

Funktionelle Aspekte der Angioarchitektur des Pferdehufes

Ruth M. Hirschberg und Hermann H. Bragulla

Institut für Veterinär-Anatomie, Freie Universität Berlin

Zusammenfassung

Der Mikrovaskularisation des Hufes wird eine grundlegende funktionelle Rolle sowohl unter physiologischen als auch unter pathologisch veränderten Gegebenheiten, wie z. B. der Hufrehe, zugesprochen. Bisher liegen allerdings nur unvollständige bzw. teilweise widersprüchliche Beschreibungen der pododermalen Mikroangioarchitektur vor, gleiches gilt für die histologische Charakterisierung der perfusionsregulierenden Einrichtungen des Hufes. Unter Einbeziehung angiographischer, routinegefärbter bzw. immun- oder lektinhistochemisch markierter histologischer sowie mikrokorrosionsanatomischer Präparate neben Berücksichtigung von Scheibenplastinaten wurden in der vorliegenden Arbeit als erste Ergebnisse einer umfassenden Studie insbesondere funktionelle Aspekte der Mikrovaskularisation der Pododerma des Pferdehufes beleuchtet. Anhand von Mikrokorrosionspräparaten wurde eine systematische Beschreibung der Angioarchitektur in allen Segmenten der Lederhaut vorgelegt. Zusätzlich wurden Struktur und Lokalisation besonders modifizierter Gefäßeinrichtungen wie Sphinkterarterien und arteriovenöse Anastomosen an der Basis der Lederhautblättchen und -Zöttchen sowie präkapillärer Sphinkteren innerhalb der Mikrovaskularisation der Zöttchen und Blättchen beschrieben und ihre Rolle in der Regulation der pododermalen Mikrozirkulation diskutiert. Als Mechanismen der Angioadaptation konnten innerhalb der dermalen Mikrovaskularisation sprossende Angiogenese und intussuszeptionelles Remodelling nachgewiesen werden. Die Regulierung bzw. Anregung der pododermalen Angiogenese könnte deshalb einen neuen und viel versprechenden Ansatz für die Therapie der Hufrehe darstellen.

Schlüsselwörter: Mikrovaskularisation, Mikrozirkulation, Pododerma, Huf, Angiogenese, Intussuszeption

Functional considerations regarding the angioarchitecture of the equine hoof

The microvasculature plays a fundamental role in both physiological and pathologically altered function of the hoof, for example in laminitis. Nevertheless, only incomplete or even contradictory information regarding the pododermal microvasculature as well as regarding the histological characterisation of perfusion-regulating features of the microcirculation are available in the literature. Therefore, the present study focused on functional aspects of the pododermal micro-angioarchitecture employing angiograms, routinely stained resp. immun- and lectin-histochemically labelled histological sections as well as micro-corrosion casts and plastinated serial sections. Scanning electron microscopy of micro-corrosion casts enabled a systematic description of the microvasculature in all segments of the hoof. Additionally, structure and localisation of modified perfusion-regulating features such as sphincteric arteries and arteriovenous anastomoses at the base of the dermal lamellae or papillae as well as pre-capillary sphincters within the papillary or lamellar microvascularisation were described, and their potential role within the regulation of the pododermal microcirculation was discussed. Angioadaptive mechanisms such as sprouting angiogenesis and intussusceptive remodelling were detected within the dermal microcirculation. Control or stimulation of pododermal angiogenesis thus seems to be a new and promising therapeutic strategy for laminitis and associated hoof diseases.

Keywords: Microvascularisation, microcirculation, pododerma, hoof, angiogenesis, intussusception

Einleitung

Die Hufe des Pferdes tragen die gesamte Körperlast und zeigen einen entsprechend hoch komplexen Aufbau. Aufgrund der großen klinischen Relevanz von Hufkrankungen waren Struktur und Funktion des Hufes stets Gegenstand unterschiedlichster Untersuchungen sowohl in der Grundlagenforschung als auch in der angewandt-klinischen Forschung. Während insbesondere Hornstruktur und Hornbildung sowie biomechanische Eigenschaften des Zehenendorgans in den letzten Jahren im Zentrum des wissenschaftlichen Interesses standen (aktuelle Arbeiten über Anatomie und Biomechanik des Hufes: Pellmann 1995, Bragulla 1996, Henke 1997, Bowker et al. 1998, Douglas et al. 1998, Douglas und Thomasson 2000, Bragulla 2003, Egerbacher et al. 2005), sind dagegen die Erkenntnisse zur Regulation der Mikrovaskularisation in diesem hoch spezialisierten Organ nach wie vor unvollständig und zum Teil widersprüchlich.

Als Modifikation der äußeren Haut besteht der Huf grundsätzlich aus den drei typischen Schichten Oberhaut (Epidermis), Lederhaut (Dermis, Corium) und Unterhaut (Subcutis, Hypoderma), die jeweils die zentralen Stützteile (Hufbein, Strahlbein, Hufgelenk, distaler Anteil des Kronbeins sowie Sehnen und Bandapparat etc.) umgeben (Bragulla et al. 2004a). Während die epitheliale Epidermis für die Produktion des charakteristisch geformten schützenden Hornschuhs (Stratum corneum epidermidis) verantwortlich ist, bilden die beiden bindegewebigen Schichten Subcutis und Dermis überwiegend Polstereinrichtungen (wie das Ballenkissen, siehe Egerbacher et al. 2005) bzw. trajektorieorientierte, Kraft verteilende Strukturen (wie den Hufbeinträger, siehe Pellmann 1995, Pellmann et al. 1996, Henke 1997) aus. Die komplett avaskuläre Epidermis und die stark vaskularisierte Dermis des Hufes, zusammen auch als Pododerma bezeichnet, sind dabei sowohl in zweckgerechter als auch in räumlicher Hinsicht eng miteinander gekoppelt und formen die funktionell

wichtige, dreidimensional gestaltete dermoepidermale Grenzfläche, den Papillarkörper des Hufes, aus. Aufgrund unterschiedlicher Aufgaben und entsprechend differierender Ausprägung der drei Hautschichten in den jeweiligen Abschnitten - die vor allem durch die unterschiedliche Ausformung der dermoepidermalen Oberfläche, also des so genannten Papillarkörpers, ins Auge fallen - wird der Huf in fünf Segmente unterteilt: Saum- (Limbus), Kron- (Corona), Wand- (Paries), Sohlen- (Solea) und Ballen-Strahl-Segment (Torus, Cuneus) (Zietzschmann 1918, Nomina Anatomica Veterinaria 2005). Nur im Wandsegment ist die dermale Oberfläche leisten- oder blättchenartig ausgeformt (Lamellen); alle anderen Segmente zeigen zöttchenförmige (papilläre) Oberflächenstrukturen, wobei Form, Länge und Ausrichtung der jeweiligen Papillen stark differieren. Am Übergang vom Kron- zum Wandsegment (proximale Kappenpapillen) sowie vom Wand- zum Sohlensegment (distale Kappenpapillen und Terminalpapillen) treten ebenfalls papilläre Oberflächenstrukturen in Erscheinung (Bragulla et al. 2004a, 2004b).

Für die vaso-neuro-hormonale Koordination der Hautschichten untereinander sowie für die nutritive Versorgung des gesamten Zehenendorganes ist das Blutgefäßsystem des Hufes verantwortlich. Der Mikrovaskularisation¹ des Hufes, also den Stoff austauschenden bzw. den mikrozirkulatorisch² wirksamen Gefäßabschnitten - hier wiederum insbesondere innerhalb der Lederhaut -, wird eine grundlegende funktionelle Rolle sowohl unter physiologischen als auch unter pathologisch veränderten Gegebenheiten, wie z. B. der Hufrehe, zugesprochen (aktuelle Übersichten: Bailey et al. 2000, Moore et al. 2004). Dabei sind insbesondere die Lokalisation und die Anzahl sowie der Aufbau der arteriovenösen (AV) Anastomosen in der Huflederhaut oder/und in der Hufunterhaut für die Mikrozirkulation von besonderer Bedeutung. Zudem fehlen Erkenntnisse über Klappen in den venösen Gefäßsystemen des Hufes. Dies ist Anlass, die Feinstruktur der pododermalen Gefäße in den verschiedenen Segmenten des Hufes genauer zu untersuchen. Aufgrund methodischer Schwierigkeiten (Übersicht: Hirschberg et al. 1999) liegen bisher jedoch nur unvollständige mikrokorrosionsanatomische Studien (Schummer 1951, Mishra und Leach 1983, Marais und Mastly 1988, Marais 1989, Pollitt und Molyneux 1990, Pollitt 1995, Nasu et al. 1998) vor, und während bereits einige exemplarische Erkenntnisse zur Histologie der pododermalen Blutgefäße vorhanden sind (Schummer 1951, Talukdar et al. 1972, Becker und Wild 1981, Rooney 1984, Marks und Budras 1987, Molyneux et al. 1994, Sims et al. 1994), stehen auch hierzu systematische Untersuchungen noch aus.

Unter Einbeziehung angiographischer, routinegefärbter bzw. immun- oder lektin histochemisch markierter histologischer sowie mikrokorrosionsanatomischer Präparate neben Berücksichtigung von Scheibenplastinaten sollen im Folgenden als erste Ergebnisse einer umfassenden Studie insbesondere funktionelle Aspekte der Mikrovaskularisation der Pododerma des Pferdehufes beleuchtet werden.

Material und Methoden

Die Hufe von 20 Vorder- bzw. Hintergliedmaßen adulter Warmblutpferde (*Equus caballus forma domestica*), das Alter

der Pferde reichte von 4 bis zu 22 Jahren, wurden für mikrokorrosionsanatomische und angiographische Untersuchungen eingesetzt. Exemplarisch wurden auch Korrosionspräparate der Hufe eines Pferdefetus mit 280 mm Scheitelsteißlänge (SSL) erstellt. Die Gliedmaßen stammen aus Schlachthofmaterial oder von Pferden, die wegen infauster Prognose euthanasiert wurden, und wurden vor der Injektion auf Hufgesundheit untersucht.

Korrosionsanatomie

Für alle Hufe wurde eine an das Untersuchungsgebiet angepasste Mikrokorrosionsmethode (siehe Hirschberg et al. 1999) angewandt. Als Injektionsmedien wurden folgende Kunststoffe verwendet: Tensolzemant No. 7 (ICI Chemicals & Polymers Ltd., Darwin, Großbritannien), verdünnt mit Ethylazetat (Fluka, Buchs, Schweiz), außerdem Mercox (Japan Vilene Hospital Co. Ltd., Tokio, Japan), verdünnt mit Methylmethacrylat (Fluka) sowie Batson's No. 17 (Polysciences Inc., Warrington, USA). Nachfolgend wurden die Ausgüsse in 25%iger Natronlauge (Fluka) und 10%iger Enzymlösung (Biozym SE; Spinnrad, Gelsenkirchen, Deutschland) bei 40° C mazeriert. Während des Mazerationsprozesses wurden die Präparate in regelmäßigen Abständen unter fließendem Leitungswasser abgewaschen und für vier bis fünf Stunden unter Zusatz einiger Tropfen Detergenz (Fairy Ultra, Procter & Gamble, Mainz, Deutschland) in warmem Leitungswasser inkubiert, um danach - falls noch Reste von Gewebe vorhanden waren - erneut in Lauge oder Enzymlösung verbracht zu werden. Abschließend wurden die Ausgüsse in destilliertem Wasser gespült und in einem Wärmeschrank bei 45 °C getrocknet.

Danach wurden die Mikrokorrosionspräparate mittels eines LötKolbens sowie feiner Pinzetten und Scheren zur Gewinnung ca. 10 x 10 x 10 mm großer Proben zerteilt. Zur Probenentnahme wurden nur Gebiete mit nahezu vollständiger Gefäßfüllung - welche durch vorangehende stereomikroskopische Untersuchung ermittelt wurde - herangezogen. Es wurden Proben aus den korrosionsanatomischen Präparaten von allen fünf Segmenten des Hufes gewonnen, und zwar für Saum-, Kron- und Wandsegment jeweils lateral bzw. medial aus dem Seiten-, Trachten- und Eckstrebenanteil sowie aus der dorsalen Region des Hufes. Aus der Grundfläche des Hufes wurden für das Sohlen- und Ballen-Strahlsegment ebenfalls jeweils mittige sowie laterale und mediale Proben gewonnen. Von jeder Lokalisation wurden zwei Proben entnommen und davon jeweils eine parallel, die andere rechtwinklig zur dermoepidermalen Grenzfläche aufgeklebt, um eine vollständige Einsicht in die dreidimensionale Angioarchitektur zu ermöglichen. Die Proben wurden mit leitfähigem Klebstoff (Leit-C; Plano, Marburg) auf Aluminium-Probenteller aufgeklebt und über 3 min (Schichtdicke: ca. 30 - 45 nm) mit Gold beschichtet (Sputter-Coater: Polaron, Watford, Großbritannien). Die rasterelektronenmikroskopische (REM) Untersuchung erfolgte an einem Gerät des Typs Nanolab 2000 (Bausch & Lomb, Canada) bei einer Beschleunigungsspannung von 5 - 10 kV.

Für einen allgemeinen Überblick der Makrovaskularisation im Vergleich zu den benachbarten Strukturen der Hufkapsel und des Hufbeins wurden zwei herkömmliche Korrosionspräpara-

te mittels Technovit 7143 (Kulzer, Wehrheim; siehe Hirschberg et al. 1999) hergestellt. Die verhornten und verknöcherten Strukturen wurden durch einen milderen (10%ige Kalilauge), verkürzten und intensiv kontrollierten Mazerationsprozess erhalten, danach in Formalin fixiert (4 %, über mehrere Tage) und abschließend mit Polyethylenglykol (PEG 400; Carl Roth GmbH, Karlsruhe) imprägniert.

Angiographie

Zur angiographischen Untersuchung wurden fünf Zehen der rechten Vordergliedmaße adulter Hufe (vier bis 22 Jahre alt) verwendet. Die im Handwurzel-Mittelhand-Gelenk abgesetzten Zehen wurden direkt nach der Euthanasie der Pferde für mehrere Stunden mit dem Stumpf nach unten in Eiswasser verbracht, um die Blutgerinnung im Gefäßsystem zu vermindern. Anschließend wurden die grob gereinigten Präparate für mindestens eine Woche tief gefroren. Nach dem Auftauen wurde eine Kanüle in die Hauptmittelhandarterie eingesetzt und die dazu parallel verlaufende Vene vom umgebenden Bindegewebe befreit. Nach dem Anbringen einer Masseligator am proximalen Ende der Mittelhand wurde das Blutgefäßsystem des Präparates (in aufrechter Position) mit 200 ml einer physiologischen Kochsalzlösung gespült. Anschließend wurden je nach Größe des Präparates 60 ml bis 140 ml einer gesättigten Bariumsulfatlösung (Esophotrast®, Barnes-Hind Diagnostics, Puerto Rico, USA) über die Hauptmittelhandarterie injiziert, bis diese Lösung aus der parallel verlaufenden Vene wieder austrat. Beide Gefäße wurden anschließend ligiert. Die angiographischen Aufnahmen wurden mit einem analogen Röntgengerät (Siemens, Deutschland) angefertigt (Film: Kodak, 20 mAs, 80 KeV). Die angiographischen Aufnahmen (siehe Abb. 1) wurden mit einem hoch auflösenden (4800 dpi) Durchlichtscanner (Microtek ScanMaker 5, Microtek, Carson, California, USA) digitalisiert und zur Darstellung der mit Bariumsulfat injizierten Gefäße in den Lederhautpapillen bzw. Lederhautblättchen vergrößert.

Histologie, Lektin- und Immunhistochemie

Um die Ergebnisse der REM-Untersuchung zu überprüfen, wurde begleitend eine histologische Untersuchung von Serienschritten durchgeführt. Für diese exemplarische Untersuchung wurden vorerst nur Proben aus dem Wandsegment - das vor allem in klinischer Hinsicht am wichtigsten erscheint - herangezogen. Paraffin-eingebettete Proben aus proximaler, mittlerer und distaler Lokalisation, und zwar jeweils aus dem Zehenrücken von 5 erwachsenen Warmblutpferden, wurden in Serie geschnitten und mittels histologischer Routine-Färbungen (Romeis 1989) charakterisiert: Hämatoxylin/Eosin (HE), Perjodsäure-Schiff-Reaktion (PAS), Trichrom (GRA) sowie Resorcin-Fuchsin-Kernechtrot (RFK).

Zur Hervorhebung der pododermalen Blutgefäße innerhalb der bindegewebigen Schichten des Hufes (Leder- und Unterhaut) wurde eine lektin histochemische Markierung mittels Bandeiraea simplicifolia Agglutinin I (BSA; Dako, Glostrup, Dänemark) nach Herstellerangaben vorgenommen. Zusätzlich wurde die Lokalisation von alpha-Smooth-Muscle-Aktin (SMA) immunhistochemisch (ICH) überprüft (Primärantikörper/Maus: MCA1905HT, Serotec, Oxford, Grossbritannien; biotinierter

Sekundärantikörper/Schaf-anti-Maus: SSHPXMs Fab'2 Ig, Chemicon, Temecula, USA; Chromogen-Detektionssystem: Streptavidin-Biotin-Komplex/Horseradishperoxidase, Dako; 3,3'-Diaminobenzidin-Tabletten: Sigma-Immuno Chemicals, St. Louis, USA; Protein-Block: X0909, Dako). Geeignete Positiv-Kontrollen (menschliches und Schweine-Gewebe, nach Herstellerangaben) und Negativ-Kontrollen (Maus IgG Kontroll-Serum: X0931, Dako) wurden durchgeführt.

Scheibenplastinate

Um die Ergebnisse der mikro- und makrokorrosionsanatomischen sowie der histologischen Präparate mit der ex vivo Situation am Pferdehuf zu vergleichen, wurden zusätzlich Scheiben-Plastinate eines kompletten, arteriell injizierten Pferdehufs (siehe Probst et al. 2006) makro- und mikroskopisch untersucht.

Ergebnisse

Vergleich der unterschiedlichen Methoden zur Darstellung der Angioarchitektur des Hufs

Mit Hilfe der Angiographie (Abb. 1) sowie der makrokorrosionsanatomischen Präparation kann die Angioarchitektur der größeren Gefäße des Hufes sicher dargestellt werden. Makrokorrosionsanatomische Präparate mit Erhalt der Strukturen von Hufkapsel und/oder Hufbein (Abb. 3) sind ebenso

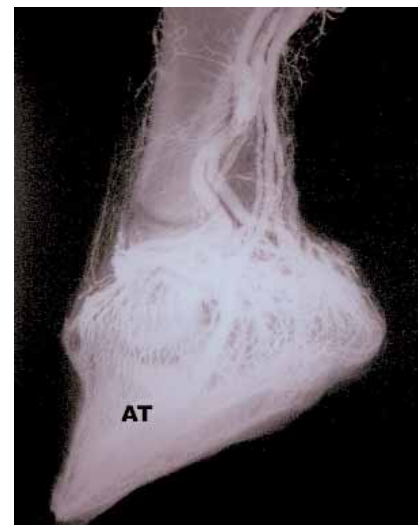


Abb 1 Angiogramm der rechten Vordergliedmaße einer 22-jährigen Warmblutstute. Bariumsulfat, 20 mAs, 80 KeV. Man beachte die zuführenden seitlichen Zehengefäße, die dichten Gefäßplexus des Hufes und die Lage des Arcus terminalis (AT) innerhalb des Hufbeins. Angiogram of the right forelimb of a warm-blooded mare aged 22 years. Bariumsulfate, 20 mAs, 80 KeV. Note the afferent lateral resp. medial vessels of the toe, the dense vascular plexus of the hoof and the position of the terminal arch (AT) within the distal phalanx.

wie die injizierten Scheibenplastinate besonders geeignet, um die Topographie bestimmter Gefäßabschnitte und damit die potentiellen hämodynamischen Engpässe - wie zum Beispiel die Primär- und Sekundäräste aus dem Arcus innerhalb der entsprechenden Hufbeinkanäle oder die den Hufknorpel durchquerenden Arterien und Venen - zu verdeutlichen.

Die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Mikrokorrosionspräparaten ist das Mittel der Wahl, um einen systematischen Einblick in die gesamte Mikrovaskularisation der Pododerma zu erhalten. Der Vergleich mit der exemplarischen Untersuchung von histologischen Serienschnitte des Wandsegments zeigt, dass die Zuordnung von Gefäßabschnitten innerhalb der Mikrovaskularisation (Arteriole, Kapillare, Venule)



Abb 2 Hufbeinoberfläche. Links: seitliche Ansicht, rechts: Aufsicht. Deutlich sind die zahlreichen perforierenden Gefäßlöcher zu erkennen. Im unteren Drittel der Hufbeinfläche sind die proximodistal verlaufenden Knochenrinnen für die basalen Blättchengefäße erkennbar. *Surface of the pedal bone. Left: lateral aspect, right: dorsal view. The numerous perforating vascular channel openings are distinct. Within the lower third of the surface of the pedal bone, the proximo-distal oriented osseous channels for the basal lamellar vessels are detectable.*

sowie die Identifizierung spezieller Kreislauf regulierender Einrichtungen (vaskuläre Sphinkteren, AV Anastomosen etc.) anhand typischer morphologischer Charakteristika (nach Christofferson und Nilsson 1988) ebenso zuverlässig wie im histologischen Präparat gelingt und dabei zusätzlich direkte Informationen über die dreidimensionale Anordnung der Mikrovaskularisation liefert. Aus diesem Grunde wird im Folgenden vor allem die REM-Untersuchung für die Beschreibung der Mikrovaskularisation herangezogen. Weitere Informationen über mögliche aktuelle Perfusionsmuster ex vivo - also über die Mikrozirkulation - liefern die begleitenden mikroangiographischen Aufnahmen bzw. die lichtmikroskopische Untersuchung der injizierten Scheibenplastinate (Abb. 7).

Makroskopische Blutgefäßversorgung des Hufes

Der Huf erhält seine Hauptblutversorgung (siehe Abb. 1) über die medialen bzw. lateralen Zehengefäße (Arteriae digitales palmares lateralis et medialis), die innerhalb des Hufbeines als Arcus terminalis miteinander anastomosierend enden. Während Saum-, Kron- und Ballen-Strahl-Segment durch jeweilige stark verzweigte und miteinander anastomosierende vorher abgehende Äste versorgt werden (z. B. A. coronalis, Ramus tori digitalis), erfolgt die Vaskularisation des Wand- und Sohlensegmentes überwiegend über radiäre und apikale, das Hufbein durchziehende Äste aus dem Arcus terminalis, die wiederum die Sohlenrandgefäße speisen und mit den entsprechenden Ballengefäßen anastomosieren. Zusätzlich entspringt vor Eintritt in das Hufbein jeweils ein Wandast (Ramus parietalis lateralis sive medialis), der durch eine entsprechende Öffnung im Hufknorpel in der Wandrinne des Hufbeins zum Huf Rücken verläuft (siehe Abb. 2), wo er mit den das Hufbein durchstoßenden Gefäßen anastomosiert. Die Sohlenfläche des Hufbeins weist demgegenüber nur

wenige kleine Öffnungen für Gefäße auf, die vom Arcus terminalis entspringen, das Hufbein durchziehen, um sich dann in der Sohlenlederhaut zu verzweigen. Das venöse System des Hufes bildet dabei stark verzweigte Plexus, die insbesondere medial und lateral des Hufknorpels besonders mächtig ausgebildet sind.

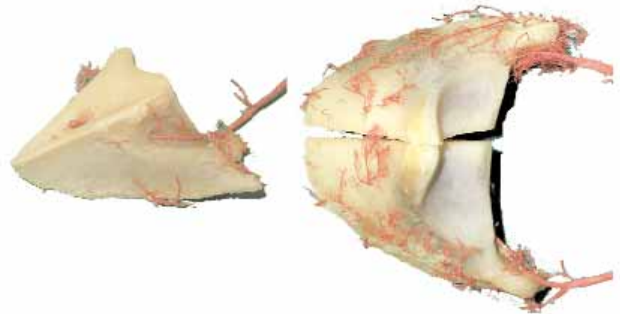


Abb 3 Arterielles Makrokorrosionspräparat mit erhaltenem Hufbein, das zur Darstellung des Verlaufs des Arcus terminalis mittig aufgesägt wurde. Links: sagittale Anschnittfläche und Aufsicht auf die Sohlenfläche, rechts: Aufsicht. Man beachte die zahlreichen perforierenden Gefäßäste aus dem Arcus terminalis für die Vaskularisation des Wand- und Sohlensegmentes.

Arterial macro-corrosion specimen with sustained pedal bone (sagittally dissected in order to display the terminal arch). Left: sagittal section and solear aspect, right: dorsal view. Note the numerous perforating vascular branches ascending from the terminal arch to supply the wall and sole segment.

Angioarchitektur der Pododerma

Im Saum-, Kron- und Ballen-Strahl-Segment bilden die subkutanen Arterien ein Netzwerk, aus dem die dermalen Gefäße hervorgehen. Im Wand- und Sohlensegment entsprechen die radiär und apikal aufsteigenden Primär- und Sekundäräste aus dem Arcus terminalis (siehe Abb. 3) dem subkutanen Arterienplexus. Innerhalb der Lederhaut verzweigen sich die Arteriolen nahe der dermoepidermalen Grenze in ein dichtes Kapillarnetz, aus dem die abführenden Venulen und Venen hervorgehen, die sich ihrerseits innerhalb der Dermis und Subkutis (exklusive Wand- und Sohlensegment) zu Plexus vereinen, und über die bereits genannten Hufvenen drainiert werden.

Mikroangioarchitektur in Saum-, Kron-, Sohlen- und Ballen-Strahlsegment (siehe Abb. 5):

Aus dem oberflächlichen dermalen Plexus, dessen Gefäße parallel zur dermalen Grundfläche angeordnet und überwiegend proximodistal mit seitlichen Verbindungsästen angeordnet sind, gehen die subepidermal gelegenen Gefäße des Papillarkörpers (siehe Abb. 4) hervor.

Das Mikrovaskularisationsmuster der dermalen Zöttchen besteht aus den in der Achse des Zöttchens gelegenen zentralen Papillengefäßen (A. und V. papillaris centralis), die an der Spitze des Zöttchens durch eine periphere Spitzenschleife direkt miteinander verbunden sind. Aus der zentralen Zöttchenarteriole geht ein - jeweils segmentspezifisch strukturiertes - dichtes subepidermales Kapillarnetz hervor, das in die zentrale Zöttchenvenule abgeleitet wird. Länge und Ausrichtung der peripheren Spitzenschleife sowie Dichte des papillä-

ren Kapillarnetzes variieren je nach Lokalisation in den einzelnen Segmenten der Huflederhaut.

Saum- und Kronsegment zeigen lange, schlanke, nach distal gerichtete Zöttchen mit vor allem im Kronsegment lang ausgezogenen Spitzenschleifen. Im Ballensegment finden sich kurze, mäßig dicht vaskularisierte Zöttchen mit kurzen Spit-

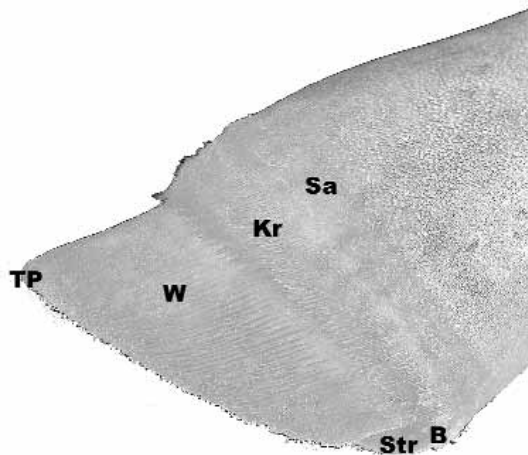


Abb 4 Mikrokorrosionspräparat der Pododerma eines männlichen Pferdefetus (SSL 280 mm). Die dichte Mikrovaskularisation spiegelt die Oberflächenstruktur des Papillarkörpers in den einzelnen Segmenten der Lederhaut wider: Zöttchen im Saum- (Sa), Kron- (Kr) sowie Ballen-Strahl-Segment (B-STR) und Blättchen im Wandsegment (W). Am Übergang zwischen Wand und Sohle liegt der Terminalbereich mit den Terminalpapillen (TP).

Micro-corrosion cast of the pododerma of a male equine fetus (CRL 280 mm): The dense microvasculature mirrors the surface structure of the papillary body within the different segments of the dermis in great detail: papillae within periopic (Sa), coronary (Kr) and bulbar (B-STR) segment resp. lamellae within the wall (W) segment. The wall-sole-junction area displays the terminal papillae (TP).

zenschleifen, die leicht zur Hufspitze geneigt und leicht geschlängelt verlaufen. Eine ähnliche Mikroangioarchitektur findet sich ebenfalls im Strahl- und im Sohlenbereich, wo die Spitzenschleifen der Zöttchen allerdings stärker zur Hufspitze geneigt und gestreckt verlaufen. Im Ballen-Strahl-Segment fallen zusätzlich regelmäßig angeordnete, rundliche gefäßfreie Areale auf, die den Ausführungsganglumina der modifizierten ekkrinen Schweißdrüsen entsprechen.

Mikroangioarchitektur der Wandlederhaut (siehe Abb. 5)

Die Gefäße des oberflächlichen dermalen Plexus im Wandsegment verlaufen überwiegend proximodistal orientiert - als Parietalarteriolen bzw. -venulen - dicht an der Oberfläche des Hufbeins in entsprechenden kleinen Knochenrinnen (siehe Abb. 2), die im Hufe älterer Pferde zu Kochenkanälchen geschlossen sein können, welche dann die Gefäße einhüllen. In unregelmäßigen Abständen sind diese parietalen Gefäße strickleiterartig durch Queräste miteinander verbunden. Von den Parietalgefäßen zweigen die Mikrogefäße für die Vaskularisation des Blättchenapparates ab.

Das Mikrovaskularisationsmuster der primären Lederhautblättchen besteht aus einem dichten, in der Blättchenebene gele-

genen, arkadenartig angeordneten und relativ gestreckt verlaufenden Arteriolen- und Venulensystem (Aa. et Vv. lamellares), aus dem in der Blättchenperipherie - also paraxial - gelegene proximodistal verlaufende Kapillarstrecken als Gefäßabbild der Sekundärblättchen entspringen (siehe Abb. 8-10). Am First der Primärblättchen entspringen distal ausgerichtete einfache oder verzweigte Kapillarschleifen als Äquivalent der

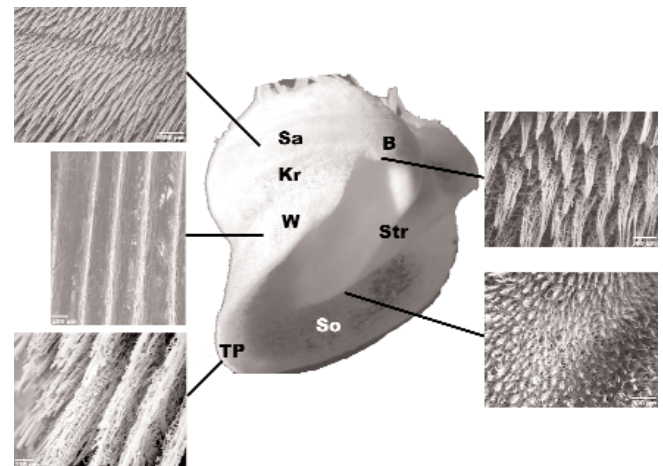


Abb 5 Übersicht über die Mikrovaskularisation und Papillarkörperstruktur in den verschiedenen Segmenten des Pferdehufes. Mikrokorrosionspräparate, REM. Saum- (Sa) bzw. Kronsegment (Kr) zeigen lange, schlanke, nach distal gerichtete Zöttchen mit vor allem im Kronsegment lang ausgezogenen Spitzenschleifen. Das Wandsegment (W) ist durch proximodistal orientierte Blättchen charakterisiert, die sich am Übergang zur Sohle in die gedrunnenen, dicht vaskularisierten Terminalpapillen (TP) auflösen. Im Ballensegment (B) finden sich kurze, mäßig dicht vaskularisierte Zöttchen mit kurzen Spitzenschleifen, die leicht zur Hufspitze geneigt sowie leicht geschlängelt verlaufen. Ein ähnliches Bild findet sich ebenfalls im Strahl- (Str) und im Sohlenbereich (So), wo die Spitzenschleifen der Zöttchen allerdings stärker zur Hufspitze geneigt und gestreckt verlaufen. Man beachte die gefäßfreien runden Areale im Strahlsegment, die den Ausführungsganglumina der modifizierten ekkrinen Schweißdrüsen entsprechen.

Overview of the microvascularisation and papillary body within the different segments of the equine hoof. Micro-corrosion cast, SEM. Periople (Sa) and coronet (Kr) display long, slender and distally oriented papillae with long peripheral loops. The wall segment (W) is characterised by proximo-distally oriented lamellae that dissolve into plump, densely vascularised terminal papillae (tp) at the wall-sole junction. The bulb (B) shows short, moderately dense vascularised papillae with short peripheral loops that are slightly tilted towards the tip of the hoof as well as slightly convoluted. A similar picture is found within the cuneal (Str) and solear (So) regions of the hoof, where the peripheral loops are more strongly angled towards the tip of the hoof and also appear straighter than in the bulb. Note the vessel-free round areas indicative of the excretory duct lumina of the modified eccrine sweat glands.

Kappenpapillen. An der Wand-Sohlengrenze entspringen aus den Blättchengefäßen die zentralen Gefäße der Terminalpapillen, welche sich in ein charakteristisch stark verzweigtes und dichtes, geschlängelt verlaufendes subepidermales Kapillarnetz auflösen (siehe Abb. 6+7). An der Spitze der Papillen befinden sich wieder lang ausgezogene Kapillarschleifen, die die zentralen Papillengefäße direkt miteinander verbinden.

Im Rücken, Seiten- und Trachtenteil der Wandlederhaut entspringen aus den hohen Primärblättchen zahlreiche niedrige

Sekundärblättchen, deren vaskuläres Äquivalent aus proximal-distal orientierten gerade verlaufenden Kapillarstrecken besteht. Ihre Dichte nimmt innerhalb der Wandlederhaut von proximal nach distal zu. Die Kapillaren der Sekundärblättchen entspringen aus dem axialen Gefäßsystem des Primärblättchens bzw. drainieren in dieses. Distal setzen sich die Gefäße der Sekundärblättchen als rippenartig proximodistal übereinander liegende Kapillarschleifen der distalen Kappen- und Terminalpapillen fort und bilden so das vaskuläre Äqui-



Abb 6 Mikrokorrosionspräparat der Terminalpapillen des Wandsegmentes. Schräge Aufsicht, oben: proximal, unten: distal, REM. Das hier nicht komplett gefüllte enge und geschlängelt verlaufende subepidermale Gefäßnetz (Sterne) der Terminalpapillen lässt deutlich die aus den zentralen Blättchengefäßen entspringenden, in der Achse der Zöttchen gelegenen zentralen Papillengefäße (ZP) erkennen. *Micro-corrosion cast of the terminal papillae of the wall segment. Oblique view, above: proximal, below: distal, SEM. The not completely filled and convoluted subepidermal capillary network (asterisks) of the terminal papillae enables to detect the central papillary vessels (ZP) within the axis of the papillae.*

valent der Kannelierung dieser Papillen (Abb. 6). Im Bereich der Eckstreben (siehe Abb. 11+12) werden die niedrigen Primärblättchen schon sehr weit proximal durch zahlreiche Sekundärblättchen zergliedert. Diese Sekundärblättchen sind deutlich höher als im Rücken-, Seiten- und Trachtenteil der Zehe und werden durch ein bereits mäßig verzweigtes Kapillarnetz vaskularisiert. Sehr hohe Sekundärblättchen zeigen dasselbe Mikrovaskularisationsmuster wie die Primärblättchen in den übrigen Abschnitten der Zehe. Sie können auch selber noch zusätzlich in Tertiärblättchen zergliedert sein, die dann die gleiche Mikroangioarchitektur wie niedrige Sekundärblättchen zeigen. Aus den Firsten der Sekundärblättchen können durchgehend kurze Papillen entspringen, deren Gefäßabbild aus kleinen, distal orientierten Kapillarschleifen besteht. In der Eckstrebe finden sich häufiger als in den übrigen Wandlederhautbereichen niedrige bis mittelhohe Nebenblättchen, die durchgehend als mäßig verzweigte zweidimensional orientierte Gefäßbarkaden charakterisiert sind. Im Bereich des Eckstrebenwinkels sind sowohl die Primär- als auch deren Sekundärblättchen niedriger und weniger stark zergliedert als im übrigen Eckstrebenbereich.

Am Ursprung der abaxialen Kapillarstrecken der Sekundärblättchen sowie innerhalb des subepidermalen Kapillarnetzes der distalen Kappen- und der Terminalpapillen können regelmäßig

zirkuläre präkapilläre Sphinktereinrichtungen nachgewiesen werden, die sich als kreisförmige Einziehungen der korrosions-anatomischen Ausgusspräparate darstellen (siehe Abb. 9).

Pododermale Angiogenese und Intussuszeption

In allen Kapillarbereichen der Pododerma können sowohl ‚klassische‘ Angiogenese - in Form von ‚blinden‘ Kapillar-

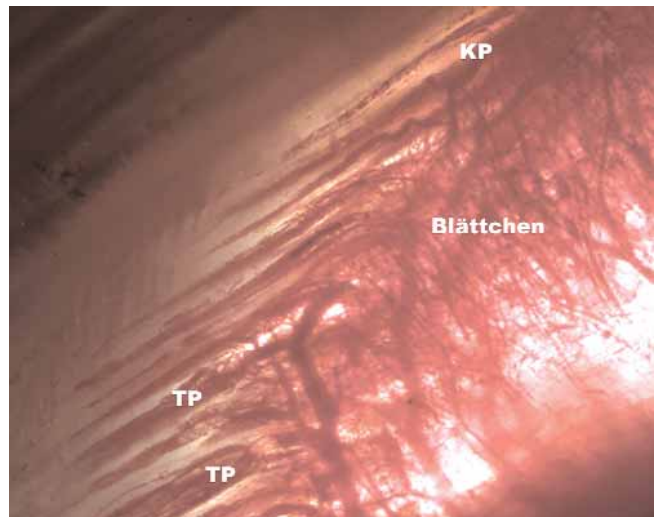


Abb 7 Arteriell injiziertes Scheibenplastinat, Terminalbereich am Übergang vom Wand zum Sohlensegment. Seitliche Aufsicht, rechts oben: proximal, links unten: distal, Lichtmikroskopie, Originalvergrößerung: x 2,5. Die Angioarchitektur der distalen Kappenpapillen (KP) und Terminalpapillen (TP) mit zentralen Zöttchenarteriolen eingebettet in ein geschlängelt verlaufendes Kapillarnetz ist gut erkennbar, ebenso die Verbindung zwischen den zentralen Papillen- und den Blättchengefäßen.

Arterially injected plastinated serial section, terminal area at the wall-sole junction. Oblique view, upper right: proximal, lower left: distal, light microscopy, original magnification: x 2.5. The angioarchitecture of the distal cap (KP) and terminal papillae (TP) with axially situated central papillary arteriole ensheathed by a convoluted capillary network is clearly detectable; likewise, the anastomosing central papillary and central lamellar vessels.

sprossen - als auch intussuszeptionelles Remodelling der Mikrovaskularisation nachgewiesen werden (siehe Abb. 10+12). Als Ausdruck der Intussuszeption werden nach Burri und Djonov (2002) schmale Gefäßbrücken sowie kleine Lücken innerhalb des Gefäßausgusses gewertet. Diese Form der Angioadaptation kommt besonders häufig im Kapillarsystem der Kappen- und Terminalpapillen sowie in den Kapillarstrecken der Sekundärblättchen des Wandsegmentes vor.

Histologische Charakterisierung der pododermalen Gefäße und spezielle kreislaufregulatorische Einrichtungen:

Der arterielle Teil des pododermalen Blutgefäßsystems zeigt Arterien bzw. Arteriolen des deutlich muskulösen Typs mit einer deutlich ausgeprägten Lamina elastica interna (entsprechend einer deutliche positiven RFK-Affinität), während sogar die größeren Venen nur durch sehr dünne Gefäßwände mit unauffälliger Tunica media charakterisiert sind.

An der Grenze zwischen oberflächlicher und tiefer Schicht der Dermis ebenso wie an der Basis der Huflederhautblättchen

können Kreislauf regulierende Sphinkterarterien dargestellt werden. Diese zeigen besondere kissenartige Einlagerungen von spezialisierten glatten Muskelzellen innerhalb der Tunica media: entgegen der sonstigen zirkulären Anordnung der Muskelzellen sind diese ‚Kissen‘ parallel zur Gefäßachse orientiert und können bei Kontraktion durch Hervortreten des ‚Kissens‘ das Gefäßlumen weitgehend verschließen bzw. - an Gefäßaufzweigungen - den Blutfluss in eine präferierte Richtung umlenken.

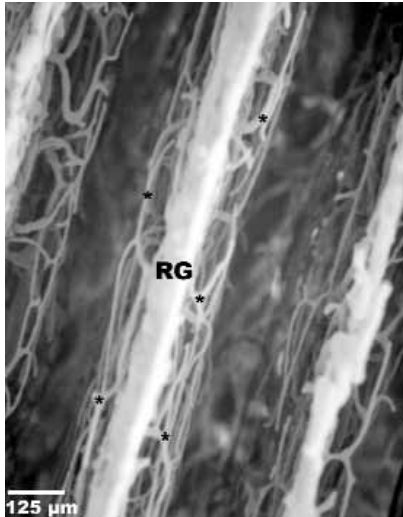


Abb 8 Mikrokorrosionspräparat der Blättchengefäße im Wandsegment. Aufsicht, oben: proximal, unten: distal, REM. RG: Randgefäße; Sternchen: paraxial gelegene, proximodistal verlaufende Kapillarstrecken als vaskuläres Äquivalent der Sekundärlamellen
Micro-corrosion cast of the lamellae of the wall segment. Dorsal view, above: proximal, below: distal, SEM. RG: marginal vessels, asterisks: paraxial proximo-distal oriented capillaries - i.e., vascular equivalent of the secondary lamellae

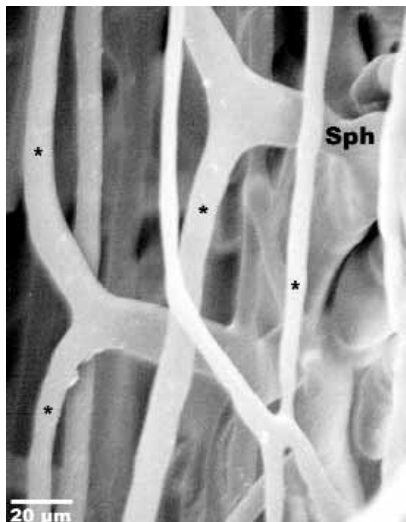


Abb 9 Detailvergrößerung der Gefäße der Sekundärlamellen. Seitliche Aufsicht, oben: proximal, unten: distal, REM. Der Ursprung der abaxialen Kapillarstrecken der Sekundärlamellen (Sterne) aus den zentralen Blättchengefäßen ist deutlich erkennbar. Hier kann die Perfusion dieser Kapillaren durch präkapilläre Sphinkteren (Sph) reguliert werden.
Detailed magnification of the capillaries of the secondary lamellae. Lateral view, above: proximal, below: distal, SEM. The origin of the abaxial capillary legs of the secondary lamellae (asterisks) from the central lamellar vessels is distinct. Perfusion of these abaxial capillaries is regulated by precapillary sphincters (Sph).

Leicht geknäuelt bzw. gerade verlaufende AV Anastomosen (siehe Abb. 13) können - ohne erkennbare regelmäßige Anordnung - in den gleichen Lokalisationen wie die Sphinkterarterien dargestellt werden. Die glatten Muskelzellen innerhalb der Tunica media dieser Anastomosen erscheinen ‚epitheloid‘ modifiziert. Die meisten untersuchten AV Anastomosen weisen entsprechend der Affinität zu RFK (siehe Methoden) überwiegend kontinuierliche und nur selten diskontinuierliche Laminae elasticae internaе auf.

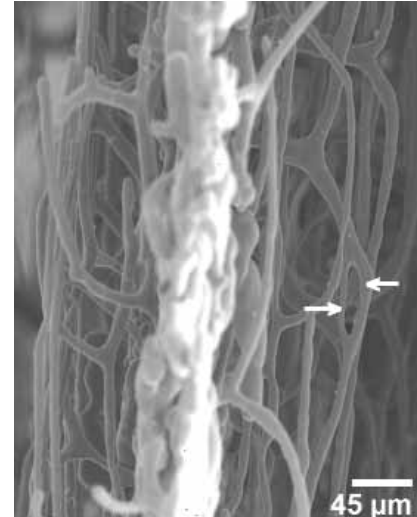


Abb 10 Mikrokorrosionspräparat eines Lederhautblättchens. Aufsicht, oben: proximal, unten: distal, REM. Die Pfeile markieren das intussuszeptionelle Remodelling, also die Erweiterung des Kapillarbettes durch das ‚Zwischenschieben‘ von Endothelzellepfilern, innerhalb der paraxialen Kapillarstrecken.
Micro-corrosion cast of a dermal lamella. Dorsal view, above: proximal, below: distal, SEM. The arrows depict intussusceptive figures within the paraxial microvasculature: remodelling of the capillary bed via intussusception of endothelial cell pillars.

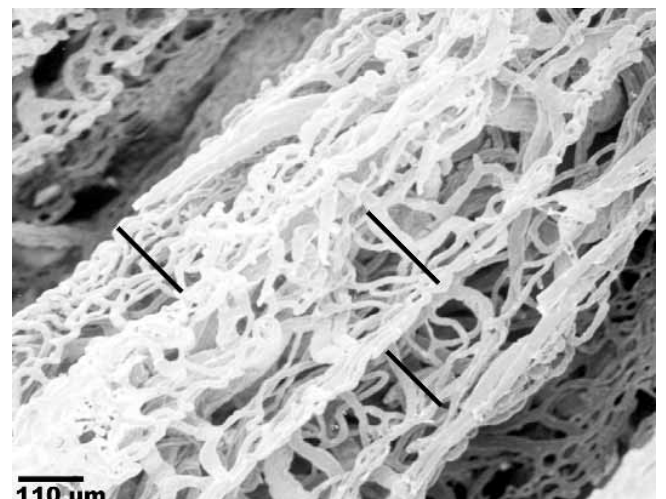


Abb 11 Mikrokorrosionspräparat eines stark zergliederten Blättchens im Eckstrebenbereich. Aufsicht, rechts oben: proximal, links unten: distal, REM. Die sehr hohen Sekundärlamellen (Gesamthöhe jeweils markiert durch die schwarzen Striche) zeigen bereits ein verzweigteres Mikrovaskularisationsmuster, ähnlich dem der Primärlamellen.
Micro-corrosion cast of a highly subdivided lamella within the buttress of the heel. Dorsal view, upper right: proximal, lower left: distal, SEM. The extremely high secondary lamellae (height indicated by black lines) display an increased branching microvasculature similar to that of the primary lamellae.

Zweizipflige Taschenklappen in den Venen können bis an die Grenze zwischen tiefer und oberflächlicher Schicht der Dermis nachgewiesen werden. Die ‚letzten‘³ Venenklappen liegen innerhalb der großen Venulen an der Basis der Lederhautblättchen.

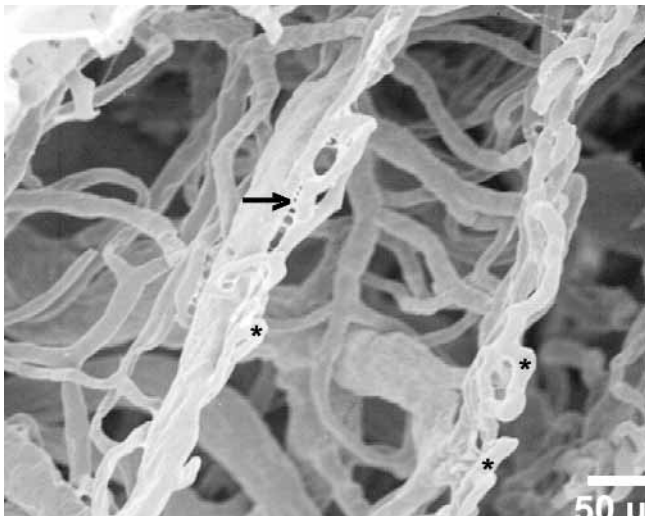


Abb 12 Mikrokorrosionspräparat der Sekundärblättchen im Eckstrebenbereich. Aufsicht, oben: proximal, unten: distal, REM. An den Firsten der hohen Sekundärblättchen entspringen kleine, distal gerichtete Kapillarschleifen (Sterne), die teilweise durch Intussuszeption (Pfeil) erweitert werden.

Micro-corrosion cast of the secondary lamellae within the buttress of the heel. Dorsal view, above: proximal, below: distal, SEM. Small distally oriented capillary loops (asterisk) arise from the ridges of the high secondary lamellae. The capillary loops are remodelled by intussusception (arrow).

Smooth-Muscle-Aktin- Reaktivität (siehe Abb. 14):

Die vaskulären glatten Muskelzellen in der Tunica media der Hufgefäße zeigen eine starke Affinität zu dem eingesetzten Smooth-Muscle-Aktin Antikörper. Innerhalb der Mikrovaskularisation der Pododerma reagieren nicht nur die muskulären Mediazellen der Arteriolen sondern auch einige Zellen der Tunica intima (spezialisierte Endothelzellen, Perizyten) im Kapillarsystem der Lederhaut.

Die inneren Schichten der ‚epitheloid‘ modifizierten Mediazellen im Mittelsegment der AV-Anastomosen zeigen häufig keine bis nur geringgradig positive Affinität zu dem Antikörper. Eine ähnlich geringgradig ausgeprägte Immunmarkierung zeigen teilweise auch die spezialisierten Mediazellen der Sphinkterarterien.

Diskussion

Im Folgenden sollen die wichtigsten funktionelle Aspekte der vorgelegten Ergebnisse zur Angioarchitektur der Hufgefäße beleuchtet werden.

Aufgrund der engen räumlichen Nähe der größeren Arterien und Venen, speziell im Verlauf des Arcus terminalis durch den Knochenkanal, wird die arterielle Pulswelle auf die begleitenden Venen übertragen, wodurch der Blutabfluss aus dem Huf

gefördert wird. Die beim Auf- und Abfußen durch den Hufmechanismus induzierten Formveränderungen des Hufes können so nach Art einer Druck-Saug-Pumpe ebenfalls den Abfluss aus den venösen Plexus unterstützen. Durch die entgegen mancher Angaben in der Literatur regelmäßig verteil-

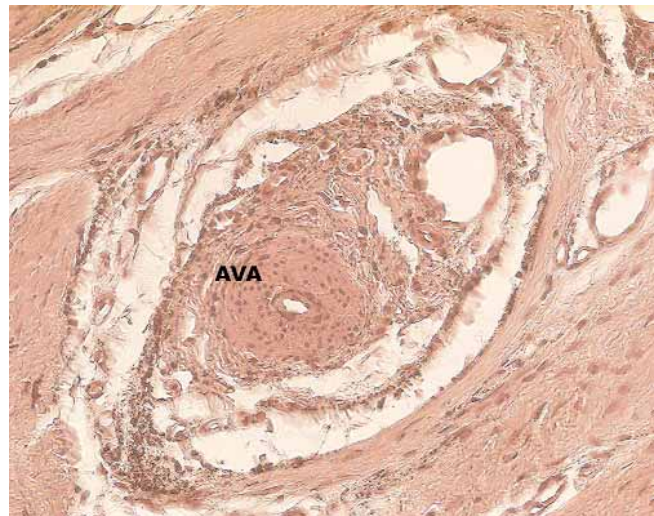


Abb 13 Intermediäres Segment einer arteriovenösen Anastomose (AVA) an der Basis eines Lederhautblättchens. Lichtmikroskopie, RFK, Originalvergrößerung: x 40. Man beachte die epitheloid modifizierten Mediazellen sowie das ausgeprägt RFK-affine subendotheliale Material der Lamina elastica interna.

Intermediate segment of an arteriovenous anastomosis (AVA) at the basis of a dermal lamella. Light microscopy, RFK, original magnification: x 40. Note the modified, epitheloid-like media cells and the distinct RFK-reactive subendothelial layer of the inner elastic membrane.

ten und bis in die oberflächlichen Schichten der Lederhaut vorkommenden Venenklappen wird der Blutabfluss aus dem Huf gefördert.

Dem im Canalis solearis des Hufbeins gelegenen Arcus terminalis bzw. den aus ihm aufsteigenden Gefäßstäben - die dem subkutanen Gefäßsystem des Wand- und Sohlensegmentes entsprechen (Hirschberg et al. 2005) - kommt besondere funktionelle Bedeutung als jeweils potentieller hämodynamischer Engpass bei allen reaktiven Knochenveränderungen des Hufbeins zu. Im Unterschied zu Saum-, Kron- und Ballen-Strahlsegment, die von untereinander anastomosierenden Gefäßstäben versorgt werden, sind das Wand- und insbesondere das Sohlensegment auf die Versorgung durch die Äste aus dem Arcus terminalis angewiesen.

Während die Subkutis überwiegend Verteilerfunktion bezüglich der Blutgefäße übernimmt, kann die oberflächliche Schicht der Dermis, das Stratum papillare resp. lamellare, als Operatorschicht bezeichnet werden, da hier die funktionell bedeutsame und aktiv regulierte Endstrombahn liegt, die vor allem für die dermoepidermale Koordination und die Ernährung der benachbarten lebenden Epidermisschichten zuständig ist. Die starke Smooth-Muscle-Aktin-Reaktivität der pododermalen Mikrozirkulation entspricht einerseits dem innerhalb von Körperextremitäten zu erwartenden überwiegend muskulär-differenzierten Gefäßtyp und spricht andererseits für eine systematische Regulierbarkeit der Mikrozirkulation in diesem Gefäßbett durch vegetative Nerven, die die glatten Muskelzellen in der Gefäßwand beeinflussen. Die Polstergefäße und AV Anastomosen an der Basis der derma-

len Oberflächenmodifikationen, also der Zöttchen und Blättchen, erlauben eine fein abgestimmte Regulierung der Lederhautperfusion. Entsprechende Einrichtungen des vegetativen Nervensystems zur Regulierung dieser Gefäße wurden bereits nachgewiesen (Buda und Budras 2005, Buda

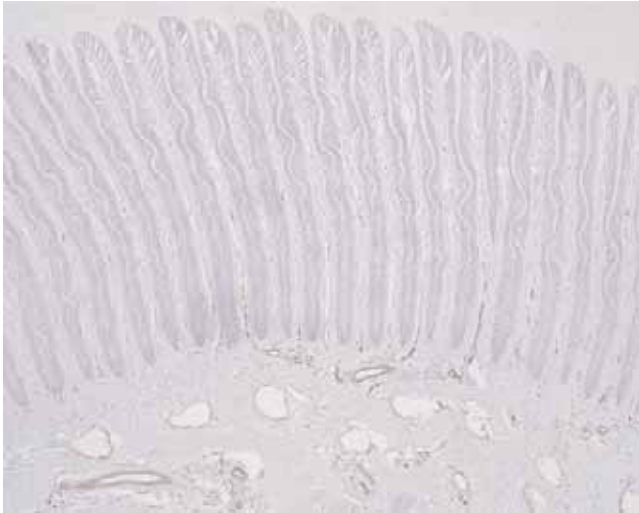


Abb 14 Immunhistochemische Markierung des Smooth-Muscle-Aktins im Wandsegment. Lichtmikroskopie, Horizontalschnitt, Originalvergrößerung: x 2,5. Man beachte die stark positive Reaktion (braune Färbung) der aufsteigenden zentralen Blättchengefäße. *Immuno-histochemical localisation of smooth-muscle-actin within the wall segment. Light microscopy, horizontal section, original magnification: x 2,5. Note the strong positive reaction (brown colouring) of the ascending central lamellar microvessels.*

und Hirschberg 2005). Entgegen der Ergebnisse früherer Untersucher (Pollitt und Molyneux 1990, Pollitt 1995) konnten AV Anastomosen nicht als regelmäßig vorkommende Bestandteile der Mikrovaskularisation innerhalb der Lederhautzöttchen bzw. -blättchen nachgewiesen werden. Stattdessen wurden präkapilläre Sphinkteren innerhalb der subepidermalen Mikrovaskularisation sowie periphere Spitzenschleifen als regelmäßig vorkommende perfusionsregulierende Elemente dokumentiert. Die peripheren Spitzenschleifen sind definitionsgemäß keine AV Anastomosen, sondern müssen als Stromkapillaren bzw. so genannte ‚thoroughfare channels‘ angesprochen werden, wie sie - ebenso wie präkapilläre Sphinkteren - für eine Vielzahl von Kapillarsystemen beschrieben wurden (Übersicht siehe: Hirschberg et al. 2001). Allein durch die Regulierung der präkapillären Sphinkteren sowie durch mechanisch verursachte ‚Abknickungen‘ von Gefäßstrecken, die bei der Belastung der Gliedmaße durch Verformung der Lederhautmodifikationen auftreten (Pellmann 1995, Henke 1997), können sowohl die in der Literatur beschriebenen physiologischen als auch die pathologisch veränderten Durchblutungsverhältnisse innerhalb der Zöttchen und Blättchen erklärt werden.

AV Anastomosen sind äußerst reaktive Bestandteile des Gefäßsystems (insbesondere in der Haut) und können innerhalb kurzer Zeit bei entsprechenden Zirkulationsbedingungen (niedrige Umgebungstemperatur, persistierende venöse Kongestion) neu gebildet werden (Molyneux und Bryden 1981). Dies mag die differierenden Ergebnisse früherer Untersucher über Verteilung und Dichte der AV Anastomosen im Gefäßsystem des Pferdehufes erklären.

Ein weiteres funktionell wichtiges Ergebnis der vorliegenden Untersuchung ist der Nachweis von angiogenen Prozessen innerhalb der Pododerma. Wie bereits für die Rinderklaue beschrieben (Hirschberg und Plendl 2005), wurde auch in der Mikrovaskularisation der Huflederhaut, insbesondere im hoch spezialisierten dermalen Anteil des Hufbeinträgers - also den Lederhautblättchen sowie in den distalen Kappen- und Terminalpapillen - sprossende Angiogenese und intussuszeptionelles Remodelling nachgewiesen. Beide Prozesse deuten auf eine Anpassung der Mikrovaskularisation an aktuelle Belastungs- und Stoffwechsellustände hin. Sowohl bei der fetalen Entwicklung des Hufes (Bragulla 1996) als auch bei reparativen Vorgängen im Zusammenhang der Hufrehe (Marks und Budras 1987, Pellmann et al. 1996) wurde auf die Bedeutung der Blutgefäße für die Anpassung mit der dermoepidermalen Grenzfläche in der Genese des segmentspezifischen Papillarkörpers bzw. bei dessen Remodelling hingewiesen. Die Regulierung bzw. Anregung der pododermalen Angiogenese könnte deshalb einen neuen und viel versprechenden Ansatz für die Therapie der Hufrehe sowie anderer assoziierter Hufkrankungen darstellen.

- ¹ Mikrovaskularisation: die gesamte Angioarchitektur innerhalb der Endstrombahn, gemeinhin Gefäße mit einem Durchmesser unter 100 µm
- ² Mikrozirkulation: aktuell perfundierte Abschnitte der Endstrombahn
- ³ oder besser, der Richtung des Blutflusses folgend: die ‚ersten‘

Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich bei Prof. Dr. H. E. König (Institut für Anatomie, Veterinärmedizinische Universität Wien, Österreich) für die zur mikroskopischen Auswertung überlassenen Huf-Plastinatscheiben. Die exzellente technische Unterstützung aus unserem Hause durch Karin Briest-Forch, Verena Eckert-Funke, Heide Kaminski und Ilona Küster-Krehahn soll ebenfalls besonders hervorgehoben werden. Unserer Präparatorin Janet Hamann danken wir speziell für die Erstellung der hervorragenden makrokorrosionsanatomischen Präparate. Unsere ehemalige Kollegin Dr. Silke Buda (z. Zt. Robert-Koch-Institut, Berlin) unterstützte uns dankenswerterweise durch die großzügige Überlassung von Probenmaterial. Abschließend möchten wir vor allem unserem langjährigen Chef und Mentor Prof. Dr. Klaus-Dieter Budras für seine inspirierende wissenschaftliche Betreuung danken!

Literatur

- Bailey S. R., Marr C. M. and Elliott J. (2004): Current research and theories on the pathogenesis of acute laminitis in the horse. *Vet J* 167, 129-142
- Becker M. und Wild P. (1981): Mikrozirkulation und Hufrehe. *Tierärztl Praxis* 9, 495-502
- Bowker R. M., van Wulpen K. K., Springer S. E. and Linder K. E. (1998): Functional anatomy of the cartilage of the distal phalanx and digital cushion in the equine foot and a hemodynamic flow hypothesis of energy dissipation. *Am J Vet Res* 59, 961-968

- Bragulla H. (1996): Zur fetalen Entwicklung des Pferdehufes. Faculty of Veterinary Medicine, Freie Universität Berlin. Habilitationsschrift
- Bragulla H. (2003): Fetal development of the segment-specific papillary body in the equine hoof. *J Morphol* 258:207-224
- Bragulla H., König H. und Budras K.-D. (2004a): Huf (Ungula). In: Budras K.-D. und Röck S. Atlas der Anatomie des Pferdes. 5. Aufl. Hanover, Schlütersche Verlagsanstalt, 26-27
- Bragulla H., König H. und Budras K.-D. (2004b): Hufbeinträger, Gefäße und Nerven des Hufes. In: Budras K.-D., Röck S. Atlas der Anatomie des Pferdes. 5. Aufl. Hanover, Schlütersche Verlagsanstalt, 28-29
- Buda S. und Budras K.-D. (2005): Die segmentspezifische Nervenversorgung am Pferdehuf. *Pferdeheilkunde* 21, 280-284
- Buda S. und Hirschberg R. M. (2005): Die Bedeutung der Blut- und Nervenversorgung für die Pathogenese und Therapie der Hufrehe. *Pferdeheilkunde* 21, 349-350
- Burri P. H. and Djonov V. (2002): Intussusceptive angiogenesis — the alternative to capillary sprouting. *Mol Aspects Med* 23, S1–S27
- Christofferson R. H. and Nilsson B. O. (1988): Microvascular corrosion casting with analysis in the scanning electron microscope. *Scanning* 10, 43-63
- Coffman J. R., Johnson J. H., Guffy M. M. and Finocchio E. J. (1970): Hoof circulation in equine laminitis. *J Am Med Vet Assoc* 156, 76-83
- Douglas J. E., Biddick T. L., Thomason J. J. and Jofriet J. C. (1998): Stress/strain behaviour of the equine laminar junction. *J Exp Biol* 201, 2287-2297
- Douglas J. E. and Thomason J. J. (2000): Shape, orientation and spacing of the primary epidermal laminae in the hooves of neonatal and adult horses (*Equus caballus*). *Cells Tissues Organs* 166, 304-318
- Egerbacher M., Helmreich M., Probst A., König H. und Böck P. (2005): Digital cushions in horses comprise coarse connective tissue, myxoid tissue, and cartilage but only little unilocular fat tissue. *Anat Histol Embryol* 34, 112-116
- Henke F. (1997): Hufbeinträger und Hufmechanismus im Seiten-, Trachten- und Eckstrebenenteil des Pferdehufes. Faculty of Veterinary Medicine, Freie Universität Berlin. Dissertationsschrift
- Hirschberg R. M., Mülling C. K. W. und Bragulla H. (1999): Microvasculature of the bovine claw demonstrated by improved micro-corrosion-casting technique. *Microsc Res Tech* 45, 184-197
- Hirschberg R. M., Mülling C. K. W. und Budras K.-D. (2001): Pododermal angioarchitecture of the bovine claw in relation to form and function of the papillary body: a scanning electron microscopic study. *Microsc Res Tech* 54, 375-385
- Hirschberg R. M. and Plendl J. (2005): Pododermal angiogenesis and angioadaptation in the bovine claw. *Microsc Res Tech* 66, 145-155
- Hirschberg R. M., von Süßkind-Schwendi M., Bragulla H. und Budras K.-D. (2005): „Form follows function“ – Neue Erkenntnisse über das Unterhautgewebe des Zehenendorgans. In: Kongressband des 26. Kongress der DVG, DVG Service GmbH, Gießen, 97
- Marais J. (1989): Peripheral vascularization of the dermal laminae of the equine hoof. *Acta anat* 134, 79-81
- Marais J. and Mastly J. (1988): Microcirculation of the coronary band of the equine hoof. *Acta anat* 133, 24-26
- Marks G. und Budras K.-D. (1987): Licht- und elektronenmikroskopische Untersuchungen über die akute Hufrehe des Pferdes. *Berl Münch Tierärztl Wschr* 100, 82-88
- Mishra P. C. and Leach D. H. (1983): Electron microscopic study of the veins of the dermal lamellae of the equine hoof wall. *Eq Vet J* 15, 14-21
- Molyneux G. S. and Bryden M. M. (1981): Comparative aspects of arteriovenous anastomoses. In: *Progress in Anatomy*, Vol. 1. Eds: RJ Harrison, RL Holmes. Cambridge University Press, UK, 207-227
- Molyneux G. S., Haller C. J., Mogg K. and Pollitt C. C. (1994): The structure, innervation and location of arteriovenous anastomoses in the equine foot. *Eq Vet J* 26, 305-312
- Moore R. M., Eades S. C. and Stokes A. M. (2004): Evidence for vascular and enzymatic events in the pathophysiology of acute laminitis: which pathway is responsible for initiation of this process in horses? *Equine Vet J* 36, 204-209
- Nasu T., Yamanaka T., Nakai M. and Ogawa H. (1998): Scanning electron microscopic study of the vascular supply of the equine hoof. *J Vet Med Sci* 60, 855-858
- Nomina Anatomica Veterinaria (NAV) (2005): International Committee on Veterinary Gross Nomenclature (I.C.V.G.A.N.), World Association of Veterinary Anatomists (W.A.V.A.), 5th edition. Editorial Committee, Hannover, Colubia, Gent, Sapporo
- Pellmann R. (1995): Struktur und Funktion des Hufbeinträgers beim Pferd. Faculty of Veterinary Medicine, Diss. Med. Vet Berlin
- 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. (1995): Foot circulation. In: *Color atlas of the horse's foot*. London: Mosby-Wolfe, 19-27
- Pollitt C. C. and Molyneux G. S. (1990): A scanning electron microscopic study of the dermal microcirculation of the equine hoof. *Eq Vet J* 22, 79-87
- Probst A., Sora M.-C., Böck P., Budras K.-D., Liebich H.-G. und König H. E. (2006): Plastinierte Schnitte von Hufpräparaten: Eine didaktisch wertvolle Ergänzung zur Darstellung anatomischer Feinstrukturen. (Plastinated sections of the hoof: an invaluable didactic addition to the demonstration of anatomical structures.) *Wiener Tierärztliche Monatsschrift* 93, 98-102
- Romeis B. (1989): *Mikroskopische Technik*. 17. Aufl. Urban & Schwarzenberg, München
- Rooney J. R. (1984): Arteriovenous anastomoses in the digit of the horse. *Eq Vet Science* 4, 182-183
- Schummer A. (1951): Blutgefäße und Zirkulationsverhältnisse im Zehenendorgan des Pferdes. *Morph Jb* 91, 568-649
- Sims D., Horne M. M., Creighan M. and Donald A. (1994): Heterogeneity of pericyte populations in equine skeletal muscle and dermal microvessels: a quantitative study. *Anat Histol Embryol* 23, 232-238
- Talukdar A. H., Calhoun M. L. and Stinson A. W. (1972): Specialized vascular structures in the skin of the horse. *Am J Vet Res* 33, 335-338
- Zietzschmann O. (1918): Das Zehenendorgan der rezenten Säugetiere: Krallen, Nagel, Huf. *Schweiz Arch Tierheilk* 60, 241-272

Dr. Ruth M. Hirschberg
 Institut für Veterinär-Anatomie
 Freie Universität Berlin
 Koserstraße 20
 14195 Berlin
 hirschberg.ruth@vetmed.fu-berlin.de

Pferdeheilkunde Forum 2007

5.-7. Juli