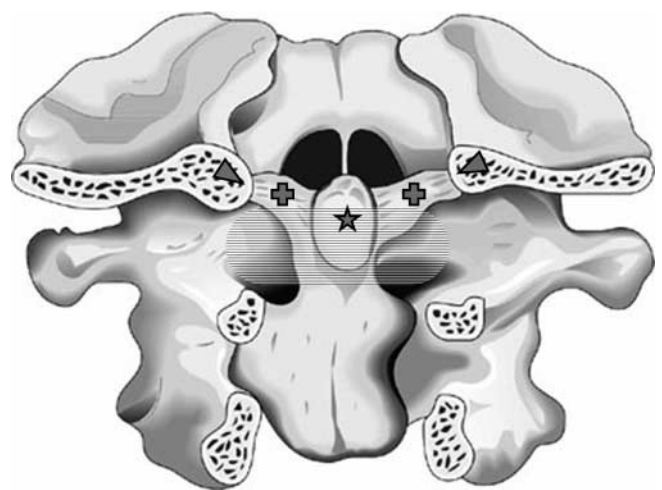
dienten im Spinalkanal gezeigt. Eine Kontrollgruppe mit ähnlichen Belastungsbedingungen bei statischer Belastung zeigte weder einen Druckgradienten noch fluoreszenzmikroskopische Hinweise auf eine Nervenzellmembrandysfunktion. Die Autoren sehen ihre Hypothese damit bestätigt, dass intraspinalen Druckschwankungen zu neuronalen Schädigungen an den Spinalganglien führen können [24].

### MRT-Studien zur Normalanatomie

Ein Schema zur Anatomie des kraniozervikalen Überganges ist in **Abb. 1** dargestellt. Die **Abb. 2–5** zeigen einen MRT-Normalbefund des kraniozervikalen Übergangs bei einer asymptomatischen Probandin anhand dünn-schichtiger protonendichtegewichteter Aufnahmen.

Die Arbeitsgruppe aus Bergen/Norwegen um J. Krakenes und B. R. Kaale hat umfassende Studien zur MRT-Anatomie der kraniozervikalen Gelenke sowohl an asymptomatischen Probanden als auch prospektiv bei Patienten (s. unten) durchgeführt. Eine abschließende Übersicht über ihre Arbeiten ist jüngst veröffentlicht worden [25].

J. Krakenes et al. haben zunächst anhand einer Probandenstudie mit 30 Freiwilligen ein Untersuchungsprotokoll zur genauen Darstellung der kraniozervikalen Übergangsregion mit der MRT etabliert (1,5-Tesla-Hochfeld-MRT Magnetom Vision®, Siemens). Im Rahmen dieser Pilotstudie testeten die Autoren 6 verschiedene Sequenzen (**Tab. 1**) zur exakten anatomischen Darstellung der Ligamenta alaria, des Ligamentum transversum atlantis, der Membrana tectoria sowie der Membrana atlantooccipitalis anterior und posterior. Als wertvollste Sequenz hat sich die protonendichtegewichtete FSE-Sequenz mit einer Schichtdicke von 2 mm in 3 Ebenen herausgestellt (genaue Parameter **Tab. 2**). Eine Fettsättigung bot Nachteile in der Abgrenzbarkeit der signalarmen und zarten, ligamentären Strukturen gegenüber dem umgebenden Fettgewebe.



**Abb. 1** Schemazeichnung des kraniozervikalen Übergangsbereiches (modifiziert nach [Muhle, Brossmann et al. 2002, in „Stellenwert bildgebender Verfahren in der Diagnostik der Ligg. alaria nach Beschleunigungsverletzung der Halswirbelsäule.“ Fortschr Röntgenstr 174: 416–422]). Ansicht von dorsal nach Wegnahme des Ligamentum cruciforme atlantis (Verlauf schraffiert angedeutet). Die Ligamenta alaria (Kreuze) verlaufen beidseits vom Dens axis (Stern) zu den Occipitalkondylen (Pfeilspitzen) und verbinden damit die Schädelbasis mit dem HWK 2 bzw. Axis.

	TI	TR	TE	Flipwinkel	Schichtdicke
T1-SE		670 ms	14 ms		2 mm
PD/T2-FSE		2200 ms	15 – 105 ms		2 mm
CISS-3-D		12,3 ms	5,9 ms	70°	1 mm
STIR	150 ms	4400 ms	30 ms		2 mm
PDE-FSE fatsat		2810 ms	15 ms		2 mm
FLASH-2-D		600 ms	10 ms	90°	2 mm

**Tab. 1** Getestete MRT-Sequenzen zur Darstellung der ligamentären Strukturen des kraniozervikalen Überganges bei Krakenes et al. [26]

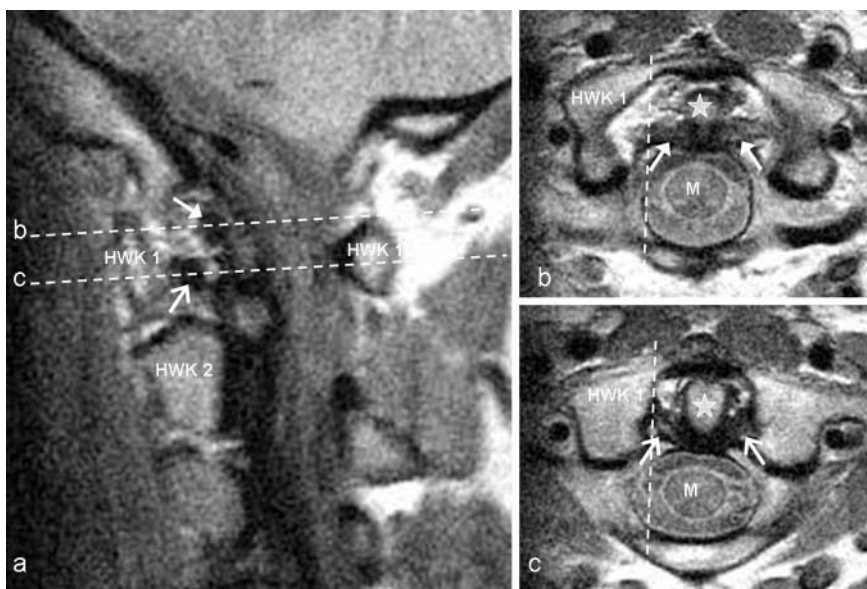
	axial	koronar	sagittal
Schichtdicke	2 mm	2 mm	2 mm
Schichtanzahl	12	12	15
TR/TE	2200/15 ms		2660/15 ms
Matrix	224 × 512		322 × 512
FOV	127 × 203 mm		184 × 210 mm
Pixelgröße	0,57 × 0,4 mm		
Akquisitionen	4		
ETL	7		
Receiver-Bandbreite	130 Hz/Pixel		
Phasenkodierung	links-rechts		kranial-kaudal
Sättiger	2 (superior, inferior)		3 (sup., inf., anterior)
Phasenoversampling	nein		ja
Messzeit	4 min 47 s	4 min 47 s	6 min 13 s

**Tab. 2** Sequenzparameter der von Krakenes et al. verwendeten PD-FSE-Sequenz [25, 26, 31, 33 – 36]

Mit den beschriebenen 2-mm-PDW-Sequenzen konnten die *Ligamenta alaria* (☉ **Abb. 2, 3**) bei allen 30 Probanden sicher identifiziert und in ihrem gesamten Verlauf von der posterolateralen Densspitze zum Condylus occipitalis beurteilt werden, sie wurden vor allem in den koronaren und sagittalen Schichten zuverlässig dargestellt. In dem untersuchten Normalkollektiv wurden folgende Varianten in Bezug auf Verlauf, Form und Signalverhalten beobachtet [26]:

Der Verlauf der Ligamente in axialer Ebene war nach posterolateral (77%), lateral (17%) oder anterolateral (6%) gerichtet. In koronarer Ansicht verliefen die *Ligamenta alaria* horizontal (73%) oder zeigten einen nach superior (17%) oder inferior (10%) gerichteten Verlauf. Sie waren homogen signalarm (20%), etwas signalanhoben mit grauer Darstellung im MRT-Bild (23%) oder sie zeigten lateral ein niedriges und nach medial zum Dens hin ein erhöhtes Signal (57%). Ihre Form wurde im

Querschnitt anhand der sagittalen Schichten bewertet. In 23% stellten sich die *Ligamenta alaria* rund dar (mittlerer Durchmesser 5,5 mm), in 54% stellten sie sich ovalär konfiguriert dar (mittlerer Durchmesser 4,5 × 6 mm), und in 23% wurde eine flügelartige Form ähnlich dem Querschnitt einer Flugzeugtragfläche beschrieben (im Mittel 4 × 8 mm). In einem Fall wurde außerdem eine Lateraldrift des Atlas um einen Millimeter beschrieben, sodass hier der Dens nicht zentriert erschien. Das *Ligamentum transversum atlantis* (☉ **Abb. 2, 4**) ließ sich optimal auf axialen und koronaren Schichten darstellen, in 26 von 30 Fällen ließ es sich in seinem gesamten Verlauf sicher identifizieren. In seinem bogigen Verlauf um den Dens herum stellte es sich abgeflacht dar. Zu seinen lateralen Insertionspunkten hin zeigte sich eine Drehung zu einer schräg horizontalen Orientierung hin mit einer sichelförmigen Darstellung am Bandansatz [26].



**Abb. 2** 37-jährige, asymptomatische Probandin. Parasagittale (a) und axiale (b, c) PDW-TSE, 2 mm Schichtdicke, TR 3500 ms (a) bzw. 3900 ms (b, c), TE 19 ms, ET 11. Schichtführungen jeweils gestrichelt eingezeichnet. In b und c Markierung des Dens axis (Stern), des Myeloms (M) und der HWK 1 und 2. Man erkennt in a und b den Verlauf der *Ligamenta alaria* (geschlossene Pfeile) sowie in a und c das *Ligamentum transversum atlantis* (offene Pfeile). Die *Ligamenta alaria* nehmen hier einen ascendierenden Verlauf, sodass sie in b nur im medialen Anteil zur Darstellung kommen, nach lateral superior hin verlassen sie die Schichtebene (☉ **Abb. 3**).

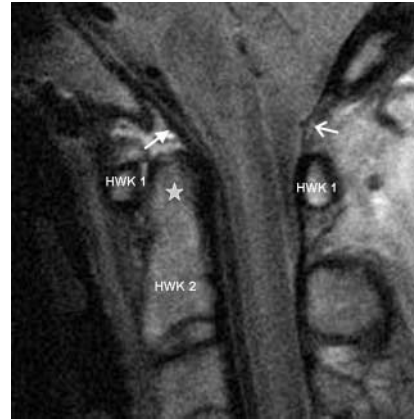




**Abb. 3** Gleiche Probandin wie in **Abb. 2**. Koronare PDW-TSE, 2 mm Schichtdicke, TR 3900 ms, TE 19 ms, ET 11. Man erkennt in diesem Beispiel den Verlauf der Ligamenta alaria nach lateral superior (geschlossene Pfeile) vom Dens axis (Stern) zu den Hinterhauptskondylen (Occ.).



**Abb. 4** Schichtführung ventral von **Abb. 3**. In dieser Schicht stellt sich das Ligamentum transversum atlantis an seinen beiden lateralen Insertionspunkten dar (offene Pfeile). Aufgrund seines nach dorsal gerichteten, bogigen Verlaufs (**Abb. 2 c**) ist es in der koronaren Schicht nicht vollständig erfasst. Die Ligamenta alaria sind in dieser Schicht nur als Partialvolumen erfasst und daher allenfalls schemenhaft erkennbar.



**Abb. 5** Gleiche Probandin wie in **Abb. 2–4**. Median-sagittale Schichtführung. Ventral stellt sich die Membrana tectoria (geschlossener Pfeil), dorsal die Membrana atlantooccipitalis posterior (offener Pfeil) dar.

Die *Membrana tectoria* (**Abb. 5**) als kraniale Fortsetzung des hinteren Längsbandes entspringt der Rückfläche des HWK 2 und verläuft in anteriorer, superiorer Richtung zum Clivus, in den sie knapp oberhalb des Foramen magnum inseriert. Auf sagittalen Schichten ließ sie sich in 26 von 30 Fällen in ihrer medialen Portion jeweils mit der Dura fusioniert darstellen. Die laterale Portion ließ sich in allen Fällen darstellen, sie wurde in den inferioren Anteilen von der Dura durch eine feine Fettschicht getrennt, während sie oberhalb des Niveaus der Ligamenta alaria auch lateralseitig mit der Dura verschmolz. Auf den korrespondierenden axialen Schichten zeigte sich dennoch in 14 Fällen in den oberen Anteilen eine feine Fettschicht zwischen Dura und Membrana tectoria [26].

Die *Membrana atlantooccipitalis posterior* (**Abb. 5**) ließ sich auf sagittalen Schichten darstellen, in der Hälfte aller Fälle stellte sie sich mit der Dura fusioniert dar. Die *Membrana atlantooccipitalis anterior* ließ sich nicht adäquat darstellen [26].

In einer Arbeit einer anderen Gruppe wurde an 22 jungen, klinisch asymptomatischen Probanden (22–33 Jahre) die Darstellung der Ligamenta alaria mit protonendichtegewichteten Sequenzen an einem 1,5-Tesla-MR-Tomografen (Signa Advantage Horizon®, General Electric) [27] untersucht. Es wurden 2 mm dicke Schichten in axialer und koronarer Orientierung gewählt, zusätzlich wurden schräg koronare 5-mm-Bilder in Links- und

Rechtsrotation akquiriert. Die Ligamenta alaria stellten sich in koronarer Schichtung immer, in axialer Schichtung in etwa  $\frac{2}{3}$  der Fälle dar. Die Rotation verändert die Darstellbarkeit in der koronaren Schichtung nicht, jedoch fanden sich teilweise morphologische Veränderungen wie eine scheinbare Bandverkürzung. Die gemessenen axialen Rotationswinkel zwischen HWK 1 und 2 werden mit  $38^\circ \pm 8^\circ$  bzw.  $35^\circ \pm 7^\circ$  für die Rechts- bzw. Linksrotation angegeben. Eine weitergehende Analyse des Signalverhaltens der Ligamenta alaria oder eventueller Variationen in der Darstellung erfolgte in dieser Studie nicht.

Pfarrmann et al. aus Zürich haben 2 Probandenstudien veröffentlicht, in denen sie bei 50 Gesunden die Variabilität der Ligamenta alaria bzw. des kraniocervikalen Übergangs untersucht haben [28, 29]. Sie haben ihre Untersuchungen an einem 1,0-Tesla-Hochfeld-MR-Tomografen (Magnetom Impact®, Siemens) mit einer HWS-Spule durchgeführt, die verwendeten Sequenzen waren koronare T1w-SE mit 3 und 4 mm Schichtdicke, koronare T2w (4 mm Schichtdicke) sowie axiale T1w (3 mm Schichtdicke). Sie konnten nur 80 von 100 untersuchten Ligamenta alaria sicher identifizieren bzw. bei einem Fünftel der Probanden gelang keine ausreichende Visualisierung. Darüber hinaus konnten die Autoren zwischen horizontalen, ascendierenden und descendierenden Faserverläufen differenzieren. In  $\frac{4}{5}$  der Fälle stellten sich die Flügelbänder asymmetrisch dar, in  $\frac{1}{4}$  der Fälle fand sich eine laterale Densdeviation, weiter fanden sich häufig Asymmetrien in den Kraniocervikalgelenken („C0/C1“) oder den Facettengelenken zwischen HWK 1 und 2 („C1/C2“). Flüssigkeitsansammlungen wurden im Bereich C0/C1 (4%) sowie im Bereich C1/C2 (bis 48%) beschrieben. Die Autoren folgern daraus, dass strukturelle Normvarianten im Bereich der Ligamenta alaria häufig bei asymptomatischen Probanden darstellbar sind, sodass diese Befunde kaum als Hinweis auf eine Ursache für die Beschwerden von symptomatischen Patienten angesehen werden können [29]. Ebenfalls gebe es häufig Unterschiede in der Rechts-/Linksrotationsfähigkeit bei asymptomatischen Probanden, sodass auch dieses Kriterium für die Diagnose von Weichteilläsionen am kraniocervikalen Übergang nach einem Schleudertrauma ungeeignet sei [28].

In einer Probandenstudie mit 15 asymptomatischen Freiwilligen zwischen 21 und 27 Jahren haben Roy et al. von der Universität Oslo die Darstellbarkeit der Ligamenta alaria mit einem offenen 0,5-Tesla-Kernspintomografen (Signa SP-2®, General Electric) untersucht [30]. An 5 der Probanden wurden zusätzlich Vergleichsuntersuchungen an einem 1,5-Tesla-Gerät entsprechend dem von Krakenes et al. etabliertem Protokoll [26] durchgeführt. 2 Radiologen werteten die Darstellung sowie Signalveränderungen der

Ligamenta alaria in Anlehnung an die Patientenstudie von Krakenes et al. [31] aus (s. unten). Zusammenfassend ließen sich die Ligamenta alaria zwar zuverlässig darstellen, jedoch ergaben sich in der Graduierung der Bandläsionen bzw. Signalveränderungen nur mäßige Interobserverkorrelationen von 0,44 bzw. 0,40 für koronare bzw. sagittale Aufnahmen. Der Vergleich der unterschiedlichen Feldstärken erbrachte eine unbefriedigende Korrelation mit einem statistischen Fehler von 0,25 (koronar) bzw. 0,14 (sagittal). Die Intraobserverkorrelationen werden ebenfalls als zu niedrig angesehen.

Die Autoren schlussfolgern, dass die MRT zur Diagnostik feiner Verletzungen der Ligamenta alaria nicht die Modalität der ersten Wahl sei.

### MRT-Studien: Untersuchungen an Patienten mit chronischen Beschwerden nach Schleudertrauma

In einer 2001 veröffentlichten Studie haben Wilmink und Pateijn von der Universität Maastricht 12 Patienten mit chronischem Beschwerdebild bei länger als 6 Monate zurückliegendem Schleudertrauma untersucht und mit einer Kontrollgruppe von 6 asymptomatischen Probanden verglichen [32]. Sie haben sämtliche Untersuchungen an einem 0,5-Tesla-Gerät (Philips T5 II®) mit Kopfspule durchgeführt, es wurden PD/T2 gewichtete Doppelsequenzen in 3 mm koronarer Schichtführung akquiriert. Zwar konnten die Flügelbänder immer identifiziert werden, jedoch wurden schlechte Inter- und Intraobserverkorrelationen ermittelt. Anhand der MRT-Untersuchungen konnte in der geblindeten Auswertung nicht zwischen Patienten und Kontrollen unterschieden werden.

Krakenes und Kaale (Bergen) haben ein Kollektiv von 92 prospektiv erfassten Patienten untersucht, welche zwischen 2 und 9 Jahre zuvor ein Schleudertrauma erlitten hatten und die 3 Monate nach dem Unfall unter Schmerzen, Bewegungseinschränkung und Verspannung litten. Röntgenaufnahmen unmittelbar nach Trauma hatten jeweils einen Normalbefund ergeben [25, 31, 33–36]. Läsionen der ligamentären Strukturen wurden anhand einer 4-Punkte-Skala definiert (Grad 0–3). Dabei lag bei der Beurteilung der Ligamenta alaria und des Ligamentum transversum der Flächenanteil mit Signalsteigerungen an der gesamten Querschnittsfläche als Kriterium zugrunde. Bei den bindegewebigen Membranen wurde die Einteilung anhand einer Ausdünnung oder einer Konturunterbrechung vorgenommen.

Die Autoren konnten für alle Strukturen Unterschiede zwischen Fall- und Kontrollgruppe herausarbeiten, zweit- oder drittgradige Läsionen wurden nur selten in der Kontrollgruppe beobachtet. Ihre Frequenz in der Fallgruppe unterschied sich jeweils signifikant von der in der Kontrollgruppe, am deutlichsten für die Ligamenta alaria ( $p < 0,001$ ) [31], in absteigender Reihenfolge für die Membrana atlantooccipitalis posterior ( $p = 0,014$ ) [35], die Membrana tectoria ( $p = 0,016$ ) [35] und das Ligamentum transversum ( $p = 0,044$ ) [36].

Die höhergradigen Läsionen der Ligamenta alaria fanden sich signifikant häufiger bei solchen Patienten, die während des Unfalls den Kopf in gedrehter Position hielten, dieser Effekt trat bei Heckkollisionen stärker als bei Frontkollisionen zutage [34]. Höhergradige Läsionen des Ligamentum transversum oder der Membrana atlantooccipitalis traten bei Frontalzusammenstößen häufiger als beim Heckaufprall auf [34].

Bei allen Probanden und Patienten wurde ein „neck disability index (NDI) score“ ermittelt. Anhand dessen konnte ebenfalls

zwischen Fall- und Kontrollgruppe unterschieden werden. Zusätzlich korrelierten innerhalb der Fallgruppe die NDI-Scores mit den MRT-Graduierungen für Läsionen der Ligamenta alaria [33]. Die Autoren schlossen daraus, dass die beobachteten Läsionen insbesondere der Ligamenta alaria auf das Schleudertrauma zurückzuführen seien [25].

Eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der anatomischen Probanden- und Patientenstudien findet sich in **Tab. 3**.

### MRT-Studien: Funktionsuntersuchungen

Mitte der 80er-Jahre wurden von Dvorak und Penning CT-Untersuchungen entwickelt, die anhand einer Bewegungsanalyse der oberen Kopf- und Halsgelenke unter der Vorstellung einer funktionellen Schädigung der Flügelbänder und der benachbarten Bandstrukturen deren Schädigung beweisen sollten [37–39]. Mit diesen Untersuchungen wurden die jeweiligen Absolutwerte für eine maximale Rechts- und Linksrotation sowie deren Differenzwerte in den Segmenten C0/C1, C1/C2 und C2/C3 bestimmt. In der Folge wurden von Antinnes et al. in einer Patientenuntersuchung ( $n = 423$ ) physiologische und pathologische Referenzwerte für die Rotation angegeben [40], die jedoch im Widerspruch zu nachfolgenden MRT-Probandenstudien stehen: So zeigten in der Studie von Pfirrmann et al. [28] in Höhe C0/C1 24% und in Höhe C1/C2 31% der asymptomatischen Probanden Werte, die entsprechend den oben genannten Referenzen als pathologisch im Sinne einer kraniozervikalen Instabilität hätten gewertet werden müssen. Ferner konnte Pfirrmann zeigen, dass paradoxe Rotationen mit gegenläufigen Drehungen des 1. HWK gegenüber der Schädelbasis sowie „Blockierungen“ mit fast aufgehobener Bewegung im Segment C0/C1 regelhaft auch in einem Normalkollektiv auftreten [28].

2 Studien aus den Jahren 1992 [41] und 1995 [42] beschreiben die Durchführbarkeit von Funktionsuntersuchungen bzw. Flexions- und Extensionsaufnahmen in der MRT. In einigen Fällen konnten damit Bandscheibenprotrusionen in Funktionshaltung nachgewiesen werden [42].

Zwischen 1996 und 2001 erschienen 3 Artikel über Funktionsuntersuchungen im MRT, zuletzt als „Videodiagnose“ bezeichnet, mit deren Hilfe Rupturen oder Teilrupturen der Flügelbänder auch indirekt nachzuweisen seien [43–45]. Der Autor beschreibt in einer ersten Veröffentlichung seine Methode, mit der an einem 0,2-Tesla-Niederfeld-MR-Gerät (Magnetom Open®, Siemens) Patienten in Neutralstellung und in Seitneigung untersucht [43]. In der Folgeveröffentlichung stellt er 95 Patienten vor, von denen er in 73% der Fälle Strukturläsionen der Ligamenta alaria im Sinne einer Ruptur oder Teilruptur beschreibt [44]. Seine weiteren Publikationen beschreiben Kollektive von 200 [45] bzw. 420 [46] Patienten, bei denen in 38 bzw. 36% eine Instabilität im kraniozervikalen Übergang vorliegen soll. Als diagnostisches Kriterium wird eine „Videodiagnose“ angegeben, mittels der eine funktionelle Einengung des Spinalkanals nur in der Rotationsstellung aufgedeckt werden könne.

Die letzten 3 genannten Studien weisen aus wissenschaftlicher Sicht allerdings erhebliche Mängel auf: Es fehlen jegliche Angaben zur Auswertung, zur Zahl der Observer sowie zur Inter- und Intraobserverreliabilität. Es liegen keine Kontrollgruppen vor. Die Kriterien für Strukturläsionen der Flügelbänder sind nur vom Autor selbst beobachtet und zuvor beschrieben worden, die entsprechende Arbeit lässt sich jedoch weder unter

**Tab. 3** Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse aktueller Originalarbeiten zu den Ligamenta alaria in Probanden- und Patientenuntersuchungen

Autor	Jahr	Journal	Methodik	Ergebnisse	Einschränkungen
Pfirschmann et al.	2001	Radiology	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 50 gesunde Probanden</li> <li>- 1T-MRT</li> <li>- T 1w axial (3 mm Schichtdicke), T 1w-SE koronar (3 und 4 mm Schichtdicke), T 2w koronar (4 mm Schichtdicke)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ligamenta alaria nur in 80 % sicher identifiziert</li> <li>- variable Faserverläufe: horizontal, ascendierend und descendierend</li> <li>- in 80 % Ligamenta alaria asymmetrisch</li> <li>- in 25 % laterale Densdeviation</li> <li>- häufig Asymmetrien in den Kraniozervikalgelenken oder den Facetengelenken HWK 1 / 2 sowie Flüssigkeitsansammlungen in den Gelenkspalten (4 bzw. 48 %)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1T-MRT</li> <li>- keine sagittalen Schichten</li> </ul>
Krakenes et al.	2001	Neuroradiology	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 30 gesunde Probanden</li> <li>- 1,5T-MRT</li> <li>- PDw-FSE (2 mm Schichtdicke) in 3 Ebenen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ligamenta alaria in allen Untersuchungen sicher identifiziert, optimal dargestellt mit sagittalen und koronaren Schichten</li> <li>- variable Faserverläufe: posterolateral, lateral oder anterolateral (axiale Schichtung); horizontal, nach superior oder inferior (koronare Schichtung)</li> <li>- variable Signalcharakteristika: homogen signalarm, etwas signalangehoben/grau oder lateral niedriges und nach medial erhöhtes Signal</li> <li>- variable Form: rund, ovalär oder flügelartig</li> </ul>	
Kim et al.	2002	Skeletal Radiol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 22 gesunde Probanden</li> <li>- 1,5T-MRT</li> <li>- PDw axial und koronar (2 mm Schichtdicke)</li> <li>- zusätzlich schräg koronare Schichten (5 mm) in Rotation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Darstellung der Ligamenta alaria in 66 % (axial) bzw. 100 % (koronar)</li> <li>- in Rotation Veränderungen der Morphologie möglich: Z. T. scheinbare Bandverkürzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine sagittalen Schichten</li> <li>- keine Analyse des Signalverhaltens der Ligamenta alaria</li> </ul>
Roy et al.	2004	Neuroradiology	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 15 gesunde Probanden</li> <li>- 0,5T-MRT</li> <li>- PDw und T 2w-FSE (3 mm Schichtdicke) in 3 Ebenen</li> <li>- zusätzlich bei 5 Probanden Zweituntersuchung bei 1,5T</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Darstellung der Ligamenta alaria in 93 %</li> <li>- Analyse der Signalcharakteristika: mäßige Kappawerte</li> <li>- Vergleich 0,5T-1,5T: schlechte Kappawerte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0,5T-MRT</li> </ul>
Wilmink et al.	2001	Neuroradiology	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 12 Patienten, Kontrollgruppe mit 6 Probanden</li> <li>- 0,5T-MRT</li> <li>- PD/T2 Doppellecho koronar (3 mm Schichtdicke)</li> <li>- (axiale Schichten akquiriert, nicht ausgewertet)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ligamenta alaria immer identifiziert, Bewertung von Läsionen mit 4-Punkte-Skala, schlechte Kappawerte. Unterscheidung zwischen Fall- und Kontrollgruppe anhand der MRT nicht möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 0,5T-MRT</li> <li>- nur eine Schichtebene ausgewertet</li> </ul>
Krakenes et al.	2002	Neuroradiology	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 92 Patienten, Kontrollgruppe mit 30 gesunden Probanden</li> <li>- 1,5T-MRT</li> <li>- PDw-FSE (2 mm Schichtdicke) in 3 Ebenen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bandläsionen anhand 4-Punkteskala definiert, höhergradige Läsionen in Traumagruppe signifikant häufiger</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kriterien basieren auf subtilen Veränderungen, die schwer zu reproduzieren sind bzw. genaue Einarbeitung erfordern</li> </ul>

dem angegebenen Zitat noch mittels einer erweiterten Recherche auffinden. Das Bildmaterial in der Publikation ist spärlich und nicht überzeugend.

Der Autor beschreibt für die „Videodiagnose“ Kriterien, die weder in der Literatur vorbeschrieben, noch anhand von Normalkollektiven bzw. Probandenstudien etabliert worden sind, wiederum fehlen Kontrollgruppen. Die verwendeten diagnostischen Konzepte sind somit nicht stimmig. Die identischen Abbildungen in den Publikationen [45, 46] legen zudem die Vermutung nahe, dass es Überschneidungen im Patientenkollektiv gibt.

Zuletzt ist 2006 ein Fallbericht eines schwedischen Autors erschienen [47], in dem von 3 offensichtlich ebenfalls vom o.g. Autor selbst untersuchten Patienten mit angeblicher kraniozervikaler Instabilität berichtet wird, sodass diese Publikation nicht als unabhängiger Beleg herangezogen werden kann.

In diesem Zusammenhang muss erwähnt werden, dass mit den hier beschriebenen diagnostischen Methoden in einer erheblichen Anzahl von Fällen die Indikation für eine ebenfalls umstrittene chirurgische Versteifungsoperation der Kopfgelenke gestellt wird [46, 48, 49]. Die beschriebenen Methoden scheinen in Skandinavien eine heftige Debatte ausgelöst zu haben,



**Abb. 6** Koronare T2w-TSE (Siemens Magnetom Symphony®, 2 mm Schichtdicke, TR 3980 ms, TE 115 ms, ET 7). 21-jährige Patientin. Schweres Schleudertrauma im Rahmen eines Auffahrunfalls. Riss des rechten Ligamentum alare (Pfeil), Flüssigkeit im Bereich des C0–C2 Gelenkes, Flüssigkeitsübertritt in das paravertebrale Weichteil rechts. Eine Avulsionsfraktur am linken Condylus occipitalis (☉ Abb. 7) kommt in der MRT nicht sicher zur Darstellung.

denn als Reaktion auf die oben zitierten Arbeiten [47, 49] sind in einer norwegischen Übersichtsarbeit sowohl die „funktionelle MRT“ (Funktionsuntersuchungen im MRT) und vor allem die operative kraniozervikale Fixation heftig kritisiert worden [50].

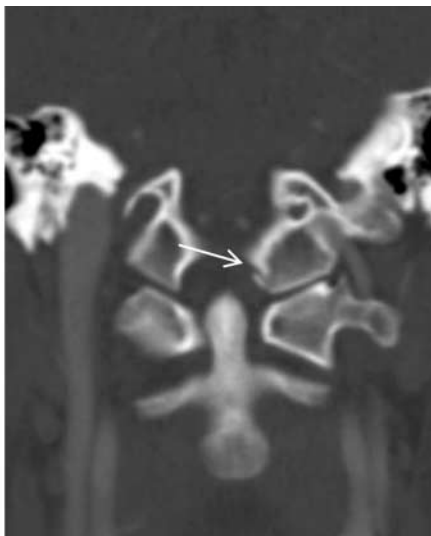
In einem kritischen Literaturüberblick zur Bildgebung der Ligamenta alaria nach Schleudertrauma wird davor gewarnt, MRT-Befunde bei Patienten mit Schleudertrauma überzubewerten [51]. Mit Ausnahme einer offensichtlichen Zerreißung (☉ Abb. 6, 8) oder einer Avulsionsfraktur (☉ Abb. 7) der Ligamenta alaria halten die Autoren sämtliche anderen Kriterien wie unterschiedliche Faserverläufe, Signalschwankungen, fehlende Abgrenzbarkeit, Asymmetrien oder Flüssigkeitsansammlungen für nicht aussagekräftig, da sie auch als Normvarianten zu finden sind. Die Kriterien für funktionelle Untersuchungen, meist Untersuchungen zur Ermittlung des möglichen Rotationsumfangs, halten die Autoren für nicht konsistent, sodass

sie zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung derartige Behandlungen ablehnen [51].

## Diskussion



Saternus konnte 1987 in der bisher einzigen, autoptischen Untersuchung zeigen, dass eine Verletzung der Ligamenta alaria im Rahmen schwerer Traumata möglich ist [52]. Er untersuchte 31 Unfallopfer, davon 30 mit unterschiedlich schwerer Schädelbeteiligung vom Kopfschwartenhämatom bis zum Bertschungsbruch des Schädels. Er fand in 11 Fällen eine Ruptur oder Unterblutung der Flügelbänder, konnte jedoch keine Beziehung zwischen der Massivität der Schädelverletzung und dem Ausmaß einer Schädigung der Ligamenta alaria herstellen. So konnten die Flügelbänder sowohl bei umfangreichen knöchernen Verletzungen des Schädels unbeteiligt sein als auch bei reinen Weichteiltraumata wie Platzwunden verletzt sein. Die Bandzerreißen waren zwar überwiegend an die schwersten Gesamtbefunde gebunden, dagegen stellten in 3 Fällen die Verletzungen der Flügelbänder (in diesem Fall jeweils Unterblutungen) die alleinige Verletzung der HWS dar. Die oben zitierten Untersuchungen zur Biomechanik beim Beschleunigungstrauma der HWS deuten jedoch darauf hin, dass bei dieser Verletzung die Ligamenta alaria nicht betroffen sind. Allerdings bleibt zu beachten, dass es sich bei den Versuchsaufbauten letztlich nur um eine Annäherung an die Wirklichkeit handeln kann, da z.B. der Einfluss des muskulären Stütz- und Halteapparates noch nicht simuliert werden konnte. Die Ergebnisse der Druckmessungen im Spinalkanal bei forcierter Belastung im Tierversuch [24] legen jedoch die Vermutung nahe, dass andere Faktoren, z.B. Strukturveränderungen der peripheren Nerven einen wesentlich größeren Einfluss auf die Entstehung des bekannten Beschwerdebildes haben könnten. Entsprechend heißt es auch in den aktuellen Leitlinien der Deutschen Gesellschaft für Neurologie, dass „eine Verletzung der Ligamenta alaria nach neueren Erkenntnissen in der Vergangenheit überbewertet worden sei. Eine unmittelbare Beteiligung des Gehirns im Sinne eines sogenannten zervikozephalen Syndroms sei durch methodisch strenge Untersuchungen nicht zu stützen. Vielmehr scheinen hier Korrelate des Schmerzerlebens, -verarbeitens und -verhaltens sowie andere erlebnisreaktive Momente eine führende Rolle zu spielen.“ [53]



**Abb. 7** Sagittale und koronare CT-Rekonstruktion. Gleiche Patientin wie in ☉ Abb. 6. Knöcherner Ausriss des linken Ligamentum alare am Condylus occipitalis im Sinne einer Avulsionsfraktur mit chipförmigem Fragment (Pfeile).





**Abb. 8** Sagittale T2w-TSE (3 mm Schichtdicke, TR 2630 ms, TE 107 ms, ET 13). Gleiche Patientin wie in **Abb. 6, 7**. Begleitend Ruptur der Membrana tectoria (schwarze Pfeile), der Membrana atlantooccipitalis posterior (Pfeilspitzen) und ausge-dehntes prävertebrales Hämatom (weiße, offene Pfeile).

Vor diesem Hintergrund sollten die vorgestellten Ergebnisse der Schnittbilddiagnostik grundsätzlich kritisch betrachtet werden, wenn lediglich strukturelle Läsionen oder fragliche Teilrupturen der Ligamenta alaria zur Erklärung für ein chronisches Beschwerdebild nach einer Beschleunigungsverletzung der HWS herangezogen werden sollen. Die Existenz von Ligamenta-alaria-Verletzungen konnte von Saturnus zwar belegt werden [52], jedoch darf nicht außer Acht gelassen werden, dass er ausschließlich schwere Unfälle mit Todesfolge untersucht hat. So ist auch in den beschriebenen Fällen mit bloßer Weichteilverletzung von einer erheblichen Bewegungsenergie im Rahmen des Unfalls auszugehen.

Die genaue anatomische Darstellung der Ligamenta alaria scheint mit modernen Hochfeld-MRT-Geräten grundsätzlich möglich zu sein. Krakenes et al. konnten in ihrer Studie [26] überzeugendes Bild- und Datenmaterial liefern. So ist man geneigt, bei Studien wie z. B. von Wilmink et al. [32] die unbefriedigenden Ergebnisse (in diesem Fall konnte man mittels MRT nicht zwischen Patienten- und Kontrollgruppe unterscheiden) mit der offensichtlich eingeschränkten Bildqualität zu erklären: In dieser Studie wurde ein 0,5-T-Gerät verwendet, mit dem lediglich koronare Schichten akquiriert wurden. Die exakte anatomische Darstellung der Ligamenta alaria gelingt heute zuverlässig bei Geräten mit Feldstärken von mehr als 1,0-Tesla. Selbst in Arbeiten mit Geräten geringerer Feldstärke stellte die Visualisierung der Ligamenta alaria offensichtlich kein größeres Problem dar. Lediglich bei Pfirrmann et al. [29] wird ein hoher Anteil von 20% der Fälle mit unzureichender Abgrenzbarkeit der Flügelbänder beschrieben.

Problematisch ist die Interpretation der Signalveränderungen der Ligamenta alaria. Krakenes et al. liefern als einzige Arbeitsgruppe überzeugende Ergebnisse [25, 31, 33–36]. Offenbar ist aber eine detaillierte Einarbeitung erforderlich, um die subtilen Veränderungen überhaupt zu erkennen. Die von dieser Arbeitsgruppe dargestellten Kriterien sind komplex und beruhen auf subtilen Veränderungen, die in einer Routinediagnostik leicht übersehen werden können. Zu diesem Ergebnis kommen auch Roy et al. [30], die bewusst die Methoden der Bergener Arbeitsgruppe unter vereinfachten, wie sie sagen in der Praxis realistischeren Bedingungen kopiert und keine überzeugenden Ergebnisse erhalten haben. Sie haben gleichzeitig – an einem sehr kleinen Patientenkollektiv – Untersuchungen an MRT-Geräten mit geringer und hoher Feldstärke verglichen und konnten zeigen, dass mit verbesserter Bildqua-

lität die diagnostische Unsicherheit eher zunimmt, da bei höherem Signal-Rausch-Verhältnis mehr intraligamentäre Signalalterationen sichtbar wurden [30].

Die große Bandbreite von unterschiedlichen Faserverläufen und von intraligamentären Signalveränderungen, wie sie vor allem von Pfirrmann [29] beschrieben worden ist, scheinen eine Unterscheidung von posttraumatischen Veränderungen und physiologischen Normvariationen erheblich zu erschweren. Inwieweit eine verbesserte Darstellung mit neuen Geräten oder Sequenzparametern diese Einschränkungen überwinden kann, bleibt abzuwarten und sollte mit weiteren Studien evaluiert werden. Bis dahin muss unserer Meinung nach die von Roy beschriebene diagnostische Unsicherheit mit Verbesserung der Visualisierung ebenso wie die weiterhin fragliche Relevanz einer Flügelbandläsion im Rahmen des Symptomenkomplexes „Schleudertrauma“ zu einer vorsichtigen Interpretation führen. Überdies kommt noch hinzu, dass eine direkte Inspektion der Flügelbänder beim Lebenden auch intraoperativ nicht möglich ist, sodass Schnittbildbefunde nicht pathoanatomisch korreliert werden können. Dieser Sachverhalt sollte auch in der gutachterlichen Tätigkeit berücksichtigt werden. Die beschriebenen „funktionellen MRT-Darstellungen“ (Funktionsuntersuchungen der HWS) haben aufgrund der widersprüchlichen, wissenschaftlich unzureichenden Untersuchungsergebnisse in Ermangelung ihrer Reproduzierbarkeit keinen diagnostischen Wert.

#### Literatur

- 1 Castro W. Haftungsrechtliche und medizinische Überlegungen zum HWS-Schleudertrauma. Dtsch Ärztebl 1998; 95: 3285–3286
- 2 Grifka J, Hedtmann A, Pape HG et al. Beschleunigungsverletzung der Halswirbelsäule. Der Orthopäde 1998; 27: 802–812
- 3 Spitzer WO, Skovron ML, Salmi LR et al. Scientific monograph of the Quebec Task Force on Whiplash-Associated Disorders: redefining „whiplash“ and its management. Spine 1995; 20: 15–73S
- 4 Ferrari R, Lang C. A cross-cultural comparison between Canada and Germany of symptom expectation for whiplash injury. J Spinal Disord Tech 2005; 18: 92–97
- 5 Ferrari R, Russell AS, Richter M. Epidemiologie der HWS-Beschleunigungsverletzung. Ein internationales Dilemma. Der Orthopäde 2001; 30: 551–558
- 6 Turowski B, Schellhammer F, Roth S. Zervikale Liquoristel nach Schleudertrauma – Behandlung mittels CT-gesteuerter Eigenblutinjektion. Fortschr Röntgenstr 2006; 178: 237–239
- 7 Stäbler A, Eck J, Penning R et al. Cervical spine: postmortem assessment of accident injuries – comparison of radiographic, MR imaging, anatomic, and pathologic findings. Radiology 2001; 221: 340–346
- 8 Bagley IJ. Imaging of spinal trauma. Radiol Clin North Am 2006; 44: 1–12, vii
- 9 Van Geothem JW, Biltjes IG, van den Hauwe L et al. Whiplash injuries: is there a role for imaging? Eur J Radiol 1996; 22: 30–37
- 10 Schröder RJ, Vogl T, Hidajat N et al. Vergleich der diagnostischen Bedeutung von CT und MRT bei Halswirbelsäulenverletzungen. Aktuelle Radiol 1995; 5: 197–202
- 11 Meydam K, Sehlen S, Schlenkhoff D et al. Kernspintomographische Befunde beim Halswirbelsäulen trauma. Fortschr Röntgenstr 1986; 145: 657–660
- 12 Rothhaupt D, Liebig K. Diagnostik, Analyse und Bewertung von Funktionsstörungen der oberen HWS im Rahmen von Beschleunigungsverletzungen unter Einsatz der Kernspintomographie. Der Orthopäde 1994; 23: 278–281
- 13 Macnab I. Whiplash injuries of the neck. Manin Med Rev 1966; 46: 172–174
- 14 Nygren A, Gustafsson H, Tingvall C. Effects of different types of headrests in rear-end collisions. 10th Internat Conference on Experimental Safety Vehicles. USA: NHTSA, 1985: 85–90
- 15 Panjabi MM, Cholewicki J, Nibu K et al. Biomechanik des Beschleunigungstraumas. Der Orthopäde 1998; 27: 813–819

- 16 *Panjabi MM, Cholewicki J, Nibu K et al.* Mechanism of whiplash injury. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 1998; 13: 239–249
- 17 *Panjabi MM, Cholewicki J, Nibu K et al.* Simulation of whiplash trauma using whole cervical spine specimens. *Spine* 1998; 23: 17–24
- 18 *Panjabi MM, Abumi K, Duranceau J et al.* Biomechanical evaluation of spinal fixation devices: II. Stability provided by eight internal fixation devices. *Spine* 1988; 13: 1135–1140
- 19 *Maak TG, Tominaga Y, Panjabi MM et al.* Alar, transverse, and apical ligament strain due to head-turned rear impact. *Spine* 2006; 31: 632–638
- 20 *Castro WH, Schilgen M, Meyer S et al.* Do „whiplash injuries“ occur in low-speed rear impacts? *Eur Spine J* 1997; 6: 366–375
- 21 *Hartwig E, Kettler A, Schultheiss M et al.* In vitro low-speed side collisions cause injury to the lower cervical spine but do not damage alar ligaments. *Eur Spine J* 2004; 13: 590–597
- 22 *Kettler A, Schmitt H, Simon U et al.* A new acceleration apparatus for the study of whiplash with human cadaveric cervical spine specimens. *J Biomech* 2004; 37: 1607–1613
- 23 *Obenauer S, Herold T, Fischer U et al.* Evaluation experimentell erzeugter Verletzungen der oberen Halswirbelsäule mit digitaler Röntgentechnik, Computertomographie und Magnetresonanztomographie. *Fortschr Röntgenstr* 1999; 171: 473–479
- 24 *Svensson MY, Aldman B, Bostrom O et al.* Nervenzellschaden bei Schleudertraumen. Tierexperimentelle Untersuchungen. *Der Orthopäde* 1998; 27: 820–826
- 25 *Krakenes J, Kaale BR.* Magnetic resonance imaging assessment of craniocervical ligaments and membranes after whiplash trauma. *Spine* 2006; 31: 2820–2826
- 26 *Krakenes J, Kaale BR, Rorvik J et al.* MRI assessment of normal ligamentous structures in the craniocervical junction. *Neuroradiology* 2001; 43: 1089–1097
- 27 *Kim HJ, Jun BY, Kim WH et al.* MR imaging of the alar ligament: morphologic changes during axial rotation of the head in asymptomatic young adults. *Skeletal Radiol* 2002; 31: 637–642
- 28 *Pfirrmann CW, Binkert CA, Zanetti M et al.* Functional MR imaging of the craniocervical junction. Correlation with alar ligaments and occipito-atlantoaxial joint morphology: a study in 50 asymptomatic subjects. *Schweiz Med Wochenschr* 2000; 130: 645–651
- 29 *Pfirrmann CW, Binkert CA, Zanetti M et al.* MR morphology of alar ligaments and occipitoatlantoaxial joints: study in 50 asymptomatic subjects. *Radiology* 2001; 218: 133–137
- 30 *Roy S, Hol PK, Laerum LT et al.* Pitfalls of magnetic resonance imaging of alar ligament. *Neuroradiology* 2004; 46: 392–398
- 31 *Krakenes J, Kaale BR, Moen G et al.* MRI assessment of the alar ligaments in the late stage of whiplash injury – a study of structural abnormalities and observer agreement. *Neuroradiology* 2002; 44: 617–624
- 32 *Wilmink JT, Patijn J.* MR imaging of alar ligament in whiplash-associated disorders: an observer study. *Neuroradiology* 2001; 43: 859–863
- 33 *Kaale BR, Krakenes J, Albrektsen G et al.* Whiplash-associated disorders impairment rating: neck disability index score according to severity of MRI findings of ligaments and membranes in the upper cervical spine. *J Neurotrauma* 2005; 22: 466–475
- 34 *Kaale BR, Krakenes J, Albrektsen G et al.* Head position and impact direction in whiplash injuries: associations with MRI-verified lesions of ligaments and membranes in the upper cervical spine. *J Neurotrauma* 2005; 22: 1294–1302
- 35 *Krakenes J, Kaale BR, Moen G et al.* MRI of the tectorial and posterior atlanto-occipital membranes in the late stage of whiplash injury. *Neuroradiology* 2003; 45: 585–591
- 36 *Krakenes J, Kaale BR, Nordli H et al.* MR analysis of the transverse ligament in the late stage of whiplash injury. *Acta Radiol* 2003; 44: 637–644
- 37 *Penning L, Wilmink JT.* Rotation of the cervical spine. A CT study in normal subjects. *Spine* 1987; 12: 732–738
- 38 *Dvorak J, Hayek J.* Diagnostik der Instabilität der oberen Halswirbelsäule mittels funktioneller Computertomographie. *Fortschr Röntgenstr* 1986; 145: 582–585
- 39 *Dvorak J, Penning L, Hayek J et al.* Functional diagnostics of the cervical spine using computer tomography. *Neuroradiology* 1988; 30: 132–137
- 40 *Antinnes JA, Dvorak J, Hayek J et al.* The value of functional computed tomography in the evaluation of soft-tissue injury in the upper cervical spine. *Eur Spine J* 1994; 3: 98–101
- 41 *Nägele M, Koch W, Kaden B et al.* Dynamische Funktions-MRT der Halswirbelsäule. *Fortschr Röntgenstr* 1992; 157: 222–228
- 42 *Schnarkowski P, Weidenmaier W, Heuck A et al.* MR-Funktionsdiagnostik der Halswirbelsäule nach Schleudertrauma. *Fortschr Röntgenstr* 1995; 162: 319–324
- 43 *Volle E, Kreisler P, Wolff HD et al.* Funktionelle Darstellung der Ligamenta alaria in der Kernspintomographie. *Man Med* 1996; 34: 9–13
- 44 *Volle E, Montazem A.* Strukturdefekte der Ligamenta alaria in der offenen Funktionskernspintomographie. *Man Med* 1997; 35: 188–193
- 45 *Volle E.* Functional magnetic resonance imaging – video diagnosis of soft-tissue trauma to the craniocervical joints and ligaments. *Int Tinnitus J* 2000; 6: 134–139
- 46 *Volle E, Montazem A.* MRI video diagnosis and surgical therapy of soft tissue trauma to the craniocervical junction. *Ear Nose Throat J* 2001; 80: 41–44, 46–48
- 47 *Johansson BH.* Whiplash injuries can be visible by functional magnetic resonance imaging. *Pain Res Manag* 2006; 11: 197–199
- 48 *Montazem A.* Secondary tinnitus as a symptom of instability of the upper cervical spine: operative management. *Int Tinnitus J* 2000; 6: 130–133
- 49 *Bergholm U, Johansson BH.* Ny diagnostik kan leda till bättre behandling vid pisksnärtsskada. Med funktionell magnetresonanstomografi kan skadorna visualiseras. (New diagnostic approach can improve treatment of whiplash injuries. Functional magnetic resonance tomography makes visualization of the injuries possible). *Läkartidningen* 2003; 100: 3842–3847
- 50 *Nygaard OP, Kolstad F, Kvistad KA et al.* Kronisk nakkeslengsyndrom er ingen indikasjon for kraniocervikal fiksasjon. (Chronic whiplash syndrome is no indication for craniocervical fixation). *Tidsskr Nor Laegeforen* 2005; 125: 2939–2941
- 51 *Muhle C, Brossmann J, Biederer J et al.* Stellenwert bildgebender Verfahren in der Diagnostik der Ligg. alaria nach Beschleunigungsverletzung der Halswirbelsäule. *Fortschr Röntgenstr* 2002; 174: 416–422
- 52 *Saternus KS, Thrun C.* Zur Traumatologie der Ligamenta alaria. *Aktuelle Traumatol* 1987; 17: 214–218
- 53 *Beschleunigungstrauma der Halswirbelsäule. Leitlinien für Diagnostik und Therapie in der Neurologie.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2005; 3 überarbeitete Auflage, ISBN 3 – 13 – 132413 – 9 <http://www.uni-duesseldorf.de/WWW/AWMF/II/030-095.htm>