

# Der Hufbeinträger – Teil 1: Die fächerförmige Verstärkung des Hufbeinträgers an der Hufbeinspitze des Pferdes

Klaus-D. Budras<sup>1</sup>, Ruth Hirschberg<sup>1</sup>, Christine Hinterhofer<sup>3</sup>, Eva Polsterer<sup>2</sup> und Horst Erich König<sup>2</sup>

Institut für Veterinär-Anatomie, Fachbereich Veterinärmedizin der Freien Universität Berlin<sup>1</sup>, Institut für Anatomie<sup>2</sup> und Universitätsklinik für Orthopädie bei Huf- und Klauentieren<sup>3</sup> der Veterinärmedizinischen Universität Wien

## Zusammenfassung

Der Hufbeinträger war mit seiner fächerförmigen Verstärkung an der Hufbeinspitze erstmals Gegenstand einer speziellen Untersuchung. Dabei sollten die strukturellen und funktionellen Unterschiede zum Hauptteil dieser Aufhängevorrichtung besonders herausgearbeitet werden. Das Untersuchungsmaterial umfasste 11 hufgesunde Warmblutpferde mittlerer Größe, deren Hufbeinträger mit den Methoden der Scheibenplastination und mit dem immunhistochemischen Nachweis von alpha-Smooth Muscle Aktin bearbeitet wurden. Die eigenen Befunde erbrachten drei Anteile der fächerförmigen Verstärkung. Die oberen Anteile der Fächerformation zeigen bei kontinuierlichem Übergang aus dem Hauptteil des Hufbeinträgers eine allmähliche Abflachung in der Verlaufsrichtung der Trageelemente. Die mittleren Anteile mit horizontaler Ausrichtung sind durch den Verlust der dermalen und epidermalen Sekundärblättchen und damit der dermoepidermalen Zwischenblättchenverbindung sowie der Gleithaftverbindung gekennzeichnet und die unteren Anteile zeigen in ihren dermalen Trajektorien eine zunehmend abfallende Richtung und verankern sich schließlich im Horn der weißen Linie. Der immunhistochemische Nachweis von alpha-Smooth-Muscle-Actin innerhalb der dermalen Trajektorien belegt die Ausdifferenzierung von spezialisierten Myofibroblasten, die vermutlich eine Eigenspannung im distalen Bereich der fächerförmigen Verstärkung des Hufbeinträgers ermöglichen. In der Diskussion wird klar, dass die Tragefunktion des Hauptteils des Hufbeinträgers in der fächerförmigen Verstärkung erlischt und distal zunehmend durch die Funktion einer indirekten Verankerung der tiefen Beugesehne im Horn der weißen Linie übernommen wird. Daraus resultiert ein Verspannungseffekt für die Linea alba, der sich am gestreckten Verlauf der radiär ausgerichteten Hornblättchenquerschnitte zeigt. Dieser Verspannungseffekt geht palmar/plantar verloren, weil der Zug durch die tiefe Beugesehne hier fehlt und das zeigt sich im Seiten- und Trachtenteil der weißen Linie an der gewellten Ausrichtung ihrer Hornblättchenquerschnitte. Die klinische Bedeutung der fächerförmigen Verstärkung des Hufbeinträgers wird im Teil 2 unsere Untersuchung beleuchtet.

**Schlüsselwörter:** Pferd, Hufbeinträger, fächerförmige Verstärkung an der Hufbeinspitze, Plastination, Immunhistochemie, alpha-Smooth-Muscle-Actin

---

## The Suspensory Apparatus of the Coffin Bone - Part 1: The fan-shaped re-inforcement of the suspensory apparatus at the tip of the coffin bone in the horse

The suspensory apparatus of the coffin bone with particular regard to its fan-shaped re-inforcement at the tip of the coffin bone was examined for the first time. The aim of the study was to reveal structural and functional peculiarities within the different areas of this suspension device. The material comprised specimens from 11 warm-blooded horses of median height with healthy hooves that were investigated employing serial plastinated sections, as well as immunohistochemistry of histological sections for detection of alpha-smooth-muscle actin. According to this study, the fan-shaped re-inforcement can be subdivided into three different parts. The upper part of the fan-formation emerges continually from the main part of the suspensory apparatus and is characterised by a gradual flattening of the direction of the trajectories of its supportive elements. The middle part with its horizontal direction is characterised by the loss of the dermal and epidermal secondary lamellae, and thus by loss of the dermoepidermal interlamellary bond as well as the stick-slip effect. The lower part displays an increasingly gradient direction of the dermal trajectories that are anchored within the horn of the white line. Alpha-smooth-muscle-immunoreactive fibroblasts within the dermal trajectories were detected that presumably enable a self-equilibrating stress of the distal part of the fan-shaped re-inforcement of the suspensory apparatus of the coffin bone. The discussion reveals that the supportive function of the main part of the suspensory apparatus of the coffin bone within the fan-shaped re-inforcement is distally superseded by another function, i.e. of indirectly anchoring the deep digital flexor tendon within the horn of the white line. This acts as a bracing device for the linea alba, as displayed by the stretched course of the radially directed cross sections of the cornified lamellae. This bracing effect is lost in the palmar resp. plantar aspect of the hoof because here the tension of the deep digital flexor tendon is not effective, as displayed by the undulated direction of the cross sections of the cornified lamellae of the white line within quarter and heels of the hoof. The clinical-functional application of the fan-shaped re-inforcement of the suspensory apparatus of the coffin bone is considered in part 2 of this study.

**Keywords:** horse, suspensory apparatus of the coffin bone, fan-shaped re-inforcement of the tip of the distal phalanx, plastination, immunohistochemistry, alpha-smooth-muscle-actin

## Einleitung

Die Definition der Hufrehe als Erkrankung des Hufbeinträgers (Budras und Huskamp 1999) wird auch im deutschen Sprachraum mehr und mehr akzeptiert (Dietz und Huskamp 2006).

Im angloamerikanischen Sprachraum ist der Terminus „laminitis“ voll akzeptiert und bedeutet Entzündung des Blättchenverbindung (laminary bond, eine vereinfachende - unvollständige - Kurzbezeichnung für den Hufbeinträger). Bei dieser

Gegebenheit und der enormen Bedeutung der Hufrehe ist es dringend geboten, den Hufbeinträger in allen Details genau zu untersuchen, zumal in der angelsächsischen Literatur durch die Beschränkung auf die dermoepidermale Zwischenverankerung eine völlig einseitige Betrachtung vorliegt, die zur Vernachlässigung der übrigen Prädilektionsstellen für Zerreissungen im Hufbeinträger führte. Bei Erwähnung der fächerförmigen Verstärkung durch *Pellmann et al.* (1995) und *Budras und Huskamp* (1999) beschränken sich unsere fundierten Kenntnisse fast ausschließlich auf den zunächst abgehandelten Hauptteil des Hufbeinträgers, aber nicht auf die fächerförmige Verstärkung an der Hufbeinspitze, und nicht auf die fibröse Verbindung zwischen dem Kronsegment und dem Proximalende des Hufbeins (*Kempson* 2008).

Der Hufbeinträger ist ein lebenswichtiger, komplexer Apparat mit erheblicher funktioneller, mechanischer und medizinischer Bedeutung (*Budras et al.* 2006). Er verbirgt sich unter der Hufkapsel und wird nur am Tragrand als „Spiegelbild“ in der weißen Linie äußerlich sichtbar. Er hat die Aufgabe, das Hufbein (samt Körpergewicht) in einer Schwebeposition zu tragen und bei Belastung die für das Hufbein schädlichen Druckkräfte in Zugkräfte umzuwandeln, die vom Knochengewebe besser toleriert werden (*Patan und Budras* 2009). Die nach oben gewölbte Sohlenfläche weist einen scharfrandigen Margo solearis auf, der das Körpergewicht nicht dauerhaft abstützen kann, ohne dabei Schaden zu erleiden. Wenn bei Funktionsverlust des Hufbeinträgers, wie bei der chronischen Hufrehe mit Hufbeinsenkung und Hufbeinrotation, das Hufbein tatsächlich einer hohen Druckbelastung durch das Körpergewicht ausgesetzt ist, kann es zu irreparablen Schäden mit hutkrempeartigen Aufbiegungen oder gar Brüchen am Margo solearis kommen (*Huskamp* 1990, *Murray et al.* 2003).

Der Hauptteil des Hufbeinträgers besteht aus zahlreichen dermoepidermalen Trageelementen der Leder- und Oberhaut, die mit der Pars dermalis aus der gesamten Wandfläche des Hufbeins (und plantar/palmar anschließend aus dem Hufknorpel) hervorgehen und mit der Pars epidermalis an der gesamten blättchentragenden Innenfläche der Hufkapsel enden. Die Ausdehnung (Reichweite) des Hufbeinträgers kann nach artifizierlicher Exungulation an der dermoepidermalen Trennungsfäche auf dem ersten Blick erfasst werden: Sie ist identisch mit dem Ausdehnungsbereich des deutlich sichtbaren Blättchenapparates der Oberhaut und der Lederhaut. Es liegt eine fast geschlossene Rundum-Aufhängung vor, die lediglich an der Ansatzstelle der tiefen Beugesehne am Hufbein unterbrochen ist. Bei Berücksichtigung der gesamten flächenhaften Ausdehnung des dermoepidermalen Blättchenapparates ist die Tragekapazität am Huf Rücken am stärksten und nimmt trachtenwärts kontinuierlich und deutlich ab.

Eingeteilt wird der Hufbeinträger in einen Lederhaut- und einen Oberhautanteil mit einer dermalen Anfangsverankerung am Hufbein und einer epidermalen Endverankerung an der Hufkapsel. Zwischen diesen beiden Enden liegt die bedeutende interlaminiäre (Zwischenblättchen-) Verankerung durch die dermoepidermale Basalmembran. Die sekundären Lederhautblättchen verzahnen sich mit den spiegelbildlich gleich geformten sekundären Oberhautblättchen so intensiv in der (dermoepidermalen) Zwischenblättchenverankerung (engl. laminary bond) wie an keiner anderen Körperstelle. Die

daraus resultierende Oberflächenvergrößerung ist enorm und wird in der Literatur auf mehrere Quadratmeter pro Huf geschätzt (*Ruthe et al.* 1997). Daraus resultiert eine so hohe Zugbelastbarkeit, dass die gesamte Körperlast des Pferdes auch bei extremer Belastung (Überspringen eines Hindernisses) getragen werden kann.

Im Oberhautanteil ist eine weitere Zwischenverankerung zwischen den lebenden, unverhornten und den toten, verhornten Zellschichten als 'Gleithaft' ausgebildet, wo bei Aufrechterhaltung einer eingeschränkten Adhäsion ein Vorbeigleiten der nachgeschobenen toten Hornzellen an den lebenden stationären Oberhautzellen erfolgt.

Die Ausrichtung der Zugelemente, sowohl der Kollagenfasern als auch der hintereinander gereihten Hornzellen, folgt der Zugrichtung in der Aufhängung des Hufbeins nach dem Hängematten-Prinzip. Vom „durchhängenden“ Hufbein ausgehend sind die Zugelemente von unten/innen nach oben/außen zur Verankerung an der Hufkapsel-Innenwand schräg aufsteigend ausgerichtet. Sie laufen parallel zu den lamellären Gefäßen der Blättchenlederhaut (siehe *Hirschberg und Bragulla* 2007) und sind nach Kunststoffinjektion dieser Blutgefäße auf einem Scheibenplastinat mikroskopisch leicht nach vollziehbar (Abb.1). Eine Ermittlung des Ansatzwinkels der Zugelemente wäre möglich aber unergiebig, weil erhebliche individuelle Abweichungen bestehen, die offenbar vom Alter, von der Rasse, vom Körpergewicht und anderen unbekannteren Faktoren abhängen.

Das Funktionsprinzip des Hufbeinträgers besteht darin, die Druckkräfte der Körperlast in Zugkräfte umzuwandeln. In der Hornwand erfolgt eine Rückwandlung in eine Druckkraft, die am Tragrand auf dem Boden bzw. auf dem Hufeisen lastet (*Patan und Budras* 2009)

### Funktionen

Durch die elastische Aufhängung befindet sich das Hufbein in einer Schwebeposition und dabei senkt und hebt es sich bei jeder Be- und Entlastung im Schrittrhythmus um wenige Millimeter (*Pollitt* 1993) und berührt nur bei maximaler Belastung die Innenfläche der Sohlenepidermis. Dadurch wird das Hufbein samt umgebender durchbluteter Lederhaut vor zerstörender Druckbelastung geschützt.

Durch Zug des Hufbeinträgers an der Innenfläche der Hufkapsel wird der Hufmechanismus ausgelöst. Im Bereich des Eckstrebenwinkels (zwischen der Trachtenwand und der Eckstrebe) wird das Stützskelett nicht vom Hufbein sondern vom Hufknorpel gestellt. Der auch hier vorhandene Blättchenapparat hat kaum eine Tragefunktion, sondern dient in erster Linie der lockeren Verankerung der Hufkapsel am Hufknorpel (*Henke* 1997).

### Medizinische Bedeutung des Hufbeinträgers

Alle vier Verankerungsstellen (zwei End- und zwei Zwischenverankerungen) können als Sollbruchstellen reißen oder stark überdehnt werden. Das erfolgt in erster Linie bei der chroni-

schen Hufrehe mit Hufbein- oder Hufkapselrotation (Marks 1984). Zum Funktionsverlust des Hufbeinträgers mit fatalen Folgen (Hufbeindislokation) kann es aber auch bei Vorliegen einer „losen Wand“ (white line disease, Redden 1990) und nach der orthopädischen Resektion der dorsalen Hufwand kommen, wenn bei der orthopädischen Entfernung einer Hornsäule der darüber liegende Abschnitt der Hufwand mit



**Abb. 1** Normaler Huf, halbiert durch einen medianen Längsschnitt, Scheibenplastinat mit Injektion von rotgefärbtem Biodur. Die Richtung der Trageelemente (Trajektorien) des Hufbeinträgers (weiße Linien) stimmt mit der Ausrichtung der Blutgefäße im dermalen Blättchenapparat überein. 1 Lage der fächerförmigen Verstärkung des Hufbeinträgers, die von der Hufbeinspitze abstrahlt; 2 Kronbein; 3 Hufrolle, bestehend aus Strahlbein (3'), Hufrollenschleimbeutel (3'') und darüber hinwegziehender tiefer Beugesehne (3'''); 4 TFacies flexoria der tiefen Beugesehne; 5 Hufkissen

*Healthy normal hoof, bisected via a median longitudinal section, serially plastinated specimen injected with coloured methylmethacrylate (Biodur, red). The direction of the trajectories of the ungular suspensory apparatus (white lines) is consistent with the direction of the microvasculature within the dermal lamellae. 1 Position of the fan-shaped re-inforcement of the suspensory apparatus of the coffin bone, radiating from the tip of the distal phalanx; 2 middle phalanx; 3 stay-apparatus of the coffin joint consisting of the distal sesamoid bone (navicular bone, 3'), the podotrochlear bursa (3'') and the crossing deep digital flexor tendon (3'''); 4 Facies flexoria of the deep digital flexor tendon; 5 digital cushion (pulvinus tori)*

entfernt wird. Dadurch geht die Stützverankerung für den Hufbeinträger verloren, vergleichbar mit dem Verlust der Stützverankerung einer Hängematte, der zum Absturz führt.

Die Dominanz des Hufbeinträgers wird noch durch eine „Hufstütze“, das Hufkissen, besonders auf weichem Untergrund unterstützt und ergänzt (Abb.1). Das myxoide (wasserbindende) Gewebe aus hyaluronsäurereicher Matrix ist zwischen den straffen Kollagenfaserzügen des Hufkissens zur federnden Abstützung einwirkender Druckkräfte besonders gut geeignet (Wilhelm et al. 2005).

In unserer nachfolgenden Untersuchung sollen die Wissenslücken bezüglich der fächerförmigen Verstärkung des Hufbeinträgers geschlossen und die prinzipiellen Unterschiede zum Hauptteil des Hufbeinträgers mit mesoskopisch-anatomischen Methoden der Scheibenplastination erarbeitet werden. Mit immunhistochemischen Methoden zum Nachweis kontraktiler Elemente soll die biologische Funktion der Fächerformation beleuchtet werden. In einer Folgepublikation (Teil 2 unserer Untersuchung) soll die klinisch-funktionelle Bedeutung vorgestellt werden.

## Material und Methoden

### Plastination

Mithilfe der Epoxy Plastination nach der E12 Technik (Sora 2007, Sora und Cook 2007) wurden 2,5 - 3mm dicke Scheiben von Hufen der Vordergliedmaße von 8 Pferden hergestellt, die keine Lahmheiten und keinerlei äußerlich apparente Veränderungen der Zehe zeigten. Bei einem Zehenendorgan wurde vor der Plastination über die Hauptmittelfußarterie rotes Biodur® injiziert und nach Aushärten der Füllmasse die Zehe sagittal geschnitten. Bis zur Fertigstellung der Präparate vergehen dabei ca. 66 Tage. Von einer nächsten Zehe wurden Dünnschnitte aus dem Dorsalteil angefertigt. Die Schnittrichtung verlief dabei parallel zum Tragrand. Von einem anderen Zehenendorgan wurden ähnliche Schnitte in sagittaler Richtung vom Zehenteil, den Seitenteilen, den Trachten und den Eckstreben angefertigt. Nach Beendigung der Plastination wurden die Schnitte mit einer Lupe M-10 der Firma Wild, Heerbrugg, Schweiz ausgewertet und fotografiert.

### Immunhistochemischer Nachweis von $\alpha$ -Smooth Muscle Actin

Für den immunhistochemischen Nachweis des  $\alpha$ -Smooth-Muscle-Actin (SMA) wurden paraffin-eingebettete Serienschnitte von drei adulten Warmblutpferden, jeweils aus dem proximalen, mittleren und distalen Anteil des Zehenteils der Hufwand verwendet. Es wurden ein Primärantikörper gegen das humane Epitop (MCA1905HT, Fa. Serotec, Oxford, GB) sowie ein entsprechender biotinylierter Sekundärantikörper (ShpXMsFab'2 Ig, Fa. Chemicon, Terneucula, USA) eingesetzt. Die Chromogen-Detektion (StreptABCComplex/HRP, Fa. Dako, Glostrup, Dänemark; 3,3'-Diaminobenzidin Tabletten, Fa. Sigma-Immuno Chemicals, St. Louis, USA) erfolgte entsprechend der Herstellerangaben. Geeignete Positiv- (Gewebekontrolle: Nierengewebe vom Schwein, entsprechend der Herstellerangaben über Kreuzreaktivität des Primärantikörpers mit porcinem Gewebe) und Negativkontrollen (Serumkontrolle: Mouse IgG Control Serum X0931, Fa. Dako, Glostrup, Dänemark) wurden durchgeführt.

## Eigene Befunde

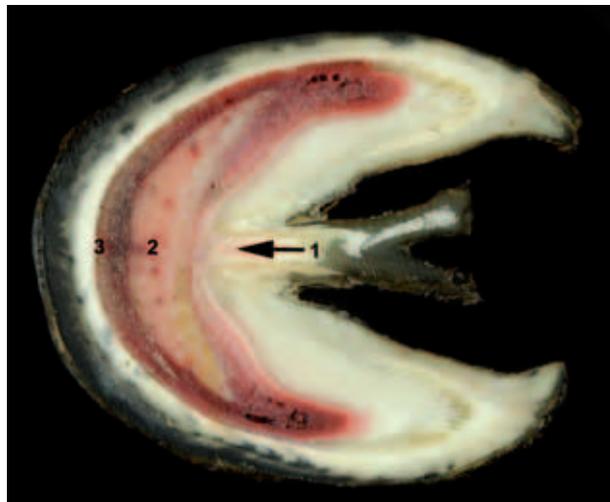
### Anatomisch- histologische Befunde

Die dermalen, bindegewebigen Trajektorien der fächerförmigen Verstärkung des Hufbeinträgers sind auf der Plastinatscheibe durch die Mitte des Hufs (Abb.1) nur indirekt, am parallelen Verlauf zu den Blutgefäßen erkennbar. Dagegen tritt im Falle des krankhaften Abrisses die fächerförmige Verstärkung so deutlich in Erscheinung, dass sie sogar mit bloßem Auge gut sichtbar ist (siehe Diskussion).

Die Kollagenfaserbündel der fächerförmigen Verstärkung kommen von der Hufbeinspitze und ziehen bei divergierender Verlaufsrichtung zunächst durch das einheitliche Stratum reticulare der Lederhaut. Nach einer ‚Neusortierung‘ treten sie in die primären Lederhautblättchen ein.

Auf einem horizontalen Huf-Sägeschnitt, der parallel und zirka einen Zentimeter oberhalb des Sohlenrandes verläuft, lässt

sich eine funktionelle Kontinuität im Zug der tiefen Beugesehne und der fächerförmigen Verstärkung des Hufbeinträgers bei Zwischenschaltung des Hufbeins erkennen (Abb. 2). Bei struktureller Diskontinuität verankert sich bei Zwischenschaltung des Hufbeins die tiefe Beugesehne indirekt über die fächerförmige Verstärkung des Hufbeinträgers am inneren Hufwinkel und am Horn der weißen Linie (Abb. 3).



**Abb. 2** Hufquerschnitt, ca. 0,5 cm oberhalb und parallel zum Hufbeinrand. Der Zug der tiefen Beugesehne (1) setzt sich über das Hufbein (2) und die fächerförmige Verstärkung des Hufbeinträgers auf das Horn der Weißen Linie (3) fort.

*Cross section of the hoof, approx. 0.5 cm above and parallel to the margin of the coffin bone. The traction of the deep digital flexor tendon (1) is sustained by the coffin bone (2) and the fan-shaped reinforcement of the suspensory apparatus of the coffin bone, and then transferred to the horn of the white line (3).*

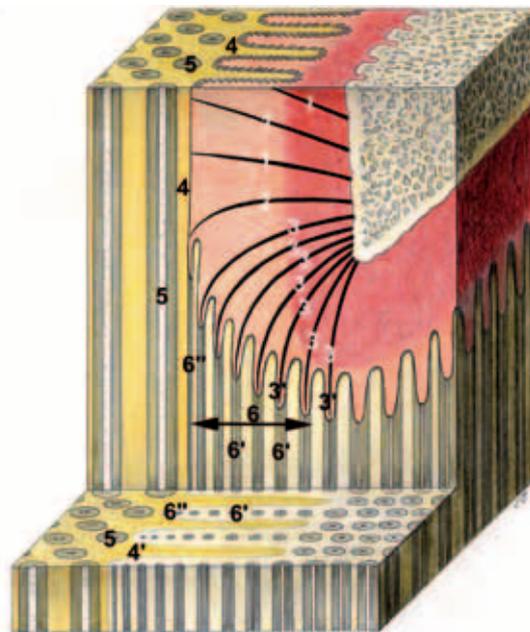
Bei Betrachtung der gesamten Semizirkumferenz des Margo solearis unguulae wird klar, dass an einem Huf, entsprechend der Anzahl der primären Lederhautblättchen etwa 700 Fächerformationen vorkommen. Eine Verstärkung weisen jedoch nur solche Fächerformationen auf, die in gerader Verlängerung der Zugrichtung der tiefen Beugesehne im Dorsalbereich des Hufes liegen (Abb. 2). Die Verstärkung kommt durch die besondere Dicke, die zunehmende Bündelung der Kollagenfasern und deren Zusammenzurrgung infolge der Aktivität der Myofibroblasten (siehe unten) zustande.

Aufgrund verschiedener Verlaufsrichtungen und unterschiedlicher Insertionsverhältnisse sowie struktureller Abweichungen ist es zweckmäßig, die fächerförmige Verstärkung in obere, mittlere und untere Anteile (Kollagenfaserbündel) zu gliedern.

1. Die oberen Anteile der fächerförmigen Verstärkung lassen einen kontinuierlichen, nahtlosen Übergang aus dem Hauptteil des Hufbeinträgers erkennen (Abb. 3, 1). Ihre Kollagenfaserbündel zeigen im Vergleich zum Hauptteil des Hufbeinträgers eine Abflachung in ihrer Ausrichtung. Im strukturellen Aufbau bestehen graduelle Modifikationen bei deutlichen funktionellen Unterschieden in der Tragkapazität der dermoepidermalen Verbindung zwischen den sekundären Lederhaut- und Oberhautblättchen. Die Reduzierung in der Tragkapazität ergibt sich aus der Abnahme der Oberflächenvergrößerung an der dermoepidermalen (sekundären) Blätt-

chenverbindung, die durch Reduzierung der Anzahl und die kontinuierliche Verkleinerung des dermoepidermalen (sekundären) Blättchenapparates zustande kommt.

An der Anfangsverankerung der dermalen Fächerformation treten Kollagenfaserbündel aus dem Hufbein heraus (Abb. 4), durchziehen in der (chondroapophysären) vierzonalen



**Abb. 3** Fächerförmige Verstärkung des Hufbeinträgers, die von der Hufbein Spitze abstrahlt. Im Vergleich zu den proximodorsal gerichteten Trajektorien im Hauptteil (I) des Hufbeinträgers zeigt der obere Anteil (1) der fächerförmigen Verstärkung eine weniger steile, nur noch leicht abfallende Verlaufsrichtung und die mittleren Anteile (2) einen annähernd horizontalen und die unteren Anteile (3) eine zunehmend distalen Verlauf. Letztere verankern sich vornehmlich im Grund der dermalen Terminalpapillen (3'), in deren epidermaler Umgebung das Füllhorn (6) zwischen den Hornblättchen (4') der Weißen Linie gebildet wird. 4 Blättchenhorn der Wand, das zum Blättchenhorn der Weißen Linie (4') heruntargeschoben wird; 5 Inneres Kronhorn; 6 Füllhorn, bestehend aus terminalem Röhrchenhorn (6') und Kappenhorn (6''); 7 Stratum reticulare der Lederhaut.

*Fan-shaped re-inforcement of the suspensory apparatus radiating from the tip of the coffin bone. Compared to the proximodorsally orientated trajectories within the main part (I) of the suspensory apparatus the upper part (1) of the fan-shaped re-inforcement displays a less steep and only slightly gradient direction, while the middle part (2) - in-between the upper and lower part - displays an approximately horizontal, and the lower part (3) displays an increasingly distally orientated direction. The trajectorial fibres of the latter are moored particularly at the base of the dermal terminal papillae (3'). Within the epidermal surrounding of the dermal terminal papillae, the fill horn (6) is formed between the cornified lamellae (4') of the white line; 4 lamellary horn of the wall that is pushed distally towards the lamellar horn of the white line (4'); 5 inner coronary horn; 6 fill horn, consisting of terminal tubular horn (6') and cap horn (6''); 7 reticular layer of the dermis.*

Insertionszone eine Faserknorpelumhüllung und durchkreuzen sich in der netzförmigen Lederhautschicht (Stratum reticulare), um nach einer Neusortierung in die primären Lederhautblättchen einzutreten und feinste Abzweigungen für die sekundären Lederhautblättchen abzustrahlen. Der Zug wird von den sekundären Lederhautblättchen, bei Zwischenschal-

tung einer Basalmembran, auf die sekundären Oberhautblättchen übertragen, deren dicht stehende Oberhautzellen ein Zytoskelett aus feinsten Keratinfhärchen (Keratinfilamenten) aufweisen und mit interzellulären Haftbrücken (Desmosomen) fest miteinander verbunden sind. Eine weitere Zwischenverankerung befindet sich im epidermalen Anteil des Hufbeinträgers als Gleithaft zwischen den Sekundär-

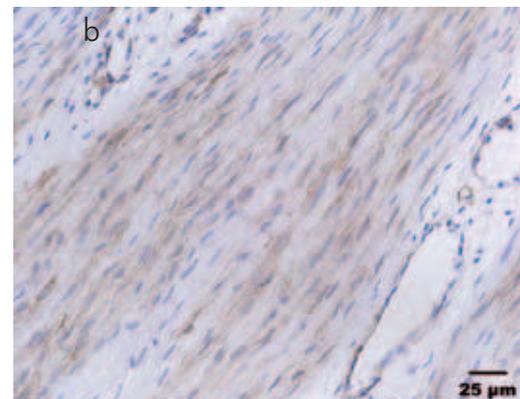
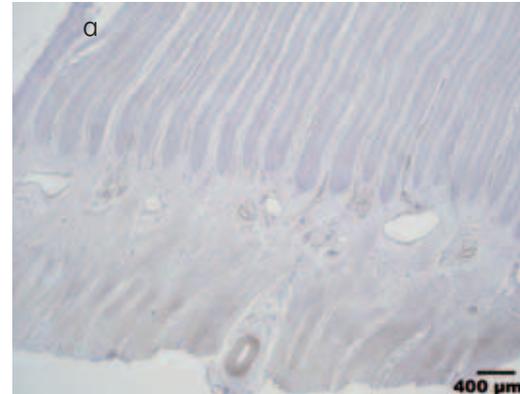


**Abb. 4** Trajektorien und Verankerungen des Hufbeinträgers im Querschnitt durch den Huf. Der obere Anteil der fächerförmigen Verstärkung stimmt abgesehen von seiner flacheren Ausrichtung mit dem Grundbauplan im Hauptteil (I) des Hufbeinträgers prinzipiell überein. Der dermale Anteil des Hufbeinträgers kommt von der Anfangsverankerung aus dem Hufbein (1) und seiner vierzonalen Insertionszone (1'), durchzieht das Stratum reticulare (2) der Lederhaut und setzt sich in den primären (3) und sekundären (3') Lederhautblättchen fort, um die dermoepidermale Blättchenverankerung mit eingelagerter Basalmembran (3'', Sterne) zu erreichen. Im anschließenden epidermalen Anteil des Hufbeinträgers wird die Zugkraft über die epidermalen unvernagelten Sekundärblättchen (4) und danach über die Gleithaft-Verankerung (4') und die primären Hornblättchen (4'') fortgesetzt, um im inneren Kronhorn der Hufkapsel (5) eine Endverankerung zu finden. (Bildquelle: Pellmann et al., 1996)

*Trajectories and anchorage of the suspensory apparatus of the coffin bone demonstrated within cross sections of the hoof. Except for the plainer direction, the upper part of the fan-shaped re-inforcement complies with the general structure of the main part of the suspensory apparatus of the coffin bone. The dermal unit of the suspensory apparatus derives from the primary mooring at the coffin bone (1) and its fourzonal insertion zone (1'), crosses the reticular layer (2) of the dermis and continues on to the primary (3) and secondary (3') dermal lamellae, in order to reach the dermoepidermal interlaminary bond or anchorage with integrated basal membrane (3'', asterisks). Within the adjacent epidermal unit of the suspensory apparatus, the tensile force is transferred onto the epidermal uncornified secondary lamellae (4), then anchored via the stick-slip-effect (4') and the primary cornified lamellae (4''), in order to be terminally anchored within the inner coronary horn of the hoof capsule (5). (Source: Pellmann et al., 1996)*

blättchen aus vitalen, nicht verhornten Epidermiszellen und den Primärblättchen aus Hornzellen (Abb. 4). Diese Gleithaft wird durch den Interzellularkitt gesichert, der von den (sehr wenigen) verhornenden Epidermiszellen ausgeschieden wird und diese als „membrane coating material“ ummantelt (Budras et al. 1989). Er ist mit frisch ausgeschiedenem Baumharz vergleichbar und hält die Gleithaft bis zu seiner endgültigen Aushärtung aufrecht und danach dient er ausschließlich der Hornzell-Adhäsion. Schließlich erfolgt die Übertragung des Zuges auf die schwammig gebauten primären Hornblättchen, die die schwammigen inneren Kronhornröhrchen umschlingen, wodurch die federnd-elastische Endverankerung des Hufbeinträgers an der Hufkapsel zustande kommt (Abb. 4).

2. Im mittleren Anteil der Fächerformation haben die Kollagenfaserbündel einen annähernd horizontalen Faserverlauf (Abb. 3, 2). Da die dermalen und epidermalen Sekundärblättchen fehlen, sind auch die beiden Zwischenverankerungen nicht ausgebildet. Die Kollagenfaserbündel ziehen ohne Abzweigungen zur apikalen Firstregion der primären Lederhautblättchen und verankern sich hier bei Zwischenschaltung



**Abb. 5** Immunhistochemischer Nachweis des alpha-Smooth-Muscle-Actin (SMA) im oberen Anteil der fächerförmigen Verstärkung des Hufbeinträgers. **a:** Das ockerbraune Reaktionsprodukt befindet sich in den dermalen Trajektorien. Am Übergang zwischen Stratum reticulare und Stratum lamellatum der Lederhaut wird die Reaktion deutlich schwächer. Erwartungsgemäß reagieren die vaskulären Myozyten und einige Intimazellen (Endothelzellen, Perizyten) der pododermalen Arterien ebenfalls positiv. **b:** Stärkere Vergrößerung der dermalen Trajektorien mit deutlich positiver Reaktion in den Fibrozyten und Fibroblasten. Zwischen den Trajektorien ist in der Peripherie der weitlumigen Gefäße kein Reaktionsprodukt nachweisbar.

*Immunohistochemical evidence of alpha-smooth-muscle-actin (SMA) within the upper part of the fan-shaped re-inforcement of the suspensory apparatus of the coffin bone. a: The brown reaction product is localised within the dermal trajectories. At the junction of reticular and lamellar layer of the dermis, the reaction is distinctly weaker. As expected, the vascular smooth muscle cells and some intimal cells (endothelial cells, pericytes) of the pododermal arteries are also reactive. b: Higher magnification of the dermal trajectories with distinct positive reaction of fibrocytes and fibroblasts. In-between the trajectories, i.e. in the periphery of the large-diameter vessels, no immunoreaction is detectable.*

einer Basalmembran und vitaler Epidermiszellen im inneren Hufwinkel am inneren Kronhorn und am Kappenhorn.

3. Im unteren Anteil der fächerförmigen Verstärkung zeigen die Kollagenfaserbündel einen zunehmend distal gerichteten, absteigenden Verlauf (Abb. 3, 3). Sie ziehen in die Terminal-

papillen der Lederhautblättchen hinein und verankern sich bei Zwischenschaltung einer Basalmembran und vitaler Epidermiszellen am terminalen Röhrchenhorn (Füllhorn), das mit dem Blättchenhorn über Interzellularkitt verbunden ist und mit diesem das Horn der weißen Linie bildet. Durch diese dermoepidermalen Verbindungen und die Endverankerung in der weißen Linie entsteht ein Spannungseffekt zwischen den verschiedenen Hornanteilen der Linea alba unguiae.

Parallel zur Richtungsänderung der dermalen Trajektorien kommt es auch in den epidermalen Trajektorien der Hornblättchen der weißen Linie gleichermaßen zur Richtungsänderung, so dass zwischen den dermalen und epidermalen Trajektorien die Parallelität zum Verlauf der Blutgefäße, die in die Terminalpapillen hineinziehen, weiterhin gegeben ist. Auf strukturelle Abweichungen im Aufbau der Fächerformation bei gelegentlichem Vorkommen eines median gelegenen Sohlenspornes, der sich in eine Crena (Kerbe) des Hufbeins einfügt (Budras et al. 1998), wird in der vorliegenden Arbeit nicht eingegangen.

#### *Immunhistochemische Befunde*

Besonders bemerkenswert ist die positive Reaktion der Fibrozyten bzw. Fibroblasten innerhalb des dermalen Anteils des Hufbeinträgers; insbesondere im tiefgelegenen Anteil der Huflederhaut (Str. reticulare), und zwar im Bereich der durch die Reaktion ‚streifig‘ markierten Trajektorien (Abb.5a). In den angrenzenden primären Lederhautblättchen ist die Reaktion basal noch deutlich und wird in apikaler Richtung immer undeutlicher und fehlt schließlich in den sekundären Lederhautblättchen gänzlich. Bei stärkerer Vergrößerung (Abb.5b) wird klar erkennbar, dass sich das Reaktionsprodukt in den Fibrozyten und Fibroblasten befindet. Dagegen sind die lockeren Bindegewebsanteile in der Umgebung von Blutgefäßen nicht durch das Reaktionsprodukt markiert. Die Intensität der SMA-reaktiven Fibroblasten nimmt in der Huflederhaut des Hufrückens in proximodistaler Richtung kontinuierlich zu, mit der ausgeprägtesten Reaktion im distalen Drittel des Hufbeinträgers (besonders deutlich in den distalen Kollagenfaserbündeln der fächerförmigen Verstärkung).

Erwartungsgemäß zeigen die vaskulären glatten Muskelzellen in der Tunica media des arteriellen Schenkels des pododermalen Kreislaufsystems eine starke Reaktion mit dem eingesetzten Smooth-Muscle-Actin (SMA) Antikörper. Innerhalb der lamellären Mikrovaskularisation sind nicht nur die vaskulären glatten Muskelzellen der Arteriolen, sondern auch einige Zellen der Tunica intima (Endothelzellen, Perizyten) des nachgeschalteten Kapillarnetzes SMA-reaktiv. Diese positiv reagierenden Zellen können als präparatsinterne Positivkontrollstrukturen für den immunhistochemischen Nachweis gelten.

#### **Diskussion**

Die angewandten Methoden der Scheibenplastination sind in Kombination mit einer mikroskopischen Auswertung dieser Präparate wie ein riesengroßer histologischer Schnitt verwendbar, und deshalb für die vorliegende Untersuchung besonders gut geeignet. Eine Photographie eines Scheibenplastinates (Abb.1) hat einen ebenso großen Informations-

wert wie eine wissenschaftliche Zeichnung und ist im Dokumentationswert nicht zu übertreffen. Da alle Vergrößerungsstufen von der makroskopischen bis hin zur höchsten mikroskopischen Dimension optimal genutzt werden können, gehen die Übersichtlichkeit und Zusammenhänge nie verloren. Durch die Untersuchung vollständiger Serien von Scheibenplastinaten kann die Befunderhebung in vorteilhafter Weise den gesamten Huf erfassen, was mit herkömmlichen histologischen Methoden bei unverhältnismäßig hohem Aufwand an Zeit und Material nur unzureichend gelingt. Die dermalen Trajektorien des Hufbeinträgers lassen sich bei Anwendung einer Gefäßinjektion gut (indirekt) darstellen, weil sie gefäßparallel verlaufen. Die Kollagenfaserbündel der Fächerformation treten bei gleichem Brechungsindex wie im umgebenden Kunstharz, der für die Plastinationspräparation verwendet wurde, nur als Negativbild in Erscheinung. Sofern beim Abriss der fächerförmigen Verstärkung von der Hufbeinspitze die Kollagenfaserbündel durch die Aktivität der Myofibroblasten zusammen gezerrt sind, führt der veränderte Brechungsindex zur sehr deutlichen Wahrnehmung mit dem bloßen Auge (Abb.1 im 2. Teil unserer Untersuchung, die im nächsten Heft der Pferdeheilkunde (3/2009) zur Publikation vorgesehen ist). Für die direkte Darstellung der epidermalen Trajektorien ist die Scheibenplastination vorzüglich geeignet. Die Scheibenplastinate sind aber auch für andere praktische Zwecke, z.B. als Demonstrationsobjekt zur Information der Pferdebesitzer über komplizierte Funktionen und Krankheiten im Huf und für die Aufstellung eines Behandlungsplanes sehr gut verwendbar.

Der nomenklatorische Gebrauch des Terminus technicus „Hufbeinträger“ (Apparatus suspensorius ossis unguiae) hat sich inzwischen im deutschen Sprachgebrauch durchgesetzt und ist dem englischen Begriff „laminary bond“ vorzuziehen, weil er den gesamten Komplex der Aufhängevorrichtung des Hufbeins einschließlich der Prädilektionsstellen für Separationen erfasst. Die begrifflichen Parallelen zum Terminus „Fesselträger“ sind durchaus vorteilhaft und hilfreich, denn beide Begriffe benennen Tragestrukturen mit sehr komplexem Aufbau, die sich im Zuge der Evolution in einer Zeitspanne von 50 Millionen Jahren während der Entwicklung vom fuchsgrößen Eohippus zum heutigen Equus caballus herausdifferenzierten. Auch aus klinisch-funktioneller Sicht ist der Abriss des Trageapparates sowohl an der Fessel (Niederbruch) als auch am Huf (Hufbeindislokation bis hin zur Exungulation) von herausragender medizinischer Bedeutung.

Die eigenen anatomisch-histologischen Befunde belegen, dass die verschiedenen Anteile der fächerförmigen Verstärkung des Hufbeinträgers bezüglich Faserverlaufsrichtung, Struktur und Funktion umso stärker modifiziert sind, je weiter sie vom Hauptteil des Hufbeinträgers entfernt liegen. Gleichermäßen geht der epidermale Anteil an der Fächerformation des Hufbeinträgers vollends verloren.

Der obere Anteil der fächerförmigen Verstärkung lässt anfangs eine noch geringe Richtungsänderung der dermalen und der epidermalen Trajektorien erkennen, die mehr und mehr abflachen und sich der Horizontalen angleichen. Eine graduelle Strukturveränderung liegt im Vergleich zum Hauptteil des Hufbeinträgers in so fern vor, als die dermalen und auch die epidermalen Sekundärblättchen allmählich verstreichen und folglich auch beide Zwischenverankerungen,

sowohl die dermoepidermale Zwischenblättchenverbindung als auch die epidermale Gleithaft (*Budras et al. 1989*) am nahtlosen Übergang zum mittleren Anteil der Fächerformation allmählich verloren gehen. In funktioneller Hinsicht ist auch eine Änderung festzustellen, weil die Tragefunktion für das Hufbein distal zunehmend von der Verankerungsfunktion für die tiefe Beugesehne (bei Zwischenschaltung des Hufbeins) abgelöst wird.

Im mittleren Anteil der fächerförmigen Verstärkung ist die Richtungsänderung hin zur Horizontalen vollends vollzogen. Die Strukturveränderungen sind erheblich, weil die von der Hufbeinspitze ausgehenden dermalen Bindegewebszüge bei ihrer horizontalen Ausrichtung ohne Abzweigung (zu den fehlenden) Sekundärblättchen in der Firstregion der primären Lederhautblättchen bei Zwischenschaltung einer Basalmembran und vitaler Epidermiszellen am inneren Kronhorn und am Kappenhorn (*Budras et al. 1989*) ihre Endverankerung finden. Funktionell setzen sie die Zugrichtung der tiefen Beugesehne zum inneren Hufwinkel (zwischen Wand und Sohlenhorn) fort.

Im unteren Teil der fächerförmigen Verstärkung hat sich die dermale Faserverlaufsrichtung nach unten umgekehrt. Der deutliche Strukturwandel bezieht sich auf die Insertion der Kollagenfaserzüge, die in die Terminalpapillen der Lederhautblättchen hinein ziehen und sich bei Zwischenschaltung einer Basalmembran und lebender Oberhautzellen indirekt am terminalen Röhrchenhorn (Füllhorn) und mit diesem am Blättchenhorn der weißen Linie verankern. Funktionell wird der Zug der tiefen Beugesehne zum Horn der weißen Linie weiter geleitet. Dadurch wird die weiße Linie in einem Verspannungssystem stabilisiert, was an der gestreckten Ausrichtung der Hornblättchen im Hufrückbereich sichtbar ist (*von Zadow und Budras 2008*). Bei Wegfall des Zuges der tiefen Beugesehne (seltenen durch Zerreißen oder infolge orthopädischer Durchtrennung, *Parks und O'Grady 2003*) oder beim Abriss der fächerförmigen Verstärkung von der Hufbeinspitze (s. Teil 2 unserer Untersuchung) fehlt der Verspannungseffekt. Das zeigt sich im Huf Rücken am wellenförmigen Verlauf der Hornblättchen-Querschnitte im Dorsalabschnitt der weißen Linie. Im Seiten- und Trachtenteil des Hufes trifft der Zug der tiefen Beugesehne nicht longitudinal auf die Hornblättchen der weißen Linie und deshalb fehlt hier der Verspannungseffekt (was sich an der Wellenform der Hornblättchen zeigt; *von Zadow und Budras 2008*).

Die im Blättchenhorn der weißen Linie beobachtete Richtungsänderung der epidermalen Trajektorien ist durch unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeiten der Hornmassen aus den verschiedenen Hufsegmenten durchaus erklärlich. Da in der weißen Linie die Hornblättchen in ihrer Breitenausdehnung am äußeren Rand mit dem schnell nachgeschobenen Kronhorn und am inneren Rand mit dem wesentlich langsamer wachsenden Sohlenhorn (*Geyer 2008*) fest verbunden sind, wird ihre Richtungsänderung von proximal (schräg ansteigend) nach distal (schräg abfallend) durchaus verständlich.

Die eigenen immunhistochemischen Befunde belegen den Nachweis von  $\alpha$ -Smooth-Muscle-Actin in Fibrozyten und Fibroblasten, die dadurch als Myofibroblasten und Myofibro-

zyten mit (kontraktile Eigenschaften) zu werten sind. Dadurch werden die dermalen Trajektorien der distalen Verstärkung des Hufbeinträgers in einen tonusartigen Spannungszustand versetzt. Die Eigenspannung in der fächerförmigen Verstärkung kompensiert offenbar im gewissen Grade einen verminderten oder fehlenden Zug der tiefen Beugesehne. Beim Liegen oder in der Hangbeinphase bewirkt lediglich der Muskeltonus eine Anspannung, die beim Durchreißen oder Durchschneiden der tiefen Beugesehne vollends verloren geht. Im ersten Fall des verminderten Zuges der tiefen Beugesehne bewirkt die Eigenspannung der fächerförmigen Verstärkung die Verankerung der Hufbeinspitze im inneren Hufwinkel und den Verspannungseffekt für die weiße Linie. Im zweiten Falle des vollständigen Zugverlustes der tiefen Beugesehne fehlt zusätzlich die palmare/plantare Verankerung am Hufbein, das durch die Kontraktion der Myofibroblasten in der fächerförmigen Verstärkung des Hufbeinträgers nach vorn und oben rotiert und sich dann im Zustand der Antiration befindet (*Stashak 2002*). Durch die Antiration infolge der Eigendynamik der Myofibroblasten könnte beim Ausbleiben der Zugwirkung der tiefen Beugesehne (Tenektomie) eine krankhafte Hufbeinrotation (offenbar im beschränkten Umfang) behoben werden, indem das Hufbein wieder in die Nähe der ursprünglichen Position gebracht wird.

Der zelluläre (myofibrozytäre) Wirkungsmechanismus folgt in Abhängigkeit von der Lage unterschiedlichen Funktionsprinzipien: In der behaarten äußeren Haut (Integumentum commune) weisen die dermalen Fibroblasten in Abhängigkeit von ihrer Lokalisation innerhalb der Dermis („intrasite heterogeneity“) sowie der Lokalisation im Körper („site heterogeneity“) funktionelle und morphologische Unterschiede auf (*Jahoda et al. 1991, Dugina et al. 1998, Sorrel und Caplan 2004*). Die  $\alpha$ -SMA-reaktiven Fibroblasten werden dabei als spezialisierte Zellpopulation angesehen, die vermutlich als Quelle für die Myofibroblastendifferenzierung beispielsweise im Rahmen der Wundheilung dient (*Jahoda et al. 1991 und 2003, Sorrel und Caplan 2004*). Hier wird vor allem die auftretende Zugbelastung für die Differenzierung und den Erhalt des Myofibroblasten-Phenotyps verantwortlich gemacht. Dieser Phenotyp wird Human Dermal Myofibroblast (HDM) genannt und ist im Unterschied zu den ‚normalen‘ dermalen Fibrozyten (Human Dermal Fibroblasts, HDF) durch das Auftreten von  $\alpha$ -SMA Stress-Fasern charakterisiert (*Wrobel et al. 2002*). Sowohl HDF als auch HDM entwickelten in der Gewebekultur kontraktile Kräfte, wobei die Myofibroblasten auch bei verstärkter Substrat-Rigidität noch ihre Effektivität behalten, was ihr Auftreten unter der verstärkten Zugbelastung bei der Wundheilung erklären könnte (*Wrobel et al. 2002*). Die  $\alpha$ -SMA-positiven Zellen in der Pododerma des Pferdes sind als dermale Myofibroblasten anzusehen. Die exemplarische immunhistologische Untersuchung der vorliegenden Studie wurde an makroskopisch gesunden Hufen durchgeführt, so dass vermutlich davon ausgegangen werden kann, dass es sich hierbei nicht um Myofibroblastendifferenzierung im Rahmen einer Wundheilung (z.B. von Mikrotraumen innerhalb des Hufbeinträgers) handelt (siehe unten), sondern eher um eine spezielle Differenzierung im Rahmen des an eine hohe Zugbelastung angepassten Gewebes des Hufbeinträgers. Hierfür spricht auch die von proximal nach distal zunehmende SMA-Reaktivität innerhalb der dermalen Trajektorien, insbesondere der stark belasteten Fächerregion im distalen Bereich des Hufbeinträgers.

Im Hufbeinträger haben die Myofibroblasten eine bisher unbekannt Funktion, die vom bisher bekannten Funktionsmodus bei der Wundheilung abweicht. Möglicherweise fungieren sie in der Pododerma ähnlich wie im Sehngewebe (Ralphs et al. 2002): hier verbinden die Aktin-Filamente als Adhaerens-Junction-assozierte Stressfasern die Sehnen-Zellen untereinander entlang der Hauptzugbelastungslinien. Unter verstärkter Zugbelastung scheinen Sehnenzellen das zytoplasmatische Aktin zusammen mit Tropomyosin vermehrt einzulagern und sich dadurch in kontraktile Stressfasern umzuwandeln. Dies ermöglicht vermutlich eine verbesserte Zell-zu-Zell-Adhäsion während der Belastung sowie möglicherweise zusätzlich - durch die kontraktile Stressfasern - einen aktiven Mechanismus, um die Ausgangslage bzw. Ruheposition wieder herzustellen (Ralphs et al. 2002). Beide Mechanismen könnten im Hinblick auf den distalen Teil des Hufbeinträgers für die bereits erwähnte notwendige Eigenspannung sorgen. Dafür spricht auch die Lage der pododermalen Myofibroblasten, die – ähnlich wie Sehnenzellen - entlang der Trajektorien hintereinander angeordnet sind. Eventuell könnte das verstärkte Auftreten von Myofibroblasten im Hufbeinträger als erstes Anzeichen einer Fehlbelastung bzw. einer beginnenden Hufrehe, besonders bei der Belastungshufrehe (Budras und Huskamp 1999), gewertet werden.

## Perspektive

Die klinische Bedeutung der fächerförmigen Verstärkung des Hufbeinträgers bei der chronischen Hufrehe mit Hufbein- und Hufkapselrotation wird in Teil 2 unserer Publikation abgehandelt.

## Literatur

- Budras K. D., Hullinger R. L. und Sack W. O. (1989) Light- and electron microscopy of keratinisation in the laminar region of the equine hoof with reference in laminitis. *Am. J. Vet. Res.* 50, 1150-60
- Budras K. D. und Huskamp B. (1999) Belastungshufrehe – Vergleichende Betrachtungen zu anderen systemischen Hufrehe Erkrankungen. *Pferdeheilkunde* 15, 89-110
- Budras K. D., Huskamp B. und Schneider J. (2006) Hufrehe, Morbus apparatus suspensorius ossis unguiae. In: Dietz O. u. Huskamp B.: *Handbuch der Pferdepraxis*. Enke, Stuttgart, 972-978
- Budras K. D., Sack W. O. und Röck S. (2009) *Anatomy of the Horse*. Schlütersche, Hannover, 26-29
- Dietz O. und Huskamp B. (2006) *Handbuch der Pferdepraxis*. Enke, Stuttgart
- Dugina V., Alexandrova A., Chaponnier C., Vasiliev J. und Gabbiani G. (1998) Rat fibroblasts cultured from various organs exhibit differences in alpha-smooth muscle actin expression, cytoskeletal pattern, and adhesive structure organization. *Experim. Cell Res.* 238, 481-490
- Geyer H. (2008) Das Zehenendorgan. In: Salomon F.-V., Geyer H., Gille U. *Anatomie für die Tiermedizin*. 2.Aufl. Enke, Stuttgart, 655-676

- Hirschberg R. M. und Bragulla H. H. (2007) Funktionelle Aspekte der Angioarchitektur des Pferdehufes. *Pferdeheilkunde* 23, 27-38
- Henke F. (1997) Hufbeinträger und Hufmechanismus im Seiten-, Trachten- und Eckstrebenteil des Pferdehufes. *Vet. Med. Diss.* Berlin
- Jahoda C. A., Reynolds A. J., Chaponnier C., Forester J. C. und Gabbiani G. (1991) Smooth muscle alpha-actin is a marker for hair follicle dermis in vivo and in vitro. *J. Cell Science* 99, 627-636
- Jahoda C. A., Whitehouse C. J., Reynolds A. J. und Hole N. (2003) Hair follicle dermal cells differentiate into adipogenic and osteogenic lineages. *Experim. Dermatol.* 12, 849-859
- Kempson S. (2008) The role of the coronary suspensory mechanism in laminitis. *Proc. International Laminitis Symposium*, Berlin
- Marks G. (1984) Makroskopische, licht- und elektronenmikroskopische Untersuchungen zur Morphologie des Hyponychiums bei der Hufrehe des Pferdes. *Vet. Med. Diss.* Berlin
- Murray R. C., Dyson S. J., Schramme M. C., Branch M. und Woods S. (2003) Magnetic resonance imaging of the equine digit with chronic laminitis. *Vet. Radiol. Ultrasound* 44, 609-17
- Parks A. und O'Grady S. E. (2003) Chronic laminitis: current treatment strategies. *Vet. Clin. of North Am. Equine Pract.* 19, 393-416
- Patan B. und Budras K. D. (2009) Hoof. In: Budras, K. D., Sack W.O. and Röck S.: *Anatomy of the Horse*. Schlütersche, Hannover, 135-141
- Pellmann R., Budras K. D. und Bragulla H. (1996) Struktur und Funktion des Hufbeinträgers beim Pferd und seine Bedeutung bei der Hufrehe. *Pferdeheilkunde* 13, 53-64
- Pollitt C. C. (1993) *Video: Equine foot studies*. Queensland, Univers., Prentice Centre, Television unit
- Ralphs J. R., Waggett A. D. und Benjamin M. (2002) Actin stress fibres and cell-cell adhesion molecules in tendons: organisation in vivo and response to mechanical loading of tendon cells in vitro. *Matrix Biology* 21, 67-74
- Redden R. F. (1990) White line disease. *Equine Pract.* 12, 14-18
- Ruthe H., Müller H. und Reinhard F. (1997) *Der Huf*. Lehrbuch des Hufbeschleges, 5. Aufl., Stuttgart, Enke
- Sora M.-C. und P. Cook (2007) Epoxy plastination of biological tissue: E12 technique. *J. Plastination* 23, 31-39
- Sora M.-C. (2007) Epoxy Ppastination of biological tissue: E12 ultra-thin technique. *J. Plastination* 22, 40-45
- Stashak T. S., Hill C., Klimesh R. und Ovnicke G. (2002) Trimming for balance and soundness. In: Stashak T. S.: *Adam's lameness in Horses*; 5.ed., Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore, 1081-1122
- Sorrell M. M. und Caplan A. I. (2004) Fibroblast heterogeneity: more than skin deep. *J. Cell Science* 117, 667-675
- Wilhelm J., Probst A., Witter K., Macher R., Tonar Z., Budras K. D. und König H. E. (2005) Das Hufkissen des Pferdes: Eine federnd-elastische Struktur im Zehenendorgan. *Pferdeheilkunde* 21, 531-537
- Wrobel L. K., Fray T. R., Molloy J. E., Adams J. J., Armitage M. P. und Sparrow J. C. (2002) Contractility of single human dermal myofibroblasts and fibroblasts. *Cell Motility and the Cytoskeleton* 52, 82-90
- Zadow C. von und Budras K. D. (2008) Linea alba unguiae (Zona alba) - die weiße Linie des Pferdehufes in ihrer Semizirkumferenz. *Pferdeheilkunde* 24, 306-317

Prof. Klaus-D. Budras  
Loebellstraße 20  
14165 Berlin  
kbudras@aol.com