

Belastungssimulation an einem aus finiten Elementen konstruierten Computermodell der Hornkapsel des Pferdes

Christine Hinterhofer¹⁾, Ch. Stanek¹⁾ und H. Haider²⁾

¹⁾ Universitätsklinik für Orthopädie bei Huf- und Klautentieren, Veterinärmedizinische Universität Wien

²⁾ Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik, Wien, Arsenal

Zusammenfassung

Auf einem UNIX Rechner wurde aus finiten Elementen über ein Programm der Structural Dynamics Research Corporation ein Computermodell der Hornkapsel des Pferdes konstruiert. Der Elastizitätsmodul als für alle Berechnungen notwendiger Materialparameter wurde für die äußerste Wandschicht mit 700 N/mm², für die mittlere Wandschicht mit 800 N/mm², für die innerste Wandschicht mit 600 N/mm², für Sohlenhorn mit 300 N/mm², für Strahlhorn mit 70 N/mm² und für Ballenhorn mit 10 N/mm² angenommen. Spannungen und Verformungen wurden bei einer im Bereich des Hufbeinträgers und des Strahlbeines ansetzenden Gesamtbelastung von 30.730 N an einem „unbeschlagenen“ und einem „beschlagenen“ Hornkapselmodell berechnet.

Zonen höherer Zugspannungen findet man bei beiden Modellen gleichermaßen im Bereich der distalen Zehenwand, im Bereich der hinteren Seiten- und der Trachtenwand und an der Innenschicht der dorsalen Hornwand. Die Maximalwerte sind am „beschlagenen“ Modell durch die „Nagelung“ um ein Drittel höher als am unbeschlagenen Modell. Die Verformung der beiden Modelle ist bezüglich der Art der Verformung hinsichtlich des Zurückweichens der Dorsalwand und der seitlichen Ausbuchtung von Trag- und Kronrand der hinteren Seitenwand und der Trachtenwand gleich. Das Ausmaß der Verformung ist am „beschlagenen“ Modell um ein Drittel geringer als am „unbeschlagenen“ Modell. Nur am „beschlagenen“ Modell kann ein Absinken des Sohlendaches berechnet werden.

Schlüsselwörter: Hufmechanismus, Hufeisen, Pferd, Beschlag, finite Elemente, Computermodell, Biomechanik, Elastizitätsmodul

Simulation of pressure by means of a finite element computer model of the equine hoof capsule

A finite element model of the equine hoof capsule was constructed on a UNIX work station using a SDRC program. The modulus of elasticity was determined with 700 N/mm² for the outer layer of the hoof wall, 800 N/mm² for the middle layer and 600 N/mm² for the innermost layer, 300 N/mm² for the sole, 70 N/mm² for the frog and 10 N/mm² for the heel-bulbs. Stresses and deformations were calculated at a total stress of 30.730 N on one „unshod“ model and one model „with an iron horse shoe“.

Tension can be found equally in both models in the distal part of the dorsal wall, in the lateral wall and the quarters all the way from proximal to distal and in the innermost layer of the hoof wall, where there is contact with the coffin bone. Tension values are one third higher in the „shod“ model than in the „unshod“ because of the „hoof nails“.

The kind of deformations in both models equals concerning the proximal hoof wall, the lateral wall and the quarters, although its absolute values are one third higher in the „unshod“ model. In the „unshod“ model the lowering of the sole cannot be calculated.

keywords: hoof mechanism, horseshoe, horse, farriery, finite element, computer model, biomechanics, modulus of elasticity

Einleitung

Die mechanischen Eigenschaften von Hufhorn und untrennbar damit verbunden der Hufmechanismus haben schon zahlreiche Wissenschaftler beschäftigt. In verschiedenen Materialprüfverfahren wie Härteprüfungen, Zugversuchen, Einreißversuchen, Druckversuchen und Zerreißtests, aber auch über die Verwendung von Dehnungsmeßstreifen, von Reißlack, von videotechnischen oder radiologischen Verfahren und mit Hilfe der Computertomographie wurde die Biomechanik der Hornkapsel untersucht.

Härteprüfungen von Hufhorn wurden durchgeführt von Naumann et al. (1987) und Pellmann (1995). Das Verhalten von Hufhornprüfkörpern in Zug- und/oder Einreißversuchen wurde von Bertram und Gosline (1986, 1987), Douglas et al. (1996), Hinterhofer (1996) und Kasapi und Gosline (1996) ermittelt. Butler und Hintz (1977), Douglas et al. (1996), Landeau et al. (1983) sowie Leach und Zoerb

(1983) setzten Druckversuche ein. Zerreißversuche wurden von Küng (1991) und Leu (1987) durchgeführt.

Von den obengenannten untersuchten Butler und Hintz (1977), Küng (1991), Landeau et al. (1983), Leu (1987), Naumann et al. (1987) und Pellmann (1995) die maximalen Festigkeitswerte.

Das elastische Verhalten in Form des Elastizitätsmoduls erhoben Bertram und Gosline (1986, 1987), Butler und Hintz (1977), Douglas et al. (1996), Hinterhofer (1996), Kasapi und Gosline (1996), Landeau et al. (1983) sowie Leach und Zoerb (1983).

Mehrheitlich an Leichenteilen, aber auch beim lebenden Tier wurden zur Darstellung der bei Belastung auftretenden Verformungen der Hornkapsel Dehnungsmeßstreifen angewandt (Bein, 1984; Knezevic, 1962; Mair, 1974; Thomason et al., 1992). Harders (1985) verwendete dafür Reißlack

und *Pollit (1993)* brachte videotechnische Verfahren zu Anwendung. Eine radiologische Untersuchung liegt von *Fischerleitner (1974)* vor, und erst kürzlich erschien eine auf der Basis der Computertomographie beruhende dreidimensionale Rekonstruktion der Bewegung der Hornkapsel von *Appelbaum und Bragulla (1996)*.

Theorien zum Hufmechanismus lassen sich im wesentlichen drei Grundideen zuordnen. Die Ausdehnungstheorie wurde von *Lungwitz und Schaaf (1882)* mittels eines Hufekstasimeters überprüft und von *Peters (1883)* intensiv abgehandelt. In weiterer Folge wurde diese Theorie von *Habacher (1923)* die „Depressionstheorie nach Peters“ genannt. Weiters gibt es die sogenannte Strahlpolstererweiterungstheorie (*Steglich, 1883*) und die Rotationstheorie nach *Lechner (1882)*. Die Depressionstheorie nach Peters hat Anhänger von *Gutenäcker (1898)* über *Habacher (1923)* bis *Ruthe (1988)*. Die Strahlpolstererweiterungstheorie findet Befürworter von *Lungwitz (1917)* bis *Stashak (1987)*. Die Rotationstheorie fand bislang von Nachfolgeuntersuchern keine Bestätigung.

Die Materialtechnik und -wissenschaft nützt schon seit vielen Jahren Großrechner und entsprechende Softwareprogramme zur sogenannten Bauteilanalyse. Diese Bauteilanalyse beruht auf der Konstruktion des Bauteils aus finiten Elementen (FE). Finite Elemente sind kleine, geometrische Raumelemente, aus welchen ein Körper beliebiger Geometrie zusammengesetzt und dadurch berechenbar gemacht wird. Mittels geeigneter Programme kann man von dem Bauteil bei Belastung auftretende Spannungen und Deformationen, die Wärmeleitfähigkeit, Strömungs- und Fließigenschaften und vieles mehr berechnen.

Baut man eine Hornkapsel aus Finiten Elementen auf, wird auch sie bezüglich ihres Materialverhaltens berechenbar. Es entsteht also die Möglichkeit, das mechanische Verhalten der Hornkapsel als Ganzes objektiv zu bestimmen. Im speziellen können die bei Belastung entstehenden Verformungen und die im Material auftretenden Spannungen berechnet werden.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt unter anderem in Form von Bildern. Diese sehr anschauliche Methode zur Ermittlung der bei Belastung auftretenden Spannungen und Verformungen der Hornkapsel wird auf den folgenden Seiten vorgestellt.

Material und Methode

Die Erstellung des Modells sowie die Berechnungen von Spannungen und Deformationen wurden auf einer Rechanlage HP Apollo 900/720 mit UNIX Betriebssystem mit Software der Firma SDRC (Structural Dynamics Research Corporation, 2000 Eastman Drive, Milford, Ohio 45150, USA), durchgeführt.

Der Aufbau des Modells der Hornkapsel des Pferdes aus Finiten Elementen erfolgte in größtmöglicher Anlehnung an die Geometrie eines normalen und regelmäßigen Hufes eines mittelgroßen Warmblutpferdes, dessen Tragrandform einen Kompromiss zwischen der eines Vorder- und der ei-

nes Hinterhufs darstellt. Die Winkelung der Dorsalwand zur Tragrandebene beträgt 50° , die der Seiten- und Trachtenwände zum Boden 60° bis 80° . Die Dorsalwand ist 15 mm dick, um zur Trachte hin auf 6 mm abzunehmen. Die Dicke des Sohlen- und des Strahlhorns beträgt 10 mm. Bezüglich der Konkavität des Sohlengewölbes wurde ein Mittelmaß zwischen einer stark ausgehöhlten und einer eher flachen Sohle definiert. Der Strahl liegt mit seinen freien Kanten in einer Ebene mit dem Tragrand.

Die einzelnen Raumelemente wurden über die Eckpunkte ihrer Seitenflächen mittels Vektorkordinaten in den Rechner eingegeben. Alle Raumelemente zusammen ergeben als dreidimensionales „Puzzle“ die Form des Pferdehornschuhs. Vorausgesetzt, alle Finiten Elemente stoßen seiten- gleich aneinander, ist das Modell in seiner Geometrie für den Rechner kalkulierbar. Die verschiedenen Farben der finiten Elemente des Modells der Hornkapsel entsprechen Variablen, die mit unterschiedlichen Elastizitätswerten beschickt werden können (siehe Abb. 1a,b und Abb. 2).

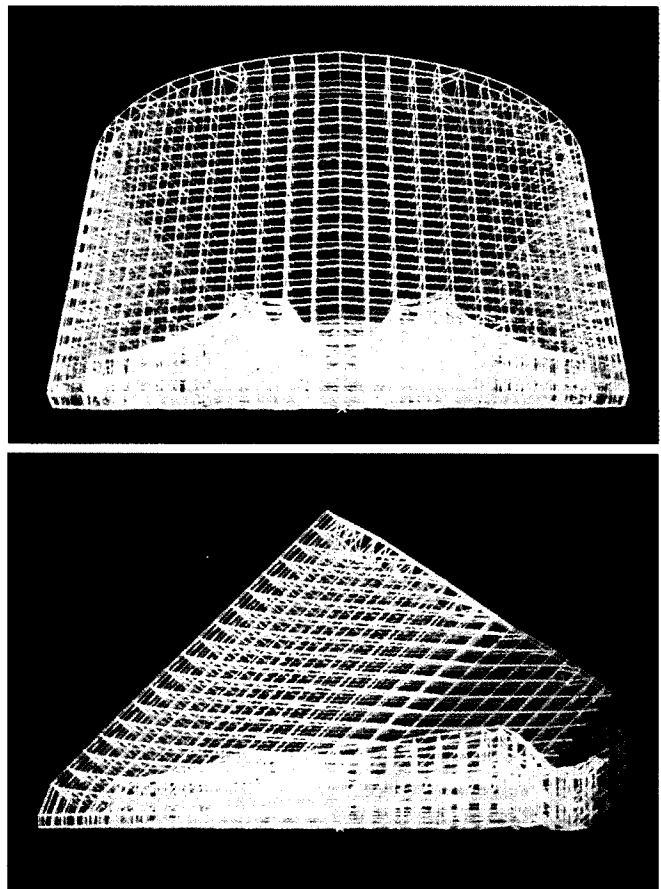


Abb. 1a,b: Das Computermodell in Netzdarstellung von vorne (a) und von der Seite (b).

The finite element computer model of the equine hoof capsule as net construction.

Neben der Geometrie des Modells werden für die Berechnung des Bauteils die elastischen Eigenschaften des Materials, im vorliegenden Fall der Elastizitätsmodul, und die Querkontraktionszahl benötigt. Der Elastizitätsmodul, kurz E-Modul, ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit ei-

nes Körpers gegen ziehende, biegende und drückende Verformung.

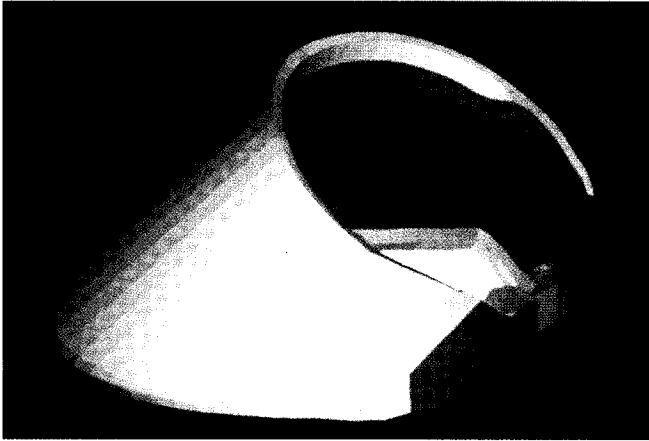


Abb. 2: Das FE-Modell der Hornkapsel: die unterschiedliche Farben der Schichten der Hornwand sowie der Sohle, des Ballens und des Strahls entsprechen den unterschiedlichen Werten für die E-Modulwerte (siehe Tab. 1).

The FE model of the hoof capsule: the different colours of the hoof wall, sole, bulbs and frog represent the different E-modulus values (see table 1).

Für die Hornkapselmodelle der vorliegenden Studie wurden als Basis die in der Arbeit *Hinterhofer (1996)* ermittelten E-Modulwerte von Hufhorn übernommen. Darin wurde der Elastizitätsmodul in insgesamt 191 Materialprüfvorgängen, davon 146 Zugversuchen und 45 Biegeversuchen, parallel zum Trockensubstanzgehalt der Hufhornprüfkörper bestimmt. Wandhorn hat demnach einen E-Modul von 500–1000 N/mm², Sohlenhorn von 200–400 N/mm² und Strahlhorn von 10–100 N/mm².

Die E-Modulwerte der mechanisch unterschiedlichen Segmente der Hornkapsel wurden für das Hornkapselmodell wie folgt definiert (Tab. 1, Variation mittel).

Die relativ starken Schwankungen der E-Modulwerte der einzelnen Tiere legten nahe, bei identischer Geometrie auch einen „weicheren“ (mit niedrigeren E-Modulwerten = Variation E-Modul tief in Tab. 1) und einen „härteren“ Huf (mit höheren E-Modulwerten = Variation E-Modul hoch in Tab. 1) zu berechnen. Die mechanisch unterschiedlichen Segmente der Hornkapsel stimmen im Bereich der Hornwand nicht ganz mit der bekannten anatomischen Schichtung überein (siehe Abb. 2).

Die Querkontraktionszahl, auch Querszahl oder Poissonzahl, ist neben dem E-Modul eine wichtige, dimensionslose Größe zur Charakterisierung des Verformungsverhaltens von Werkstoffen (*Kunz et al., 1996*). Die Querkontraktionszahl wird berechnet aus dem Verhältnis zwischen der Längen- und der Querdehnung eines Prüfkörpers.

Die Querkontraktionszahlen verschiedener Werkstoffe liegen bei Raumtemperatur sehr nahe aneinander. Stahl hat eine Querkontraktionszahl von 0,3, Gußeisen hat 0,26 bis 0,26 (*Beitz und Küttner, 1990*) und für Kunststoffe gilt 0,3 bis 0,35 (*Hellerich et al., 1992*). Für die vorliegenden Berechnungen wurde die Querkontraktionszahl für Hufhorn mit 0,3 festgesetzt.

Um Deformation und Spannungen des Modells berechnen zu können, fehlten nach der Definition von Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl noch die Belastungs- und die Auflagebedingungen.

Alle Hornkapselmodelle wurden mit einer Gesamtkraft von 30.730 N belastet. Diese Kraft resultiert aus der Annahme, daß ein mittelschweres Warmblutpferd (500 kg) bei einem Sprung über ein Hindernis oder im schnellen Galopp Kräfte bis zum Sechsfachen seines Körpergewichtes mit einem Bein auffangen muß. Die Stoßdämpfung durch die proximale Gliedmaße wird dabei nicht berücksichtigt.

Zur Imitation der Kraftübertragung über die Aufhängung des Hufbeins an der Innenseite der Hornwand (*Pellmann, 1995*) wurden 401 Kraftvektoren mit je 70 Newton Belastung an die Vektorknotenpunkte im Bereich des Hufbein-

Tab. 1: Elastizitätsmodulwerte (E-Modulwerte) in N/mm² von Wand-, Sohlen-, Strahl- und Ballenhorn des Hornkapselmodells in den Variationen mittel, hoch und tief.

E-modulus values in N/mm² of the wall, sole, frog and bulb capsule in the various alternatives middle, high and low.

Schichte	Farbe	E-Modulwerte Variation mittel	E-Modulwerte Variation hoch	E-Modulwerte Variation tief
äußere Wandhornschichte	hellblau	700 N/mm ²	900N/mm ²	450 N/mm ²
mittlere Wandhornschichte	orange	800 N/mm ²	1000 N/mm ²	500 N/mm ²
innere Wandhornschichte	dunkelblau	600 N/mm ²	800 N/mm ²	350 N/mm ²
Sohlenhorn	grün	300 N/mm ²	500 N/mm ²	350 N/mm ²
Strahlhorn	gelb	70 N/mm ²	100 N/mm ²	35 N/mm ²
Ballenhorn	violett	10 N/mm ²	50 N/mm ²	5 N/mm ²

trägers gesetzt. Weitere 38 Kraftvektoren belasten den Strahl und die umgebende Sohle im Bereich der Hufrolle. Die Belastung des Modells durch Kraftvektoren ist nicht nur in ihrem Ausmaß genau definiert, sondern durch die Richtung der Vektoren auch in ihrer Ausrichtung.

Das Programm erfordert, daß der Belastung eine Gegenkraft gesetzt wird und diese Gegenkraft entspricht den sogenannten Auflagebedingungen. Der Bauteil muß zur Gänze auf einer definierten Auflage aufliegen oder diese zumindest in einigen Punkten berühren. Die Auflagebedingungen für das Hornkapselmodell ließen zwei grundlegende Variationen des Modells zu, nämlich das „unbeschlagene“ und das „beschlagene“ Hornkapselmodell (siehe Tab. 2).

Tab. 2: Auflagebedingungen für das „beschlagene“ und das „unbeschlagene“ Hornkapselmodell.

Implemented ground conditions for the „unshod“ and the „shod“ FE-model.

Modell	Auflagebedingungen
das „unbeschlagene“ Hornkapselmodell (Spannungsbild siehe Abb.3a, b)	das Modell berührt seine Unterlage im Bereich des Tragrandes, weiters in einem dem Tragrand angrenzenden Streifen der Sohle und in großen Anteilen des Strahls
das „beschlagene“ Hornkapselmodell (Spannungsbild siehe Abb.4a,b)	das Modell liegt einer 20 mm breiten, der Form eines Hufeisens entsprechenden, eisenharten Unterlage auf und ist, um eine Nagelung zu imitieren, an sechs Bereichen zu je 6 Knotenpunkten mit dieser Unterlage fixiert; die Verteilung dieser „Nagelung“ hat eine dem Schuß entsprechende Aussparung und verteilt sich symmetrisch vor der weitesten Stelle des Hufes

Nach erfolgter Berechnung können die durch die Belastung entstehenden Druck- und Zugspannungen im Material aufgezeigt werden, man spricht von einem Spannungsbild. Als weitere Möglichkeit vollzieht der Computer die Verformung nach und stellt diese als Deformationsmuster oder als deformierten Bauteil dar.

Ein Spannungsbild einer belasteten Hornkapsel ist in den Farben rot über orange und gelb, über grün zu blau eingefärbt (siehe Abb. 3a,b und Abb. 4a,b). Am rechten Bildschirmrand ist eine Farbskala eingeblendet, die den jeweiligen Farben die absoluten Spannungswerte in N/mm² zuordnet. Rot eingefärbt sind immer die Bereiche maximaler Zugspannungen (Werte dafür sind mit einem plus versehen), ein Farbwechsel zum Blauen hin kennzeichnet eine Abnahme der Zugspannungen (minus). Diese Abnahme geht bis in den neutralen Spannungsbereich, kann in Ausnahmefällen auch Druckspannungen darstellen. Die Werte für die jeweiligen Farben beziehen sich nur auf die jeweils vorliegende Berechnung, die Ab-

solutwerte für rot bzw. blau können von Berechnung zu Berechnung unterschiedlich sein, die am Spektrum dazwischenliegenden Farben stehen in Bezug zu den jeweiligen Maximalwerten.

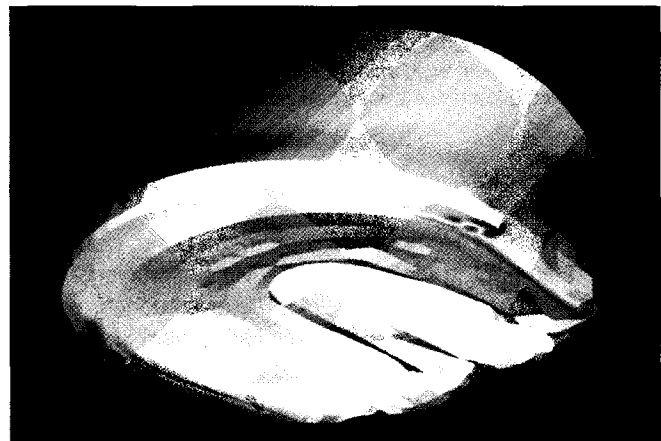


Abb. 3a,b: Das Spannungsbild des belasteten „unbeschlagenen“ Hornkapselmodells von der Seite und von unten. Die proximale Dorsalwand (gelb) liegt annähernd im spannungsneutralen Bereich, rot eingefärbt sind Gebiete höherer Zugspannungen, blau und grün stehen für Druckspannungszonen. Maximale Zugspannungswerte erreichen +30 N/mm².

Stress distribution of the „unshod“ model, taken from the side and from below. The colour red represents tension in the material, yellow is neutral going over to blue and green meaning compression. Maximum tension reaches +30 N/mm².

Die Aufzeichnung der entstehenden Verformungen kann einerseits über das sogenannte Deformationsmuster (Abb. 5) und andererseits über die Darstellung des deformierten Bauteils (Abb.7–9a,b) erfolgen. Für das Deformationsmuster stellt sich der Bauteil in verschiedenen Farben dar, die aber diesmal, wieder entsprechend einer Skala im rechten Bildschirmrand, unterschiedlichen Deformationswerten in Millimetern zugeordnet sind. Rot bedeutet das Maximum an Verformung, blau steht für keine oder nahezu keine Verformung.

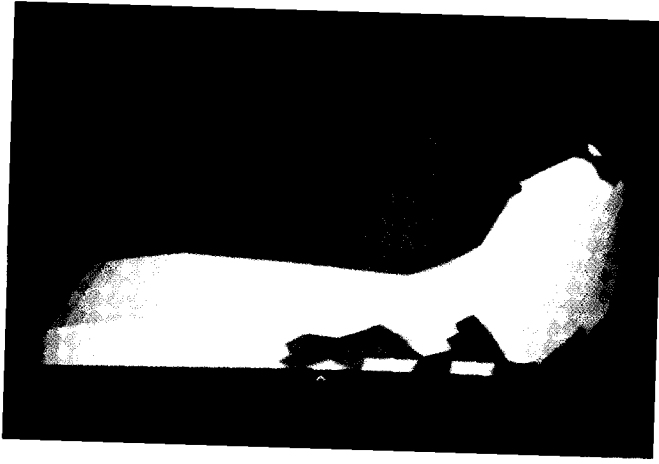


Abb. 4a,b: Das Spannungsbild des belasteten „beschlagenen“ Hornkapselmodells von der Seite und von unten. Die proximale Dorsalwand liegt auch hier im annähernd spannungsneutralen Bereich (hier blau). Ausbreitung und Maximalwerte des Zugspannungsbandes deckt sich mit dem „unbeschlagenen“ Modell. Maximal auftretende Zugspannungswerte erreichen $+43,1 \text{ N/mm}^2$ im Bereich der hintersten „Hufnägel“.

The stress distribution of the „shod“ model, taken from the side and below, does compare to the distribution of the „unshod“ model. Only around the last hoof nails the tension in the material rises to a maximum of $43,1 \text{ N/mm}^2$.

Ergebnisse

Die unterschiedlichen Spannungsbilder des belasteten „unbeschlagenen“ Hornkapselmodells sind in Abb. 3a,b, jene des belasteten „beschlagenen“ Modells in Abb. 4a,b dargestellt.

Für das belastete „unbeschlagenen“ Hornkapselmodell (Abb. 3a,b) bedeutet die Farbe gelb einen Spannungsbereich von 0 bis $+5 \text{ N/mm}^2$. Ein Zugspannungsfeld (rot) findet man in der Form einer Ellipse im Bereich der distalen Dorsalwand ($+21 \text{ N/mm}^2$). Die Zugspannungen werden zur Seite hin schwächer, um gegen den Eckstrebenwinkel hin bandförmig wieder zuzunehmen ($+19 \text{ N/mm}^2$). Vergleichbar hohe Zugspannungen findet man dorsal an der Innenseite der

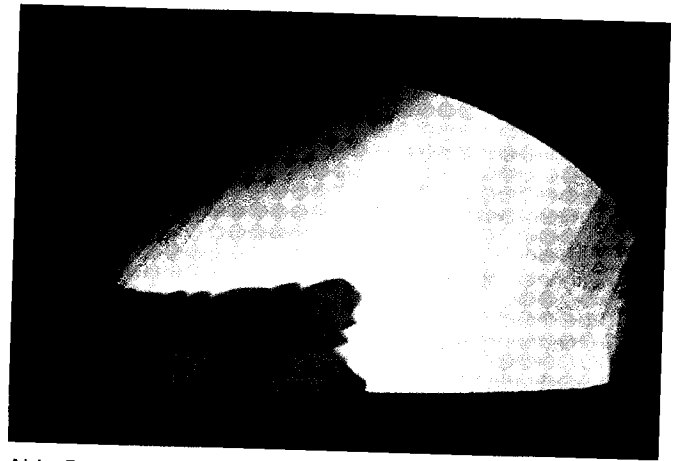


Abb. 5: Das Deformationsmuster des „unbeschlagenen“ Hornkapselmodells von der Seite. Rot bedeutet maximale Verformung, in der Farbskala übergehend auf blau (keine Verformung).

Deformation of the „unshod“ model. Red stands for maximum deformation going over to blue meaning no deformation.

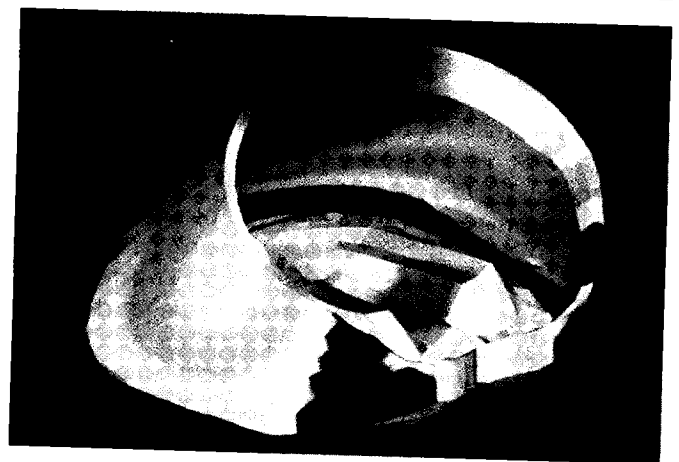
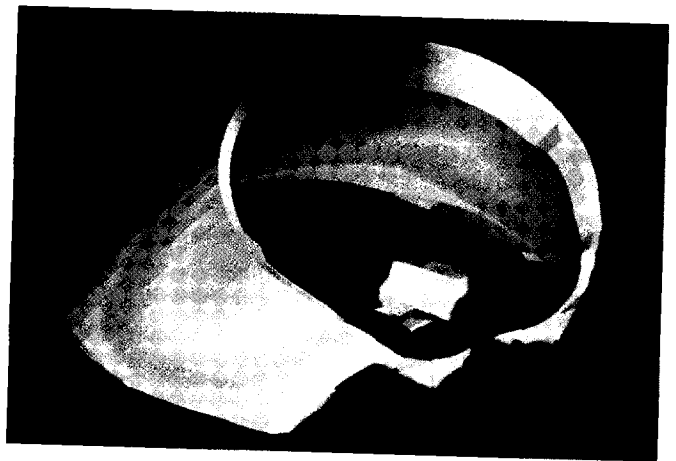


Abb. 6a,b: Deformationsmuster des belasteten „unbeschlagenen“ (a) und „beschlagenen“ (b) Modells in der Ansicht von hinten und oben. Beim beschlagenen Modell tritt im Strahlbereich eine Zone maximaler Verformung auf, die durch die rote Farbe gekennzeichnet ist.

Comparison of deformation of the „unshod“ (a) and the „shod“ (b) model. Notice the red zone in the area of the frog (b) representing maximum deformation.

Hornkapselwand. Druckspannungen von bis zu -26 N/mm^2 (grün-blau) treten im Bereich der weißen Linie der Seiten und Trachtenwand im Horn des Tragrandes auf.

Das Spannungsmuster in der Hornwand des „beschlagenen“ Hornkapselmodells gleicht in Verteilung und auch in den Absolutwerten dem Spannungsbild des „unbeschlagenen“ Hornkapselmodells. Bemerkenswert sind die Zugspannungsspitzen ($+43,1 \text{ N/mm}^2$), die im Material rund um die „Hufnägel“ auftreten. Dabei werden an den hinteren Nägeln - „rote Punkte“ in der Abbildung 4b - wesentlich höhere Zugspannungen errechnet als an den vorderen.

In der Seitenansicht besteht kein wesentlicher Unterschied zwischen dem Deformationsmuster des „unbeschlagenen“ und des „beschlagenen“ Hornkapselmodells. Die Färbung der distalen Zehenwand ist bei beiden Modellen einheitlich dunkelblau und somit den geringsten Verformungen ausgesetzt. Die proximale Zehenwand ist großflächig tiefrot und wird somit als Ort der maximalen Verformung ausgewiesen. Seiten- und Trachtenwände sind proximal gelb, gehen über grün zu hellblau im Bereich des Tragrandes über, das heißt, sie verformen sich im Bereich der Krone stärker als distal.

Ein nicht unbeträchtlicher Unterschied fällt allerdings in der Ansicht von unten oder von schräg hinten-oben auf. Bei dem „beschlagenen“ Modell, bei dem Strahl und Ballen keine Unterstützung durch die Auflagefläche erhalten, erscheint eine, an Intensität fast der proximalen Dorsalwand entsprechende Rotfärbung des Materials im Bereich der Vorwölbung der tiefen Beugesehne über das Strahlbein (Abb. 6b). Dies spricht für eine maximale Verformung in diesem Bereich. Bei dem „unbeschlagenen“ Modell ist hingegen bei unveränderter Einwirkung der Belastungsvektoren diese Verformung nicht festzustellen (Abb. 6a).

In der Darstellung des deformierten Bauteils werden die Geometrie des unbelasteten Bauteils in Netzdarstellung und das verformte Modell gleichzeitig eingeblendet. Verformungen in dieser Darstellung sind nicht im Größenverhältnis 1:1 dargestellt, sondern werden vom Programm stark überzeichnet. Diese Überzeichnung erleichtert das Auffinden der Deformation (siehe Abb. 7–9a,b). So kann in der Bauteilanalytik die Stelle eines eventuellen Materialdefekts leicht erkannt werden.

Die Stelle der maximalen Verformung ist bei allen „beschlagenen“ wie auch „unbeschlagenen“ Hornkapselmodellen die proximale Zehenwand. Dies ist sowohl in der Darstellung des Deformationsmusters, wo die Farbe rot die Zone der stärksten Deformation herausstreicht, als auch in der Darstellung des verformten Bauteils leicht erkennbar. In Zahlen ausgedrückt heißt das für das „unbeschlagene“ Modell eine Bewegung der proximalen Dorsalwand nach hinten und unten (siehe Abb. 7) um 5,7 mm. Diese maximale Verformung verringert sich in dem „beschlagenen“ Modell auf 4 mm, hingegen nimmt die Verformung des Strahl und der Sohle im Sinne einer Absenkung nach unten stark zu (siehe Abb. 8). Sowohl das „unbeschlagene“ als auch das „beschlagene“ Modell erfahren durch Belastung eine Ausbuchtung der Seiten- und Trachtenwand, jeweils proximal in größerem Ausmaß als distal im Bereich des Tragrandes.

Diese proximale Ausdehnung der Trachtenwand entspricht in Zahlen etwa zwei Drittel der maximalen Verformung im Bereich der proximalen Zehenwand. Das Ausmaß der Verformung ist unter dem Gesichtspunkt der massiven Belastung zu sehen.

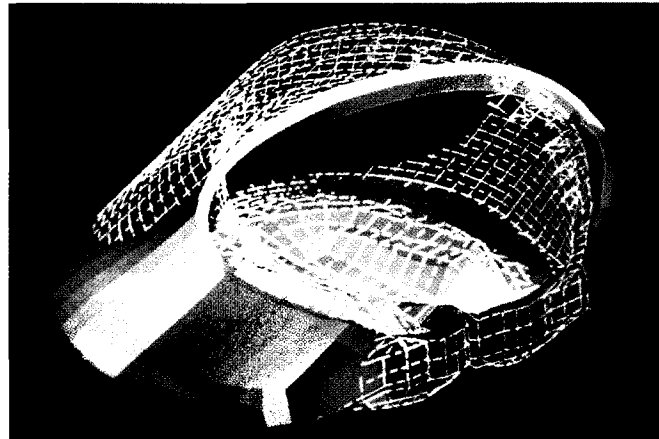


Abb. 7: Das belastete „unbeschlagene“ Hornkapselmodell mit gleichzeitiger Netzdarstellung der Ausgangsgeometrie des Bauteils.

Simultaneous presentation of the „unshod“ net-model (white/ no strain) and the deformed model (coloured).

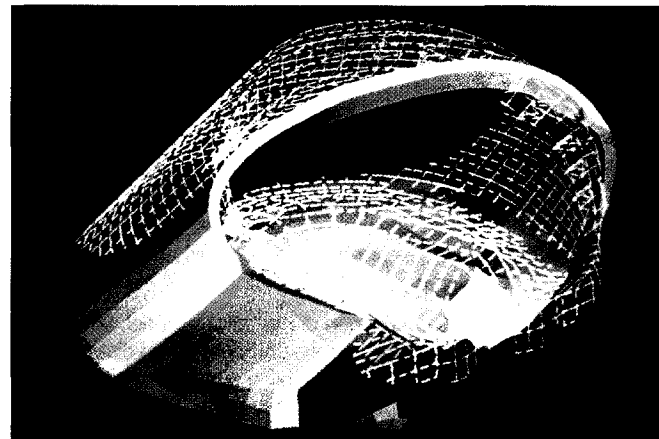


Abb. 8: Das belastete „beschlagene“ Hornkapselmodell mit gleichzeitiger Netzdarstellung der Ausgangsgeometrie des Bauteils. Die Dorsalwand weicht nach hinten, gegenüber der Abb. 7 ist die Absenkung im Strahlbereich deutlich erkennbar.

Simultaneous presentation of the „shod“ net-model (white/ no strain) and the deformed model (coloured). The hoof wall moves back, compared with picture 7 the drop in the area of the frog is clear.

In dem Modell, in dem sich der Strahl und der Trachtenrand in einer Ebene befinden (das „unbeschlagene“ Modell) konnte keine Absenkung der Sohle berechnet werden. Im Gegenteil wurde sogar eine tendenzielle Anhebung der Sohle festgestellt. Sohle und Strahl senken sich nur ab, wenn sie die Möglichkeit haben, z.B. zwischen die beiden Eisenschenkel einzuknicken (siehe Abb. 9a,b).

Diskussion

Der Aufbau des Modells

Der Aufbau des Hornkapselmodells erfolgte aus finiten Elementen. Finite Elemente werden in Form eines dreidimensionalen „Puzzles“ zur gewünschten Geometrie des Bauteils zusammengesetzt. Jeder Eckpunkt eines finiten Elements wird mittels Eingabe seiner Vektorkoordinaten definiert. Insgesamt ergibt die Summe der finiten Elemente der vorliegenden Untersuchung einen Bauteil, der in seiner Geometrie weitgehend an die Geometrie eines Pferdehornschuhs herankommt. Natürlich müssen bei der Konstruktion eines so komplizierten Modells, wie es die Hornkapsel darstellt, Kompromisse gemacht werden.

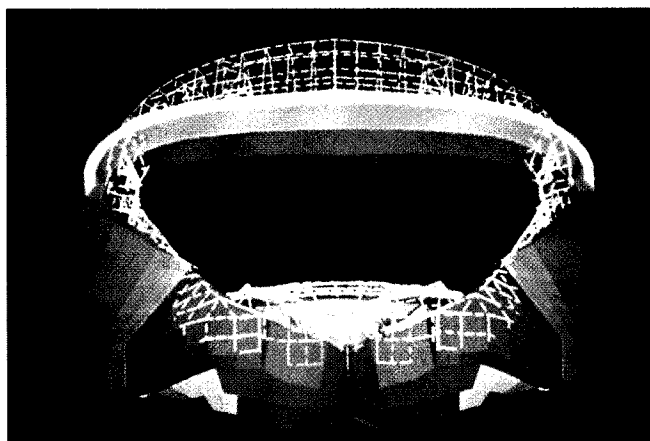
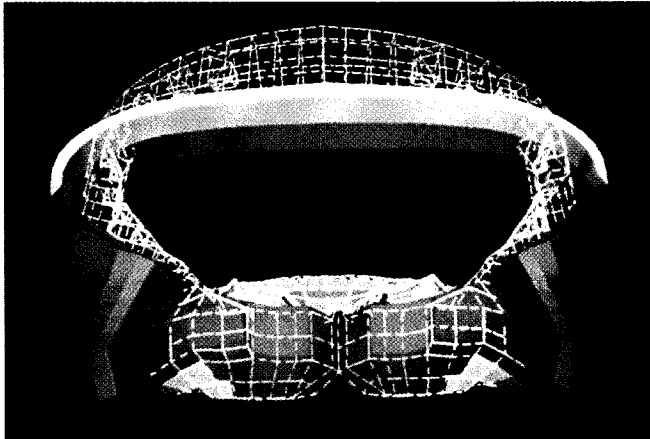


Abb. 9 a,b: Deformierte Hornkapsel des „unbeschlagenen“ und des „beschlagenen“ (9b) Hornkapselmodells genau von hinten. Am „beschlagenen“ Modell knickt der Strahl zwischen die Eisenschenkel ein.

Comparison of deformation between „unshod“ and „shod“ model, viewed from the back of the hoof. In the „shod“ model the frog bends between the iron shoe.

Der Tragrand wurde weder exakt dem typischen Hinternoch dem typischen Vorderhuf nachempfunden, sondern liegt mit seiner Form annähernd in der Mitte, um die Ergebnisse der Spannungs- und Deformationsberechnungen auf ein möglichst breites Anwendungsgebiet übertragen zu können. Die Anwendung der Ergebnisse auf in ihrer Form

veränderte Hornkapseln (kranke Hufe) ist nur unter Berücksichtigung der geänderten Geometrie möglich.

Nicht nur die Form der verschiedenen Hornkapseln, sondern auch deren unterschiedliche Festigkeitswerte zwingen einem Modell gewisse Abstriche auf. Der Elastizitätsmodul von Hufhorn, der in der vorliegenden Arbeit als Materialparameter für den Rechner eingesetzt wurde, ist starken Schwankungen unterworfen, entsprechend den zahlreichen Faktoren, die auf Qualität und Festigkeit von Hufhorn Einfluß haben (Hinterhofer, 1996). Unter der Voraussetzung, daß die E-Modulwerte der einzelnen Segmente zueinander ein relativ stabiles Verhältnis einnehmen (der Strahl ist immer weicher als die Hornsohle und diese wiederum immer weicher als die Hornwand), wurden Vorversuche mit gesteigerte bzw. verminderten E-Modulwerten berechnet. Eine Erhöhung der E-Modulwerte („härterer Huf“) resultierte in einer Steigerung der im Material auftretenden Spannungen bei gleichzeitiger Verminderung der maximalen Verformung. Die Verringerung der E-Modulwerte („weicherer Huf“) erbrachte das Gegenteil, nämlich eine gesteigerte Deformation bei geringerer Spannung im Material. Die Spannungsverteilung und das Deformationsmuster der auf diese Weise berechneten Modelle zeigten keine prinzipiellen Abweichungen von den Ergebnissen der hier vorgestellten Hornkapselmodelle.

Die bezüglich der verschiedenen Wandabschnitte stark divergierenden elastischen Eigenschaften der Hornwand des Pferdes machte weitere Differenzierung der mechanischen Schichtung des Hornkapselmodells von der aus der Literatur bekannten anatomischen Schichtung notwendig. Die Blättchenhornschichte ist auf Grund ihres Aufbaus weicher und gegen biegende, drückende oder ziehende Verformung wesentlich weniger widerstandsfähig als die äußere Röhrenhornschichte. Diese Schichte von hoher Elastizität (Abb.2, dunkelblau), die ja erst die Aufhängung des Hufbeines in der Hornkapsel ermöglicht, mußte bei der Konstruktion des Modells unbedingt berücksichtigt werden. Nach außen schließt die widerstandsfähigste Schichte der Hornwand an, die ebenfalls im gesamten Hornwandbereich definiert wurde.

Hinterhofer (1996) stellte fest, daß Hufhorn-Prüfkörper aus dem Trachtenwandbereich höhere E-Modulwerte aufweisen als entsprechende Dorsalwand-Prüfkörper. Auch Küng (1991) bestimmte die maximalen Zugfestigkeitswerte für Hufhornproben aus dem Trachtenwandbereich höher als die Zugfestigkeitswerte von entsprechenden Dorsalwandproben. Um diesen Untersuchungen gerecht zu werden, wurde im Bereich der Dorsalwand, zur Mitte der Seitenwand hin auslaufend, die dritte und äußerste Schichte der Hornwand aufgebaut, die mit ihren Festigkeitswerten genau zwischen der inneren und der mittleren Schichte liegt. Diese so konstruierte dritte Hornschichte war auch notwendig, um die Anforderungen an die durchschnittliche Wanddicke einer Dorsalwand zu erreichen.

Die Belastungsparameter

Die Belastung der Hornkapselmodelle der vorliegenden Untersuchung wurde einheitlich mit je 30.730 N definiert, da

ein Pferd bei einem Sprung über ein Hindernis oder im Renngalopp bis zum 6fachen seines Körpergewichtes mit einem Bein auffangen muß (Annahme eines Warmblutpferdes von 500 kg $KM \times 6 = 3.000 \text{ kg} = 30.000 \text{ N}$). Durch die Zuteilung von 70 N pro Belastungsvektor und den Einsatz von insgesamt 439 Vektoren ergibt sich die Gesamtbelastung von 30.730 N. Da Gelenke, Sehnen, Bänder und Muskulatur der proximalen Extremität in noch nicht genau definiertem Ausmaß an der Stoßdämpfung dieser Gesamtbelastung beteiligt sind und diese Dämpfung nicht berücksichtigt wurde, kann die Belastung von 30.730 N als sehr hoch und nicht realistisch kritisiert werden. Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war jedoch die Darstellung der Verformung der Hornkapsel bei Belastung und vorerst nicht die Bestimmung der Absolutwerte der Deformation. In diesem Sinne trägt die hohe Belastung sogar dazu bei, die Verformungen deutlicher zu zeigen, als es bei schwächerer Belastung möglich gewesen wäre.

Die Wahl der Knotenpunkte als Ansatz für die Belastungsvektoren wurde im wesentlichen in Anlehnung an den Hufbeinträger definiert. Zusätzlich wurden Belastungsvektoren im Bereich der Hufrolle gesetzt, da eine Kraftübertragung von den zentralen Stützelementen auf den Hornschuh hier nicht auszuschließen ist. Einzig durch diese Annahme der Belastungsvektoren konnte eine Verformung der Hornkapsel berechnet werden, die mehrheitlich mit den in der Literatur beschriebenen Gestaltsveränderungen (*Lechner, 1882; Peters, 1883; Steglich, 1883; Gutenäcker, 1898; Lungwitz, 1917; Habacher, 1923; Stashak, 1987; Ruthe, 1988*) übereinstimmen, nämlich das Zurückweichen und gleichzeitige Absenken der proximalen Dorsalwand, die Bewegung in Bereich des Trachtenragandes und die Ausbuchtung des Seiten- und Trachtenkronrandes zur Seite hin.

In einer anderen Berechnung wurde die Belastung des Modells im Sinne der Strahlpolsterweiterungstheorie so simuliert, daß bei gleichbleibender Gesamtbelastung die Belastungsvektoren vermehrt im Bereich des Strahls und der umgebenden Sohle gesetzt wurden. Ein weiterer Vorversuch bestand darin, ein Modell zu berechnen, deren Belastungsvektoren ausschließlich im Bereich der Wand angriffen. Die bekannte Deformation (s.o.) der Hornkapsel konnte durch eine Belastung dieser beiden Modelle nicht berechnet werden.

Der Berechnungsmodus

Betrachtet man die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, so muß berücksichtigt werden, daß alle Berechnungen rein statisch durchgeführt wurden. In der Realität kommt selbstverständlich eine Hornkapsel nie mit allen Punkten der Bodenfläche gleichzeitig auf dem Untergrund auf, und sie wird auch nie in allen Punkten zur selben Zeit und in die gleiche Richtung belastet. Hier stößt man zwar einerseits an die Grenzen der verwendeten Software, andererseits ist diese Untersuchung genau dadurch mit vielen Arbeiten bezüglich des Hufmechanismus vergleichbar, da die meisten Untersuchungen an ebenso rein statisch belasteten Leichenteilen durchgeführt wurden. Natürlich wäre die Erstellung eines

dynamischen Modelles naheliegend und wünschenswert. Allein war dies weder mit dem vorhandenen Programm noch mit der Rechnerkapazität zu realisieren.

Die Auflagebedingungen

Unter „Auflagebedingungen“ versteht man die Information, die der Rechner als Gegenkraft zu den definierten Belastungsbedingungen benötigt. Jeder Bauteil muß verständlicherweise auf einer Unterlage stehen und gegebenenfalls auf dieser mit wenigen Knotenpunkten fixiert sein.

Diese Fixierung wird in den meisten Fällen so gering als möglich gehalten, um Einflüsse auf die Mechanik des Bauteils zu minimieren. Im konkreten Fall des „unbeschlagenen“ Hornkapselmodells konnte die notwendige Fixierung des Bauteils auf der Unterlage mit nur 6 einzelnen Knotenpunkten im Bereich des Sohlenkörpers erlangt werden. Diese Fixierung ist am Spannungsbild des Modells nur als feiner rötlicher Schatten erkennbar (siehe Abb.3b), eine Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften des Bauteils durch die Fixierung ist somit auszuschließen.

Die Fixierung des „beschlagenen“ Hornkapselmodells erfolgte in 6 Bereichen zu je 4 Knotenpunkten in symmetrischer Verteilung vor der weitesten Stelle des Tragrandes. Im Bereich der Zehe wurde ein dem Schuß eines Hufeisens entsprechender Abstand freigelassen (siehe Abb. 4b). Diese 6 Fixierungspunkte entsprechen in ihrer Verteilung der optimalen Nagelsetzung für ein Pantoffeleisen. Bei der Berechnung eines auf diese Weise fixierten Modells fällt auf, daß die hinteren „Nägel“ weit höhere Zugspannungen im Hufhorn der direkten Umgebung verursachen als die vorderen. Diese Information deckt sich mit der jahrhundertalten Erfahrung des Schmiedes und des Tierarztes, daß der hinterste Hufnagel den stärksten Beanspruchungen ausgesetzt ist und meist auch als erster reißt, bricht oder verloren wird.

Allerdings werden bei einer effektiven Nagelung die mechanischen Beanspruchungen, die das umgebende Material betreffen, auf den gesamten Nagel und auch die Niete aufgeteilt. Die Fixierung über die 4 Knotenpunkte stellt somit die absolut auftretenden Zugspannungen viel höher dar, als sie am realen Huf zu erwarten wären. Die Verteilung der entstehenden Spannungen, nämlich daß ein Zehennagel weit weniger Belastungen ausgesetzt ist als ein weit hinten gesetzter Hufnagel, ist aber offensichtlich und streicht mit noch nie aufgezeigter Deutlichkeit die Problematik von zu weit hinten gesetzten Hufnägeln heraus.

Weiters von Bedeutung ist, daß sowohl die Unterlage, die am „beschlagenen“ Hornkapselmodell das Hufeisen darstellt, als auch der „Boden“ für das „unbeschlagene“ Modell nicht nachgeben können. Alle Berechnungen müssen im Vergleich zu einem auf Asphalt bewegten Pferd beurteilt werden. In weiteren Belastungssimulationen wäre auch eine weichere Unterlage definierbar.

Der Unterschied zwischen dem „unbeschlagenen“ und dem „beschlagenen“ Hornkapselmodell besteht, neben der erwähnten Fixierung, in dem Ausmaß der Berührungspunkte mit der Auflagefläche. Das „unbeschlagene“ Modell berührt die Auflage in den Punkten

des Tragrandes, in einigen angrenzenden Sohlenknotenpunkten, in den untersten Punkten des Strahls und in wenigen Ballenpunkten. Dieses Modell entspricht einem Huf, bei dem der Hornstrahl in einer Ebene mit dem Trachtentragrand liegt. Zur Darstellung des „beschlagenen“ Modells wurde die Auflagefläche auf einen 20 mm breiten Auflagestreifen in Form des Tragrandes reduziert. Genauso wie bei einem realen, beschlagenen Huf, der auf hartem Untergrund steht, berühren die Sohle und der Strahl den Boden nicht.

Es ist nicht auszuschließen, daß man über ein Modell eines Hufes mit schmalen Tragrand und stark konkaver Sohle, dessen Strahl den Boden nicht berührt, Deformationsergebnisse erhält, die dem „beschlagenen“ Modell ähnlich sein könnten.

Die Spannungen in der Hornkapsel

Die Interpretation der im Material der Hornkapsel auftretenden Spannungen ist nicht in allen Segmenten so einfach, wie im Falle der Zugspannungsspitzen in der Umgebung der Nagelung.

Von außerordentlichem Interesse ist das Zugspannungsband im Seiten- und Trachtenwandbereich, welches exakt mit der Prädilektionsstelle für Trachtenwandspalten übereinstimmt. Ebenso hervorzuheben ist, daß sich in der distalen Zehenwand genau in der Mitte ein Zugspannungsfeld darstellt. Ein Tragrandhornspalt, der in dieses Spannungsfeld eintritt, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit großen Bean-

spruchungen ausgesetzt. Das Zugspannungsfeld an der Innenseite der Hornwand erklärt sich durch die im Sinne des Hufbeinträgers ansetzende Belastung.

Die hohen Druckspannungen, die im Bereich der weißen Linie von Seiten- und Trachtenwandtragrand ausschließlich im „unbeschlagenen“ Hornkapselmodell auftreten, könnten durch die stärkere Exkursion der Hornwand am Kronrand zu erklären sein. Dadurch ist im Bereich des Tragrandes in diesen Segmenten ein nach innen gerichtetes Kraftmoment anzunehmen.

Die Verformung der Hornkapsel

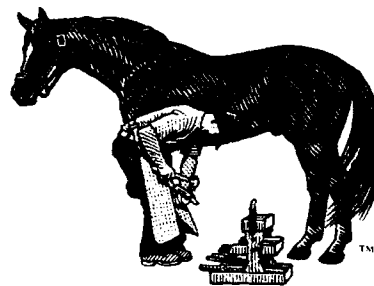
Die Hornkapselmodelle der vorliegenden Arbeit bieten eine objektive und sehr anschauliche Möglichkeit, die Verformung der Hornkapsel darzustellen. Man kann die Deformationen, die in Übereinstimmung mit der spezifischen Literatur stattfinden, wie folgt zusammenfassen:

Die Zehenwand bleibt in ihrem distalen Drittel unverändert, das mittlere und das proximale Drittel der Wand senkt sich verlaufend nach hinten und unten, wodurch die Gesamthöhe des Hufes eine Verringerung erfährt. Die maximale Verformung besteht im Bereich der proximalen Zehenwand. Die Seiten- und die Trachtenwände erfahren bei Belastung eine Ausbuchtung zur Seite, wobei sich der Kronrand in jedem Fall stärker bewegt als der Tragrand. Der Strahl senkt sich ab.

Diese Art der Verformungen ermittelten auch Appelbaum und Bragulla (1996) durch computertomographische Unter-

Hufprobleme ?

Farrier's Formula™



Life Data
LABS. INC

**Von bekannten deutschen und internationalen
Tierärzten und Hufschmieden empfohlen**

Wir fördern den DVSP e.V. durch Spenden
Fordern Sie unsere Produktinformationen an

ATCOM  **HORSE** GmbH

Ihr Partner für Qualitätsprodukte rund um das Pferd

Alte Dorfstraße 14, 21726 Kranenburg Tel.: 04140-870087 Fax: 04140 870088

suchungen von unbelasteten und im belasteten Zustand tiefgefrorenen Zehenendorganen.

Sohle und Strahl senken sich im Modell nur ab, wenn sie die Möglichkeit haben, zwischen die beiden Eisenschenkel einzusinken (Abb. 9a,b). Der Beschlag mit geschlossenen Hufeisen als Therapie für Strahlbeinlahmheiten spricht für diese Beobachtung. Offene Hufeisen induzieren offensichtlich schmerzhaft Belastungsverhältnisse im Bereich der Hufrolle. Diese Annahme erhält durch die unterschiedlichen Deformationsberechnungen von dem „beschlagenen“ und dem „unbeschlagenen“ Hornkapselmodell eine objektive Unterstützung.

Die hier vorgestellten Hornkapselmodelle wurden bereits zur Berechnung der Einflüsse von Hornspalten auf die Biomechanik der Hornkapsel umgestaltet. Weiters wurden unterschiedliche Therapiemethoden von Hornspalten erarbeitet und mechanisch definiert. Die Anwendung der Modelle im Hinblick auf die Evaluierung von Kunststoff-Hufschutz ist vielversprechend.

Literatur

- Appelbaum, F. und Bragulla, H. (1996): Untersuchungen zum Hufmechanismus. 5. Gem. Hufbeschlagstagung, 16. Nov. 1996 in Dortmund, Deutschland.
- Bein, L. P. J. (1984): Prüfung eines elastischen Pferdehufbeschlags mit Hilfe unguolographischer Untersuchungen im Vergleich zum Eisenbeschlag. Diss., Vet. med. Fak., Univ. Zürich.
- Beitz, W. und Küttner, K.-H. (1990): *Dubbel*, Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag, Berlin.
- Bertram, J. E. A. and Goseline, J. M. (1986): Fracture toughness design in horses hoof keratin. *J. Exp. Biol.* 125, 29–47.
- Bertram, J. E. A. and Goseline, J. M. (1987): Functional design of horses hoof keratin: the modulation of mechanical properties through hydration effects. *J. Exp. Biol.* 130, 121–136.
- Butler, K. D. and Hintz, H. F. (1977): Effect of level of feed intake and gelatine supplementation on growth and quality of hooves of ponies. *J. Anim. Sci.*, 44, 267–261.
- Douglas, J. E., Mittal, C., Thomason, J. J. and Jofriet, J. C. (1996): The modulus of elasticity of the equine hoof wall: implications for the mechanical function of the hoof. *J. Exp. Biol.*, 199, 1829–1836.
- Fischerleitner, F. (1974): Röntgenographische Untersuchungen über den Einfluß der Lageveränderung des Huf- Strahl- und Kronbeines auf die Mechanik der Hornkapsel des Pferdes im Belastungsgerät. Diss., Vet. Med. Univ., Wien.
- Gutenäcker, F. (1889): *Die Lehre vom Hufbeschlag*. Schickhardt und Ebner, Stuttgart.
- Habacher, F. (1923): *Der Huf- und Klauenbeschlag*. 5. Aufl., Braumüller, Wien und Leipzig.
- Harders, T. (1985): Die elastische Verformung des Pferdehufes. Diss., Tierärztl. Hochsch., Hannover.
- Hellerich, W., Harsch, G. und Haenle, S. (1992): *Werkstoff-Führer Kunststoffe*. Carl Hanser Verlag München Wien, 214.
- Hinterhofer, Ch. (1996): Untersuchungen zum Kleben von Hufhorn mit besonderer Berücksichtigung der Versorgung von Hornspalten beim Pferd. Diss., Vet. Med. Univ. Wien
- Kasapi, M. A. and Gosline, J. M. (1996): Strain-rate-dependent mechanical properties of the equine hoof wall. *J. Exp. Biol.*, 199, 1133–1146.
- Knezevic, P. F. (1962): Klinik des Trachtenzwanghufes und Grundlagen der Ungulographie mit Dehnungsmeßstreifen beim Pferd. *Wien. Tierärztl. Mschr.* 49, 777–824, 870–904, 944–959.
- Kunz, J., Land, W. und Wierer, J. (1996): Neue Konstruktionsmöglichkeiten mit Kunststoffen. WEKA, Fachverlag für technische Führungskräfte, Teil 5, Kap. 4.7, S.4.
- Küng, M. (1991): Die Zugfestigkeit des Hufhornes von Pferden. Diss., Vet. Med. Fak., Univ. Zürich.
- Landeau, J. L., Barret, D. J. and Batterman, S. C. (1983): Mechanical properties of the equine hooves. *Am. J. Vet. Res.* 44, 100–102.
- Leach, D. H. and Zoerb, G. C. (1983): Mechanical properties of the equine hoof wall tissue. *Am. J. Vet. Res.* 44, 2190–2193.
- Lechner, J. (1882): Beitrag zum Hufmechanismus. *Dtsch. Z. Tiermed.* 8, 179–199.
- Leu, U. (1987): Vergleichende Untersuchungen über den Einfluß von oral verabreichtem Biotin auf das Hufhorn beim Pferd. Diss., Vet. Med. Fak., Univ. Zürich.
- Lungwitz, M. (1917): *Der Lehrmeister im Hufbeschlag*. 15. Aufl., Schaper, Hannover.
- Lungwitz, A. und Schaaf, H. (1882): Beitrag zum Hufmechanismus. *Dtsch. Z. Tiermed.* 8, 39–59.
- Mair, F. J. (1974): Dehnungsmessungen an der Hornwand in Tragrandnähe und an der Hornsohle beim Pferd-Hinterhuf. *Wien. Tierärztl. Mschr.* 61, 70–71.
- Naumann, J., Dietz, O. und Prietz, G. (1987): Untersuchungen zur anorganischen Zusammensetzung und zur Stabilität von Huf- und Klauenhorn. *Wien. Tierärztl. Mschr.* 74, 117–121.
- Pellmann, R. (1995): Struktur und Funktion des Hufbeinträgers beim Pferd. Diss., Fachber. Vet. med., Freie Univ. Berlin.
- Peters, F. (1883): Die Formveränderungen des Pferdehufes. P. Parey, Berlin.
- Pollit, C. C. (1993): *Video: Equine foot studies*. Television unit, Prentice Centre. The University of Queensland.
- Ruthe, H. (1988): *Der Huf*. 4. Aufl., G. Fischer, Stuttgart.
- Stashak, T. S. (1987): *Adams' Lameness in Horses*. 4th ed. Lea & Febiger, Philadelphia.
- Steglich, C. B. M. (1883): Über den Mechanismus des Pferdehufes. Diss., Univ., phil. Fak., Leipzig.
- Thomason, J. J., Biewener, A. A. and Bertram, J. E. A. (1992): Surface strain on the equine hoof wall in vivo: implications for the material design and functional morphology of the wall. *J. Exp. Biol.*, 166, 145–168.

Dr. Christine Hinterhofer

Prof. Dr. Christian Stanek

Universitätsklinik für Orthopädie bei Huf- und Klauentieren

Veterinärmedizinische Universität Wien

Josef Baumann-Gasse 1,

A 1210 Wien

Tel. 0043 1 250 77 / 5500

Fax 0043 1 250 77 / 5590

e-mail: HINTERHOFER@VU-WIEN.AC.AT

Ing. Heinz Haider

Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik,

A 1030 Wien Arsenal