

Aus dem Department für Pferdechirurgie
der Veterinärmedizinischen Universität Wien

Institut/Klinik für Pferdechirurgie
(Leiterin: Jenner, Florian, Dipl. ACVS Univ.-Prof. Dr. med. vet. Dipl. ECVS)

Orthopädische Spezialbeschläge aus einem 3D-Drucker

Diplomarbeit

Veterinärmedizinische Universität Wien

vorgelegt von

Eva Wölke

Wien, im Dezember 2020

Betreuerin:

Licka, Theresia, Ao. Univ.-Prof. Dipl. ACVSMR Dipl. ECVSMR Dr. med. vet.

Gutachter:

Kofler, Johann, Ao. Univ.-Prof. Dipl. ECBHM Dr. med. vet.

Diese Arbeit widme ich meiner Familie

insbesondere meinen Großeltern

Christel, Karola, Klaus und Walter

und meinen Eltern

Arno und Maria.

Sie haben mich immer unterstützt und mir das Studium ermöglicht.

Inhalt

1 Einleitung.....	1
1.1 Literaturübersicht.....	5
1.1.1 Anatomie des Hufes	5
1.1.1.1 Hornkapsel, Knochen, Gelenke und Sehnen	5
1.1.1.2 Die Struktur der Hufhaut.....	6
1.1.1.3 Die Blutgefäßversorgung.....	10
1.1.1.4 Die Nervenversorgung.....	12
1.1.1.5 Schmerzempfinden im Huf.....	13
1.1.1.6 Der Hufbeinträger	13
1.1.1.7 Der Hufmechanismus	14
1.1.1.8 Die weiße Linie	14
1.1.2 Radiologie des Hufes	15
1.1.3 Der gesunde Huf.....	16
1.1.4 Hufformen	17
1.1.5 Notwendigkeit und Einsatzbereich des Hufbeschlags	18
1.1.6 Aufbau eines Hufbeschlags	19
1.1.7 Material für Beschläge	20
1.1.7.1 Stahl.....	20
1.1.7.2 Aluminium	21
1.1.7.3 Kunststoffe	21
1.1.8 Therapeutische Beschläge.....	22
1.1.8.1 NBS Beschlag	23
1.1.8.2 Beschläge bei Sehnenschäden	24
1.1.8.3 Podotrochlosebeschlag	24
1.1.8.4 Hufrehebeschlag	25
1.1.8.5 Beschlag bei lateromedialer Imbalance	25
1.1.8.6 Spatbeschläge	26
1.1.9 Korrekturbeschläge beim Fohlen	26
1.1.9.1 Streckfehlstellungen/Hyperextension.....	27
1.1.9.2 Beugefehlstellungen.....	27
1.1.9.3 Mediolaterale Winkel-Fehlstellungen.....	28

1.1.9.4 Erworbene Fehlstellungen	28
2 Material und Methoden	30
2.1 Material	30
2.2 Programm	31
2.3 Studienaufbau	34
2.3.1 Teil A: Testbeschlge	35
2.3.2 Teil B: Patienten	36
2.3.3 Statistik	36
3 Ergebnisse	37
3.1 Teil A: Testbeschlge	37
3.1.1 Nach Vorlage eines Pantoffeleisens	37
3.1.2 Nach Vorlage eines Herzeisens	40
3.1.3 Nach Vorlage eines Hinterhufeisens	44
3.2 Teil B: Patienten	47
Pferd 1	47
Pferd 2	48
Pferd 3	49
Pferd 4	50
Pferd 5	50
Pferd 6	52
3.3 Auswertung	53
4 Diskussion	58
5 Zusammenfassung	65
6 Summary	66
7 Abkürzungsverzeichnis	67
8 Literaturverzeichnis	68
9 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	74

1 Einleitung

Seit Menschen die Pferde domestiziert haben und begonnen haben, sie als Lasten-, Transport- und Reittiere zu verwenden, spielte die Hufgesundheit und deren Schutz bzw. Wiederherstellung eine wichtige Rolle. Erste Hufschutzvorrichtungen sollen in Ägypten im 2. Jahrhundert v. Chr. aus pflanzlichen Bestandteilen an die Hufe gebunden worden sein, die als „*Solea sparteae*“ bezeichnet wurden (Lingens et al. 2011). Aufgrund der mangelhaften Festigkeit und der daraus resultierenden geringen Haltbarkeit und des geringen Schutzes wurden vermutlich die aus Pflanzenteilen geflochtenen Schuhe durch Metallplatten ergänzt, woraus wiederum die Römer wahrscheinlich die Hipposandalen („*Solea ferreae*“) entwickelten (Lungwitz 1913, Carnat 1953, beide zitiert nach Lingens et al. 2011). Wann der genagelte Hufbeschlag erfunden wurde ist unklar, es gibt dazu sehr unterschiedliche Angaben. Laut Imhof (2010) gab es das erste genagelte Hufeisen (das orientalische Hufeisen) 500 n. Chr. Andere sind hingegen der Meinung, dass es genagelte Hufeisen schon vor dem gallischen Krieg (ca. 50 v. Chr.) gegeben haben muss, jedoch gibt es keine Beweise (Dominik 1887, Lungwitz 1913, beide zitiert nach Lingens et al. 2011). Gegen diese Theorie spricht, dass man mehr genagelte Hufeisen bei Ausgrabungen hätte finden müssen und in Schriftstücken Informationen dazu vorhanden sein müssten, wenn es vor der Römerzeit schon genagelte Hufeisen gegeben hätte (Beckmann 1792, zitiert nach Lingens et al. 2011). In der Weiterentwicklung des Hufbeschlags verbreitete sich der genagelte Hufbeschlag im Mittelalter in Europa (Lingens et al. 2011). Je nach Herkunftsland hatten die Hufbeschläge unterschiedliche Eigenschaften. Aus dem Süden kamen dünne, plattenartige Hufeisen mit gestauchtem Rand und aus dem asiatischen Raum Hufeisen mit Stollen, wohingegen der Griff als Gleitschutz wohl eher aus Skandinavien kam (Zippelius 1891, zitiert nach Lingens et al. 2011). Im Verlauf des Mittelalters veränderte sich das Hufbeschlagswesen stetig und die unterschiedlichen Eigenschaften wurden kombiniert, woraus das „Alte Deutsche Hufeisen“ (Lingens et al. 2011) entstand, das eine breite Zehe, schmale Schenkel, Stollen und einen Griff hatte. Erst im 18. und 19. Jahrhundert wurden unterschiedliche Hufeisen für unterschiedliche Zwecke entwickelt, was auf erweiterte Kenntnisse der Anatomie und Physiologie durch Gründung von Tierarzneischulen im 18. Jahrhundert und Hufbeschlagschulen im 19. Jahrhundert zurückzuführen ist (Lingens et al.

2011). Seit Anfang des 20. Jahrhunderts gibt es Fabrikhufeisen statt handgeschmiedeter Hufeisen, die verändert, bearbeitet und modifiziert werden können. Durch die Fabrikhufeisen wird die Hufeisenverwendung deutlich vereinfacht (Scherer et al. 2012). Die Hufeisen können durch unterschiedliche Verfahren an die individuellen Bedürfnisse des jeweiligen Pferdes angepasst werden. Seit Ende des 20. Jahrhunderts werden immer mehr alternative Arten des Hufschutzes entwickelt, die immer größere Beliebtheit erreichen, insbesondere bei Freizeitreitern, aber auch im Sport. Es sind Kunststoffbeschläge, Verbundbeschläge aus Kunststoff und Aluminium und Aluminiumbeschläge zu den herkömmlichen Stahlbeschlägen hinzugekommen (Scherer et al. 2012). Zur Anbringung der Hufbeschläge an den Huf wird auch häufig geklebt statt genagelt, insbesondere bei Fohlenschuhen, Rehebeschlägen oder Hufen mit größeren Hornsubstanzverlusten. Zum Kleben gibt es Carbonklebelaschen oder unterschiedliche Klebstoffe (Bronkhorst et al. 2012). Auch ein temporärer, abnehmbarer Hufschutz wird immer beliebter. Bronkhorst et al. (2012) beschreiben Hufschuhe aus Kunststoff, die dann dem Pferd angezogen werden können, wenn es einen Hufschutz braucht, und wieder ausgezogen werden können, wenn es keinen braucht. Das bringt Vorteile in der Herdenhaltung und in Bezug auf die Hornqualität (Geyer 2008a).

Heutzutage spielt ein korrekter Hufbeschlag in der orthopädischen Pferdemedizin eine sehr wichtige Rolle (Eliashar 2007, Berndt 2016). Daher werden laufend neue Möglichkeiten gesucht und erfunden, um die orthopädischen Beschläge zu verbessern. Da in der Medizin und auch in der Veterinärmedizin der 3D-Druck immer mehr Möglichkeiten bietet, wie Modelle zum Lernen und Üben von Operationen (OP-Simulation), um OP-Zeiten und Komplikationsraten zu verringern, sowie Prothesen oder (mit biokompatiblen Materialien) Implantate herzustellen (Hespel et al. 2014), liegt eine Anwendung im Bereich des Hufbeschlags nahe. In einem Artikel in dem Online- Magazin „3D-grenzenlos“ wird beschrieben, dass Wissenschaftler aus Australien 2013 den ersten 3D-gedruckten Titanbeschlag für Rennpferde auf den Markt gebracht haben (Thum 2013).

Die Vorteile von Kunststoffbeschlägen gegenüber Aluminium und Stahl sind unter anderem eine verminderte Verletzungsgefahr durch Tritte (Sprick et al. 2017, Joss et al. 2019), was vor allem im Freizeitbereich wichtig ist, wo immer mehr Pferde im Herdenverband in Offenställen gehalten werden. In der Schweiz beispielsweise ist der Anteil der in Gruppen gehaltenen Pferde

von 16,5 % im Jahr 1997 (Bachmann und Stauffacher 2002) auf 29,9 % im Jahr 2003 gestiegen (Knubben et al. 2008). Das ist auch auf Deutschland und Österreich übertragbar. Ein weiterer Vorteil der Kunststoffbeschläge ist die stoßdämpfende Eigenschaft, die sich positiv auf vorhandene Lahmheiten auswirkt (Sleutjens et al. 2018, Back et al. 2006), sowie Arthrosen vorbeugen kann (Back et al. 2006).

Der Einsatzbereich für 3D-Drucker ist vielfältig und weitreichend, da viele unterschiedliche Drucker und Druckmaterialien verwendet werden. Die Möglichkeiten des 3D-Druckes sind ausschließlich von den Fähigkeiten des Computerprogrammes und des 3D-Druckers limitiert. Das Computerprogramm kann jedoch jederzeit verbessert und erweitert werden. Der Drucker begrenzt die Möglichkeiten des 3D-Drucks durch die maximal mögliche Größe der Druckobjekte, sowie die vorhandenen Druckköpfe und Verarbeitungsmöglichkeiten für diverse Materialien (Hespel et al. 2014).

Veröffentlichungen zu dem Thema 3D-gedruckte Hufbeschläge oder orthopädische Spezialbeschläge gibt es bisher kaum. Der 3D-Druck könnte im Bereich der Hufbeschläge einige Vorteile mit sich bringen. Beispielsweise bei Pferden mit schmerzhaften Gliedmaßenerkrankungen müssten die Hufe nicht häufiger aufgehoben werden, um den Beschlag anzupassen, sondern nur einmal zum Fotografieren und Messen und dann erst wieder zum Aufnageln bzw. Kleben. Das würde solchen Patienten das Beschlagen deutlich erleichtern und eventuell einen Verzicht auf Sedierungen oder Leitungsanästhesien ermöglichen. Ein weiterer Vorteil könnte die sehr leichte Reproduzierbarkeit sein. Benötigt man erst wenige Wochen nach dem ersten Beschlag erneut den gleichen Beschlag, dann müsste er nur neu ausgedruckt werden und könnte ohne viel Aufwand angebracht werden. Ein weiterer Vorteil des 3D-Druckes im Bereich der Hufbeschläge könnte sein, dass man die Vorteile der Kunststoffbeschläge mit einer deutlich besseren Anpassbarkeit im Vergleich zu den „fertigen“ Kunststoffbeschlägen, die kaum veränderbar und daher nur wenig individuell gestaltbar und anpassbar sind, kombinieren würde.

Daher soll in dieser Arbeit untersucht werden, ob es möglich ist, anhand eines Fotos und der Maße der Hufe mit einer für diesen Zweck spezifisch entwickelten, kommerziell erhältlichen, Beschlagssoftware zum 3D Druck von Hufbeschlägen und dem dazugehörigen 3D Drucker individuell angepasste Kunststoffbeschläge zu konstruieren und auszudrucken. Dabei soll die

Genauigkeit der Konstruktion überprüft werden, um Daten zur Präzision der gedruckten Hufbeschläge zu erheben, um die Anwendbarkeit zu untersuchen. Weitergehend sollen die Umsetzbarkeit von orthopädischen Spezialbeschlägen getestet und alle spezifischen Charakteristika qualitativ verglichen werden. Die Anbringung der gedruckten Beschläge, sowie die Reaktion der Pferde bezüglich des Gangbildes, insbesondere bei Hufrehepatienten, wird ebenfalls beurteilt und beobachtet. Die Haltbarkeit und weitere Langzeitbeobachtungen werden in dieser Arbeit nicht mit einbezogen.

1.1 Literaturübersicht

1.1.1 Anatomie des Hufes

1.1.1.1 Hornkapsel, Knochen, Gelenke und Sehnen

Bei der Geburt des Fohlens ist der Huf mit einer hinfalligen Hornschicht, dem Eponychium, bedeckt, die aus derbelastischer unvollständig verhornter Epidermis besteht und wie ein Kissen den Huf umschließt, um bei der Geburt den Geburtskanal zu schützen. Im Verlauf des ersten Lebenstages trocknet die Epidermis aus und wird nach und nach abgelaufen bis die permanente Hufkapsel freiliegt (Budras et al. 2005). Die Hufkapsel umschließt die inneren Hufstrukturen. Knöcherne Hufstrukturen sind das Hufbein, das Strahlbein und der untere Teil des Kronbeins, die das Hufgelenk bilden (Budras 2012a). Das Hufgelenk ist ein mehrfach zusammengesetztes Sattelgelenk, das Beugung, Streckung und Seitwärtsbewegungen und leichte Drehbewegungen zulässt, um Bodenunebenheiten auszugleichen. Es ist von der Hufkapsel umschlossen und von Seitenbändern, Strahlbeinbändern und Hufknorpelbändern umgeben (Liebich et al. 2005). Dorsal setzt die gemeinsame Strecksehne am *Processus extensorius* des Hufbeins an. Palmar/Plantar zieht die tiefe Beugesehne über das Strahlbein, geschützt durch den Schleimbeutel, die *Bursa podotrochlearis*, und setzt am hinteren Abschnitt der *Facies solearis* des Hufbeins an. Diese drei Strukturen bilden die sogenannte *Podotrochlea*, die Hufrolle (Budras und König 2005). Das Hufbein endet palmar/plantar beidseits in je einem Hufbeinast. An den Hufbeinästen setzen die Hufknorpel an und reichen nach proximal. Die Hufknorpel bestehen aus Faserknorpel und sind große, flache und elastische Knorpelplatten (Salomon 2008). Zwischen den Hufknorpeln befindet sich das Ballen- und Strahlpolster und das innere Venengeflecht. Das ist wichtig für den Hufmechanismus, der bei Kompression den Rückfluss des Blutes fördert und beim Fußen stoßdämpfend wirkt. Der Hufmechanismus ist wichtig für die Versorgung des Hufes und für die Stoßdämpfung und sollte auch beim Hufbeschlag immer berücksichtigt werden. Lymphgefäße, Arterien und Nerven befinden sich ebenso im Huf (Brunsting et al. 2019, Yoshihara et al. 2010). Die Versorgung des Hufes erfolgt durch diese Strukturen, die hauptsächlich in der Leder- und Unterhaut verlaufen.

Die Hufkapsel besteht aus Horngewebe. Sie ist unterteilbar in Hufwand und Basisteile, wie Fußungsfläche und Sohlenflächenanteile. Die Hufwand geht einschließlich vom Kronrand bzw. Saumband bis zum Tragrand. Unterteilt wird sie in Zehe, Seitenwand und Trachten (Budras und König 2008). Am Eckstrebenwinkel gehen die Trachten in die Eckstreben über, welche sich nach innen umschlagen und auf halber Länge des Strahls enden. Der Tragrand ist der wesentliche tragende Teil für die Körperlast (Budras und König 2008). Die Sohlenfläche besteht aus Sohlenhorn mit Sohlenkörper, der sich als Sohlenäste, außen entlang des Strahls durch Strahlfurchen getrennt, fortsetzt. Das Strahlhorn endet in Richtung der Zehe mit den beiden Strahlschenkeln an der Strahlspitze und geht palmar/plantar an der Basis ins Ballenhorn über, welches die Hufkapsel palmar/plantar abschließt (Budras 2012b).

1.1.1.2 Die Struktur der Hufhaut

Die Epidermis besteht aus einem lebenden, stoffwechselaktiven, tieferliegenden Teil (*Stratum basale, spinosum und granulosum*) und einem toten, verhornten oberflächlichen Teil (*Stratum corneum*) (Budras et al. 2005). Das Epithel besteht aus kubischen Oberhautzellen, die von wenig Zwischenzellsubstanz ummantelt und verbunden werden. Von diesen lebenden und teilungsfähigen Oberhautzellen differenzieren sich die nachgeschobenen Tochterzellen zu toten Hornzellverbänden durch programmierten Zelltod. So wird die Hufkapsel gebildet. Die Epidermis wird durch die Basalmembran von der Lederhaut getrennt. Versorgt wird die Epidermis durch die Lederhaut mit ihren Blutgefäßen durch Diffusion (Budras 2012c).

Die Basalmembran besteht aus Kohlenhydrat- und Eiweißverbindungen. Sie ist eine semipermeable Membran und fungiert als Schutzmembran für die Oberhaut, da sie nicht alle Nährstoffe, Abbauprodukte, Boten- und Wirkstoffe zwischen den Geweben passieren lässt. Außerdem sorgt sie für den mechanischen Zusammenhalt zwischen Lederhaut und Oberhaut (Budras 2012c).

Die Lederhaut ist unterteilt in *Stratum papillare* und *Stratum reticulare*. Erstere ist eine zellreichere und oberflächlichere Schicht und die zweite eine tiefere, faserreichere Schicht (Budras et al. 2005). Die Lederhautoberfläche ist in allen Segmenten zu Zöttchen (*Papillae dermales*) geformt, außer im Wandsegment, da ist die Lederhautoberfläche zu

Lederhautblättchen (*Lamellae dermales*) geformt (Budras et al. 2005). Lymph- und Blutgefäße der Lederhaut versorgen über Diffusion die Oberhaut. Auch die nervale Versorgung der Oberhaut wird durch die Lederhaut ermöglicht, indem feinste Verzweigungen der Nervenäste an einigen Stellen in die unteren Schichten der Oberhaut eintreten (Budras 2012c, Geyer 2008b).

Die Unterhaut ist nur an Stellen vorhanden, an denen eine Polsterung benötigt wird. Dort wo eine feste Verbindung zwischen Hufbein und Hufkapsel bestehen muss, schließt das Periost direkt an das *Stratum reticulare* der Lederhaut an (Geyer 2008b, Budras et al. 2005). Die Unterhaut besteht aus straffem Bindegewebe und erfüllt eine abfedernde und stoßdämpfende Funktion. Im Huf ist sie in erster Linie als Hufkissen zwischen den Hufknorpeln vorhanden. Sie verhindert Faltenbildungen und Verschiebungen der Gewebe gegeneinander. Das steht im Gegensatz zur normalen Unterhaut, die aus lockerem Bindegewebe besteht und Verschiebbarkeit gewährleisten soll (Budras 2012c).

Es gibt den weichen und den harten Verhornungstyp. Beim harten Verhornungstyp fehlt im Verhornungsbereich das *Stratum granulosum*, die Körnerschicht. Dort entstehendes Horn weist vom Wassergehalt abhängig unterschiedliche Härtegrade auf. Die Hornhärte wird in Shore-Einheiten auf einer Skala von 0 bis 100 gemessen, die ursprünglich zur Bestimmung von Holzhärte benutzt wurde und auch für die Bestimmung der Härte von Hufbeschlägen herangezogen wird (Budras 2012c).

Bei der Hornbildung teilen sich die Zellen an der Basis der Oberhaut durch Zellteilung, eine Tochterzelle verbleibt dort, die andere reift in Richtung Oberfläche heran und stirbt durch programmierten Zelltod ab und wird durch die nachfolgende Zellgeneration weiter nach distal geschoben (Budras et al. 2005). In der Hornzelle sind Hornzellbälkchen netzartig oder parallel angeordnet, je nach Belastung. Hornzellbälkchen bestehen aus Keratinfilamenten und Keratinfilament-assoziierten Proteinen, die über Disulfidbrücken verbunden werden. Die verhornende Zelle schleust Zwischenzellkitt in den Zwischenzellspalt aus. So entstehen die Hornzellverbände, auch Hornmassen genannt (Budras 2012c).

Die fünf Hufsegmente und ihre unterschiedlichen Hornprodukte lassen sich einteilen in das Saumsegment (*Limbus*), das Kronsegment (*Corona*), das Wandsegment (*Paries*), das

Sohlensegment (*Solea*) und das Ballen-Strahl-Segment (*Torus ungulae, Cuneus*) (Budras und König 2008).

Das Saumsegment ist ein wenige Millimeter breites, halbkreisförmiges Band unterhalb des Haaransatzes des Hufs und geht nach hinten in das Ballensegment über. Das Saumröhrchenhorn wird von der Saumoberhaut gebildet. Es ist ein weiches Horn, dem mikroskopisch das *Stratum granulosum* fehlt. Das Saumhorn bildet die äußere dünne Schicht der Hufwand und besteht oben am Haaransatz aus einer Saumhornwulst, darunter ist es eine hellgraue „dachziegelartige“ Glasurschicht, die durch Laufen abgerieben wird. Das Saumsegment dient als Übergang von der Haut zum Hufhorn und als Feuchtigkeitsreservoir sowie als Versiegelung um die Feuchtigkeit im Huf zu halten (Budras und König 2005). Die Saumlederhaut trägt sehr dünne und kurze, ca. 1 mm, Lederhautzöttchen. Die Unterhaut bildet ein Saumpolster, das ins Kronpolster übergeht (Budras und König 2008, Budras 2012d).

Das Kronsegment schließt sich nach unten als ca. 12 mm breites halbkreisförmiges Kronband an das Saumsegment an. Als Eckstrebenteil reicht das Kronsegment bis zur seitlichen Strahlfurche. Kronhorn ist besonders fest und bildet den größten Teil der Wand des Hornschuhs. Es stellt die Schutzschicht dar und setzt sich in der Eckstrebe fort (Budras und König 2008). Es besteht aus 3 Röhrchenhornschichten. Die äußere Kronhornschicht besteht aus ca. 14 kleinen Röhrchen pro mm² mit ovaler Querschnittsform. Diese nimmt Druckkräfte aus horizontaler Richtung auf und ist flüssigkeitsarm und hart, da die Röhrchenrindenzellen kompakt und hart sind. Die mittlere Kronhornschicht ist die Übergangsschicht zur inneren Kronhornschicht, welche aus ca. 7 großen Hornröhrchen pro mm² mit rundem Querschnitt besteht. Sie ist flüssigkeitsreich und weich elastisch, da die Röhrchenrinde wassergefüllte Hohlräume hat. Sie federt elastisch schräghorizontale Zugkräfte des Hufbeinträgers (Budras 2012d). Bei einer krankhaften Veränderung können sich die 3 Schichten voneinander lösen und eine hohle Wand bilden (Budras et al. 2005). Die Grenzfläche zwischen den Materialien stellt eine Barriere zur Begrenzung eines Hornspaltes auf eine Schicht dar. Die Kronlederhaut hat mit einer Länge von 3mm relativ große Zöttchen und die Kronunterhaut bildet das Kronpolster (Budras 2012d).

Das Wandsegment hat keine Subcutis und besteht je nach Hufgröße aus den ca. 8 cm langen und etwa 3 mm hohen papierdünnen Hornblättchen, die nur in diesem Segment vorkommen.

Die Hornblättchen sind mit den formgleichen Lederhautblättchen verzahnt und sind in der weißen Linie als Streifung sichtbar. Diese Verbindung stellt den Hauptteil des Hufbeinträgers dar und weist eine hohe Zugfestigkeit auf, da sie über zahlreiche Abzweigungen durch Sekundärblättchen verzahnt ist (Budras 2012d). Die Hornzellen sind bis zu 0,1 mm lang und sind schwammig, sie verleihen den Hornblättchen Elastizität. Lederhautblättchen sind ebenso 3 mm hoch (Budras et al. 2005) und 6 cm lang, damit sie kurz unterhalb des Hufbeinsohlenrandes enden, da sie als schmerzempfindliche und blutversorgte Blättchen nicht zu nahe zur Sohle kommen dürfen (Budras 2012d). An dem Hufbeinsohlenrand geht jedes Blättchen in ca. 15 Zöttchen über, deren Oberhautüberzug die weiße Linie bildet. Die Hufplatte wird von Saumhorn, Kronhorn und Blättchenhorn gebildet. Die Tragfläche des Hufes besteht aus Sohlenhorn, Kronhorn und der weißen Linie (Geyer 2008c).

Das Sohlensegment gehört zur Basisfläche und wird vom Tragrand und der weißen Linie eingerahmt, es reicht hinten bis in den Eckstrebenwinkel und hat keine Subcutis (Geyer 2008c). Sohlenhorn ist ca. 1 cm dick, variiert jedoch je nach Individuum. Durch harte Verhornung wird das Röhrchenhorn der Sohle gebildet, die aus einer mittelharten, kompakten, tiefen Hornschicht und dem oberflächlichen Zerfallshorn besteht (Budras und König 2005). Das Zerfallshorn bröckelt schichtweise aus, sollte bei der Hufpflege jedoch nicht übermäßig entfernt werden. Die Sohle hat nur eine untergeordnete Tragefunktion, ihre primäre Funktion ist der Schutz der innenliegenden Strukturen vor äußeren Einflüssen. Die Lederhaut ist in diesem Segment reich an Wasser und viskös elastisch und an ihrer Unterseite befinden sich ca. 3 mm lange Zöttchen (Budras 2012d).

Den hinteren Abschluss des Hufes bildet das Ballen-Strahl-Segment. Es besteht aus dem schräg ansteigenden Ballenanteil mit Ballenhorn und nach vorne geht es in den Strahl über, der zwischen den beiden Sohlenschenkeln liegt. Am Ballen und in den Strahlfurchen findet weiche Verhornung statt, im restlichen Bereich harte Verhornung. Eingelagertes Fett in Form von Tropfen zwischen den Zellen sorgen für Elastizität. Die Hornröhrchen sind teilweise gebogen und spiralig angeordnet, um auf diese Weise Druck aufzunehmen und abzufedern (Budras 2012d). Die Verformbarkeit des Strahls ist von besonderer Bedeutung für den Hufmechanismus (Hinterhofer et al. 2000). Die Lederhaut hat bogenförmige oder spiralförmige Zotten, daher sind die Hornröhrchen ebenso geformt. Das Hufkissen, geteilt in Ballen- und Strahlpolster,

besteht aus straffem, geflechtartigem Bindegewebe mit Fett- und Knorpel­einlagerungen und wasserbindenden Gewebekomponenten (Budras 2012d). Die Polster sind im Bereich der paarigen Ballenwülste besonders voluminös und im Ballenpolster befinden sich die Ballendrüsen, welche die Geschmeidigkeit der Polster für den Hufmechanismus aufrechterhalten (Budras und König 2005).

Die Hornbildungsrate von Röhrchenhorn ist hoch, was als Fertilbett bezeichnet wird. Die Hornbildungsrate von Blättchenhorn, das ausschließlich im Wandsegment vorkommt und als Sterilbett bezeichnet wird, ist deutlich niedriger. Dort werden Hornzellen proximal an der Grenze zum Kronsegment und distal wenige Millimeter unterhalb des Hufbeinsohlenrandes gebildet. Dazwischen werden keine Hornzellen gebildet, was funktionell mit dem Hufbeinträger und dessen Gleithaft zusammenhängt (Budras 2012d).

Differenziert von der Hornbildungsrate muss das Hornbildungspotenzial betrachtet werden, das im gesamten blättchentragenden Wandsegment sehr hoch ist, und beispielsweise bei einer Laminitis viel Blättchenhorn bildet, und so die weiße Linie verbreitert (Budras 2012d).

Wassergehalt und Hornhärte bilden eine negative Wechselbeziehung: Je niedriger der Wassergehalt umso höher der Härtegrad, je höher der Wassergehalt umso niedriger der Härtegrad. Die Art der Wasserspeicherung hängt von den unterschiedlichen Segmenten ab und wird entweder in Tropfenform im Zwischenzellspalt oder in schwammartigen Hornzellen oder durch Wasserbindung an den Strukturproteinen bewerkstelligt (Budras 2012d).

1.1.1.3 Die Blutgefäßversorgung

Die Blutversorgung der Hufe findet über die Hauptmittelfußarterien statt. An der Vordergliedmaße versorgt die *A. digitalis palmaris communis II* den Huf mit sauerstoff- und nährstoffreichem Blut, an der Hintergliedmaße geschieht dies durch die *A. metatarsa dorsalis III* (Hirschberg und Budras 2012). Die Hauptmittelfußarterien zweigen sich dann in die *Aa. palmares/plantares lateralis und medialis* auf, die innerhalb des Hufbeins in dem Sohlenkanal liegen und dort einen inneren Endbogen bilden (Geyer 2008a). Bevor sie in das Hufbein ziehen, geben sie *Rami tori digitalis* zum Ballen und je eine *A. coronalis lateralis und medialis* zur Krone ab (Budras und König 2005). Vor dem Eintritt ins Hufbein geht außerdem noch ein

Ramus dorsalis phalangis distalis zur Versorgung der Hufwand ab, der in den *Sulcus parietalis* zieht (Geyer 2008a). Saum und Ballen-Strahl-Segment werden von stark verzweigten und miteinander verbundenen Ästen versorgt. Das Wand- und das Sohlensegment werden hauptsächlich von radiären zur Hufbeinspitze gerichteten Ästen aus dem arteriellen Endbogen innerhalb des Hufbeins versorgt (Geyer 2008a). Diese Gefäße speisen die *Aa. marginis solearis* und anastomosieren mit den Ballengefäßen (Budras und König 2005).

Die Unterhaut und die Lederhaut führen die Leitungsstrukturen des Hufes zu und verteilen sie gleichmäßig. Im Saum-, Kron- und Ballen-Strahl-Segment bilden die Arterien in der Unterhaut ein Netzwerk und geben die Gefäße der Lederhaut ab. Beim Wand- und Sohlensegment gibt es keine Unterhaut, dort erfüllen die radiär hufspitzenwärts verlaufenden Äste aus dem Zehenendbogen die Verteilerfunktion. In der Lederhaut verzweigen sich die Arteriolen zu Kapillaren, die dann in Venolen übergehen und dann in die Zehenvenen (Hirschberg und Budras 2012).

Die Oberhaut und die gefäßführende obere Schicht der Lederhaut bilden den bindegewebigen Papillarkörper des Hufs. Der Papillarkörper enthält 2 Formentypen: Zöttchen und Blättchen. Bei den Zöttchen liegen Zöttchenarterie und –vene zentral und sind an der Spitze des Zöttchens durch eine Spitzenschleife direkt miteinander verbunden. Aus der Zöttchenarterie geht ein Kapillarnetz hervor, das durch Diffusion die Oberhaut mit dem hornbildenden Teil versorgt und venöses Blut über die Zöttchenvene wieder ableitet. Bei den Blättchen gehen die Gefäße aus dem Lederhautgeflecht des Wandsegments hervor, welche vom Kronrand zum Hufbeinrand dicht an der Oberfläche des Hufbeins entlang verlaufen und in regelmäßigen Abständen über Querverbindungen verbunden sind. Sie versorgen die eigentlichen Lederhautblättchen, die ein dichtes Gefäßmuster aus gestreckt verlaufenden, arkadenartig angeordneten kleinsten Arterien enthalten. Die Arterien verzweigen sich in den sekundären Lederhautblättchen zu Kapillaren, welche über Diffusion die Oberhaut versorgen und anschließend transportieren die Venen der Blättchen das Blut wieder ab (Hirschberg und Budras 2012).

Die venöse Versorgung besteht aus zwei stark verzweigten Venengeflechten, die abaxial und axial des Hufknorpels besonders stark ausgeprägt sind. Das Blut daraus wird über die Zehenvenen, die parallel zu den Arterien verlaufen, abtransportiert. Um den venösen Abfluss aus dem Huf zu unterstützen, gibt es mehrere Mechanismen. Zum einen liegen Arterien und

Venen so nahe beieinander, dass die Pulswellen auch auf die Venen übertragen werden, zum anderen verhindern in der Lederhaut Venenklappen einen Blutrückfluss. Zusätzlich fördert der Hufmechanismus den Abfluss im Prinzip einer Druck-Saug-Pumpe (Hirschberg und Budras 2012).

Im arteriellen Blutgefäßsystem im Huf gibt es zwei Möglichkeiten zur Regulierung der Lederhautdurchblutung unter dem Einfluss des autonomen sympathischen Nervensystems. Zum einen gibt es Polsterarterien, die durch Kontraktion der Gefäßmuskulatur ein Polster hervortreten lassen können und dadurch ein Gefäß verschließen oder an Gefäßabzweigungen die Flussrichtung bestimmen können. Zum anderen gibt es arteriovenöse Kurzschlüsse, auch Shunts genannt, die an der Basis der Lederhautblättchen vorkommen. Die arteriovenösen Kurzschlüsse sind sehr reaktiv und können innerhalb von kurzer Zeit neu gebildet oder getrennt werden, abhängig von den Zirkulationsbedingungen wie Umgebungstemperatur oder venöse Blutfülle (Hirschberg und Budras 2012).

1.1.1.4 Die Nervenversorgung

Die Gliedmaßen werden motorisch-sensibel innerviert. Diese Nervenversorgung sorgt für die Muskelkontraktionen in der Fortbewegung und für den Fluchtreflex bei klar abgrenzbaren Schmerzen. Vom autonomen Nervensystem werden die Gliedmaßen nur sympathisch und nicht parasympathisch innerviert. Über diese Art der Nervenversorgung werden dumpfe und schwer abgrenzbare Schmerzen langsam geleitet und so Schonhaltungen ausgelöst, wie ein Nichtbelasten eines Hufes (Budras 2012e). An der Vordergliedmaße entspringt der Zehennerv (*N. digitalis palmaris medialis und lateralis*) aus dem *N. medianus* (Budras und König 2005), der laterale Zehennerv erhält Anteile vom *N. ulnaris* (Budras 2012e). An der Hintergliedmaße wird der Huf plantar durch den *N. digitalis plantaris medialis und lateralis* aus dem *N. tibialis* innerviert und dorsal durch den *N. digitalis dorsalis medialis und lateralis* aus dem *N. fibularis profundus*, wobei nur die proximalen dorsalen Anteile durch den *N. fibularis* versorgt werden. Tiefere Anteile werden durch den *N. digitalis plantaris medialis und lateralis* versorgt (Geyer 2008a).

Die Verzweigungen des *N. digitalis palmaris/plantar* *medialis und lateralis* sind an der Vordergliedmaße und Hintergliedmaße identisch. Der laterale und mediale Ast entlassen jeweils einen Ramus dorsalis auf Höhe des Fesselgelenks, die Saum-, Kron- und blättchenträgendes Wandsegment des Hufes versorgen. Am Krongelenk wird von den Zehennerven der *Ramus tori digitalis* nach hinten zum Ballen abgegeben (Geyer 2008a). An der Seitenfläche des Hufes, innen am Hufknorpel, teilen sich die Zehennerven in 2 Endäste. Die Endäste verlaufen mit den Blutgefäßen. Der äußere Endast zieht zwischen Hufbeinast und Hufknorpel durch das Foramen parietale nach außen zur Wandrinne des Hufbeins. In der Wandrinne zieht er nach vorn und gibt seine Äste nach unten zum Sohlenrand des Hufbeins ab. Der innere Endast gibt Nervenzweige an die Hufrolle und die Hufgelenkscapsel ab und zieht gemeinsam mit den Blutgefäßen durch den Sohlenkanal. Seine Zweige gelangen in Knochenkanälchen zum Hufbeinsohlenrand und versorgen gemeinsam mit dem äußeren Endast die Umgebung (Budras 2012e).

1.1.1.5 Schmerzempfinden im Huf

Im Huf können starke Schmerzen auftreten, da bei erhöhtem Gewebedruck die Hufkapsel eine Ausdehnung verhindert. Wie oben beschrieben ist der Hufbeinsohlenrand besonders dicht mit Nerven versorgt und dadurch kann eine starke Schmerzhaftigkeit empfunden werden. Ebenso an den Bändern des Hufgelenks, des Hufbeins und der Hufknorpel sowie an der Hufrolle und an der Fußungsfläche des Hufes liegt eine hohe Nervendichte und somit auch eine hohe Schmerzempfindlichkeit vor (Budras 2012e). Daher sind diagnostische Anästhesien in dem Bereich insofern aussagekräftig, dass bei einer positiven tiefen palmaren Anästhesie der Schmerz im palmaren Bereich des Hufes lokalisierbar ist und bei gewissen Erkrankungen durch eine Neurektomie Zeit gewonnen werden kann (Geyer 2008a, Budras und König 2005).

1.1.1.6 Der Hufbeinträger

Der Hufbeinträger ist die Verbindung zwischen dem Hufbein und der Hufkapsel und ist nur am Tragrand in der weißen Linie von außen sichtbar. Er besteht aus vielen Trageelementen der Leder- und Oberhaut (Budras und König 2005). Der Lederhautanteil ist mit der Oberfläche des

Hufbeins und den Hufknorpeln verbunden und der Oberhautanteil an der blättchenträgenden Innenfläche der Hufkapsel verankert. Der Hufbeinträger wandelt Druckkräfte in Zugkräfte um und trägt das Hufbein, und somit das gesamte Körpergewicht, in einer Schwebeposition (Budras 2012f). Kommt es zu einem Funktionsverlust des Hufbeinträgers, wie zum Beispiel bei einer Rehe, und das Hufbein senkt sich ab oder rotiert, ist die Druckbelastung auf das Hufbein zu groß und es kommt zu Veränderungen des Hufbeins (Budras und König 2005). Der Hufbeinträger ist eine fast geschlossene Rundumaufhängung, die nur an der Ansatzstelle der tiefen Beugesehne unterbrochen ist. An der Dorsalwand ist die Aufhängung am stärksten und nimmt Richtung Trachten deutlich ab. Die Basalmembran zwischen Ober- und Lederhaut trägt die höchste Belastung im ganzen Körper und ist dafür durch Verdopplung und Schleifenbildung erheblich verstärkt (Budras 2012f).

1.1.1.7 Der Hufmechanismus

Der Hufmechanismus, das ist die bei Belastung erfolgende Erweiterung der Hornkapsel hinter der indifferenten Linie, die Absenkung der Sohle, sowie die Eindellung der Dorsalwand, ist ein wichtiger Mechanismus zur Versorgung des Hufes und zur natürlichen Stoßdämpfung des Bewegungsablaufes (Stashak et al. 2002). Er spielt im Zusammenhang mit Hufbeschlägen eine wichtige Rolle und sollte bestmöglich erhalten bleiben, was durch einen Beschlag, der in der hinteren Hälfte des Schenkels breit genug ist und durch Nageln nur vor dem breitesten Punkt des Hufes, also vor der indifferenten Linie, unterstützt werden sollte (Curtis 2006).

1.1.1.8 Die weiße Linie

Die weiße Linie ist an der Sohlenfläche des Hufes in ihrer Gesamtlänge sichtbar. Mit einem weichelastischen Horn verbindet sie Sohlenhorn und Kronhorn scharnierartig. Sie ist gelblich mit einer radiären Streifung und erstreckt sich von dem lateralen Eckstrebenwinkel zum medialen. Nach außen wird die weiße Linie durch das innere Kronhorn abgegrenzt. Das innere Kronhorn stellt sich als weiße (pigmentfreie) Linie dar, jedoch nicht immer gleich breit. Die Abgrenzbarkeit ist wichtig für die korrekte Platzierung des Hufnagels beim Hufbeschlag. Veränderungen der weißen Linie entstehen durch Erkrankungen des Hufbeinträgers,

beispielsweise eine Verbreiterung der weißen Linie durch eine Hufrehe. Die weiße Linie soll den Hufbeinträger gegen aufsteigende Infektionen schützen (Budras 2012f).

1.1.2 Radiologie des Hufes

Röntgenbilder vom Huf sind für Tierarzt/Tierärztin und Hufschmied/Hufschmiedin eine große Hilfe. Gerade für therapeutische Beschläge liefern sie wichtige Informationen, um das Pferd individuell passend beschlagen zu können. Sie ermöglichen, genauere Ziele zu formulieren und sind hilfreich bei der Beurteilung, ob die Trachte erhöht oder abgeflacht werden muss, oder wie viel die Zehe gekürzt werden kann (Bras und Redden 2018). Das Röntgenbild gibt Informationen über die Position des Hufbeins in der Hornkapsel und daraus resultierend über die Parallelität zwischen Hufbein und dorsaler Hufwand und den Abstand zwischen Hufbein und dorsaler Hufwand. Dieser sollte gemessen im rechten Winkel von der Mitte des Hufbeins $<1,5\text{-}2,0\text{ cm}$ sein. Außerdem gibt das Röntgenbild Auskunft über die Sohlendicke unterhalb der Hufbeinsohlenspitze und den Hufbeinästen und über Abstand und Winkel zwischen Hufbeinrand und Boden. Weiterhin kann die sogenannte Rehestrecke ermittelt werden, das ist der Abstand zwischen Kronrand und dem Processus extensorius des Hufbeins, der Hufbeinkappe. Außerdem kann man für einen vorhandenen oder geplanten Beschlag beurteilen, wie die Positionierung des Beschlages optimalerweise sein sollte. Dies gilt auch für den Abrollpunkt des Beschlags in Relation zur Hufbeinspitze und Hebelkräfte, die auf das Hufgelenk wirken. Damit die Röntgenaufnahmen des Hufes beurteilbar sind, sollten die Hufe immer unbeschlagen, außer zur Kontrolle des Beschlags, gereinigt und nach Möglichkeit frisch korrigiert sein. Mit einer Röntgenstudie des Hufes können natürlich diverse krankhafte Veränderungen des Hufes und Fehlstellungen wie beispielsweise eine mediolaterale Verkipfung des Hufbeins diagnostiziert werden (von Zadow 2012a).

Für einen Beschlag sind die seitliche und die dorsopalmare/dorsoplantare Aufnahme besonders hilfreich. Um die Sohlendicke, die Positionierung des Beschlags und den Winkel zwischen Hufbeinrand und Boden zu bestimmen, sollte der Zentralstrahl etwa $1,5\text{ cm}$ über der Bodenfläche positioniert sein. Um alles darstellen zu können, müssen beide Hufe auf zwei gleichhohen Holzblöcken stehen (von Zadow 2012a).

Mittels einer Phlebografie kann der Status der Venen des Hufes überprüft werden. Dabei wird am stehenden Pferd das Blut im Bereich des Hufs gestaut und ein Kontrastmittel in die Hufvene auf Höhe des Krongelenks injiziert. Im Röntgenbild kann man dann die durchbluteten Gefäßstrukturen darstellen. Ist die venöse Situation gestört, gelangt das Kontrastmittel nicht mehr in alle Gefäße (von Zadow 2012a).

Die Aufnahmetechnik unterscheidet sich je nach Fragestellung. Eine seitliche Aufnahme der Zehe ist beispielsweise besonders wichtig bei Verdacht auf Hufrehe, um eine Hufbeinrotation oder Hufbeinsenkung beurteilen zu können, wofür ein Dorsalwand- und ein Sohlenmarker angebracht werden sollten (Schieder und Kneissl 2013). Außerdem ist die seitliche Aufnahme hilfreich, um Gelenkwinkelungen und daraus berechenbar Gelenkbelastungen zu beurteilen (Moleman et al. 2006). Bei der dorsopalmar/dorsoplantaren Aufnahme der Zehe können unter anderem lateromediale Imbalancen erkannt werden (von Zadow 2012a). Daher sind diese beiden Aufnahmen am wichtigsten für den Hufbeschlagnahme, wobei der Zentralstrahl auf die Sohlenebene des Hufbeins gerichtet sein muss, um Sohlendicke und Position des Hufbeins beurteilen zu können (von Zadow 2011). Die schrägen Aufnahmen werden benötigt, wenn bestimmte laterale oder mediale Strukturen möglichst ohne Überlagerungen dargestellt werden sollen. Gut geeignet für Strahlbeinaufnahmen, um beispielsweise Podotrochlose zu diagnostizieren, ist die Oxspringaufnahme (Hertsch und Höppner 1999). In Bezug auf das Hufbein und den Hornschuh ist die High-Coronary-Aufnahme am besten geeignet (von Zadow 2012a). Die Morganaufnahme ist besonders gut geeignet, um das Strahlbein in der ganzen Breite zu beurteilen (Hertsch und Höppner 1999).

1.1.3 Der gesunde Huf

Der gesunde Huf wird als passend in Größe und Form zum Pferd und alle Wandabschnitte vom Kronrand bis zum Tragrand gestreckt und gerade verlaufend definiert. Des Weiteren soll die Hornwand ohne Zusammenhangstrennung und die Oberfläche leicht glänzend sein. Ringe dürfen auftreten, am besten jedoch gleichmäßig auf allen 4 Hufen und mit dem Kronrand parallel verlaufend. Verlaufen sie nicht parallel, sondern zu den Trachten divergierend, weisen sie auf eine Huferkrankung hin, beispielsweise Hufrehe. Der Kronrand sollte an beiden Seiten

in einem gleichmäßigen Bogen von vorne oben nach hinten unten abfallen. Der Tragrand von der Sohlenfläche her beurteilt sollte einen gleichmäßigen Bogen darstellen und stützfähig sein. Die Hornsohle ist je nach Hufform mehr oder weniger gewölbt. Der Strahl sollte kräftig entwickelt und von elastischer Konsistenz sein und keine Risse oder lose Hornteile aufweisen, außerdem sollten die Strahlfurchen trocken und gut ausgeprägt sein. Der Strahl sollte die Sohlenfläche in zwei möglichst gleichgroße Teile teilen und die Strahlspitze zur Hufspitze zeigen. Die Eckstreben sollten vorhanden sein und die weiße Linie in einem gleichmäßigen Bogen ohne Trennungen oder andere Veränderungen verlaufen. Die Ballen sollen gleichmäßig gerundet und gleich hoch sein und die Ballengrube sollte nicht auffallend tief sein. Die Hufknorpel sollten bei Palpation elastisch sein (Budras 2012b).

1.1.4 Hufformen

Für die Hufformen gibt es abhängig von der Rasse, dem Alter, der Haltung des Pferdes, also den Bodenverhältnissen, der Aufzucht, der Reitweise und der Art der Bewegung, einen Normbereich (Bras und Redden 2018). Beispielsweise haben Vollblüter eher eine flache Hufform mit spitzer Winkelung, bedingt durch eine lange Fessel und eine flache Schulter. Andalusier hingegen haben oft sehr steile Hufe mit einer stumpfen Winkelung der Vorderwand und steiler Fessel (Budras 2012b). Ebenso verändert sich die Hufform durch die Bearbeitung, das Gewicht des Pferdes und den Beschlag, sowie Gliedmaßenstellung und Fußung. Daher sollte bei der Beurteilung der Hufe die Rasse und das restliche Exterieur miteinbezogen werden (Budras 2012b). Bras und Redden (2018) betonen, dass eine „normale“ Hufform nicht unbedingt eine „gesunde“ Hufform sein muss, da jedes Pferd ein anderes Exterieur und dadurch andere Anforderungen an seine Hufe hat. Sie schreiben auch, dass es keinen Sinn ergebe, jeden Huf in eine „gute“ Form zwingen zu wollen, sondern der Huf sollte für das jeweilige Pferd ein balancierter, passender Huf sein. Daher vertreten sie auch die Meinung, dass Standardwinkelungen nicht über „gesund“ oder „ungesund“ entscheiden dürfen. Von Zadow (2012b) hingegen beschreibt für die Vorderhufe einen Hufwinkel für die Vorderwand von 45-50° und für die Hinterhufe einen Winkel von 50-55°. Die Hinterhufe sind meistens ovaler und die Sohle ist stärker gewölbt als am Vorderhuf. Einen Bockhuf definiert von Zadow (2012b) ab einem Winkel von 60°. Ein durchschnittlicher Huf ist am Tragrand ca. 2 cm breiter als am

Kronrand, bei engen Hufen ist das nur etwa 1 cm und bei weiten sind es ca. 3 cm, was sich auch auf die Winkel der Hufwände auswirkt (von Zadow 2012b). Dann gibt es auch noch Hufe, die aufgrund der Gliedmaßenstellung nicht gleichmäßig sind, sondern auf einer Seite steiler und auf der anderen Seite flacher, bei diesen Hufen betont auch von Zadow (2012b), wie Bras und Redden (2018), dass sie nicht in eine regelmäßige Form gezwungen werden dürfen.

1.1.5 Notwendigkeit und Einsatzbereich des Hufbeschlags

Hufbeschläge verändern den Huf und beeinflussen die Biomechanik (Malone und Davies 2019). Der Huf kann sich ohne Beschlag uneingeschränkt weiten und auf weichem Erdboden wird die gesamte Sohlenfläche zum Tragen ausgenutzt (Berndt 2012). Das kann mit keinem Hufschutz gleichwertig erhalten werden (Brunsting et al. 2019, Roepstorff et al. 2001). Pferde, die längere Zeit mit Beschlag gegangen sind, können meistens bis ins hohe Alter wieder auf Barhufgehen zurückgestellt werden. Dennoch ist für bestimmte Zwecke ein Hufbeschlag unerlässlich. Für unterschiedliche Verwendungen der Pferde werden unterschiedliche Beschläge benötigt. Zum Beispiel benötigen viele Sportpferde Stollen und viele Westernpferde werden mit speziellen Eisen für „Sliding stops“ beschlagen. Arbeitspferde und Kutschpferde brauchen zum Beispiel beim Holzrücken einen Gleitschutz oder einen Hufschutz gegen vermehrten Abrieb. Über den verwendungsabhängigen Beschlag hinaus werden bei einigen Huf- und Gliedmaßerkrankungen und Gang- und Stellungsfehlern Hufbeschläge benötigt (Berndt 2012). Dabei spielen vor allem Korrekturbeschläge eine wichtige Rolle. Ein therapeutischer Beschlag soll eine Struktur entlasten, damit sie heilen und ihre Funktion wieder erfüllen kann. Da dadurch andere Strukturen mehr belastet werden, sollten in den meisten Fällen therapeutische Beschläge nur vorübergehend eingesetzt werden (von Zadow 2011, Bras und Redden 2018). Darüber hinaus gibt es Pferde, die ohne einen Hufschutz nicht schmerzfrei laufen können, da die Hufsohle und die Hufwände zu dünn sind, sie einen schleifenden Gang oder einen Flachhuf oder Vollhuf haben. Weitere Gründe sind zu spitz gewinkelte Hufe mit untergeschobenen Trachten (Zwanghuf) oder Hufe, die aufgrund einer Fehlstellung zu ungleich abgenutzt werden und dadurch die Stellung oder die Hufform immer weiter verschlechtert wird (Berndt 2012). Bei einigen orthopädischen Erkrankungen sind orthopädische Beschläge

wichtiger Teil der Therapie, wie zum Beispiel Podotrochlose, Hufbeinfrakturen, Hufrehe, Spat und Sehnenschäden (Parks 2012).

Um ein Pferd optimal beschlagen zu können, müssen das Pferd, die Ansprüche an den Beschlag, der vorherige Beschlag und das Gangbild beurteilt werden. Außerdem müssen die Gliedmaßenstellung, Zustand des Hufes, Hufstellung und Hufform, der Gesundheitszustand, vor allem orthopädisch, sowie vorhandene Röntgenbilder, mit einbezogen werden. Dann wird ein Beschlagplan gemacht: wie der Huf bearbeitet werden muss, welche Art Hufeisen benötigt wird oder ob das Pferd barhuf bleibt. Nach der Hufkorrektur bzw. dem Beschlagen, muss überprüft werden, ob die im Beschlagplan festgelegten Punkte ordnungsgemäß ausgeführt wurden, ob der Beschlag und die Nagelung und die Korrektur passen und ob minimale Abweichungen bis zum nächsten Beschlag vertretbar sind oder sofort behoben werden müssen. Es sollte auch in Bewegung erneut beurteilt werden, ob die Fußung und die Gliedmaßenführung verbessert, verschlechtert oder erhalten wurde. Bei vorhandenen Mängeln müssen diese behoben werden (Berndt 2012).

1.1.6 Aufbau eines Hufbeschlags

Ein Hufbeschlag besteht aus mehreren Abschnitten. Der vordere Zehenteil wird auch als Schuss bezeichnet und hat die Form des Dorsaltragrandes, kann aber auch für besondere therapeutische Zwecke in der Form verändert werden. Außerdem kann der Schuss eine Zehenrichtung angebogen oder angeschmiedet bekommen. An den Schuss schließen nach palmar bzw. plantar die Schenkel an. Ein Hufbeschlag kann offen oder mit einem Steg hinten geschlossen sein. Die meisten Beschläge haben einen Falz, in den die Nagellöcher eingelassen sind. Stempeleisen haben keinen Falz (Brehm 2017).

Hufbeschläge können mit Stollen an den Schenkelenden ausgestattet werden, um den Pferden Gleitschutz auf rutschigen oder weichen Böden zu geben oder auf harten Böden die Trachten zu erhöhen (Brehm 2017).

Ein Griff ist ein quaderförmiges Eisenstück mittig am Schuss an der Bodenfläche. Ein Beschlag mit Griff bekommt auch immer Stollen und soll beispielsweise Zugpferden mehr Kraft beim Abfußen bieten (Brehm 2017).

Kappen oder Aufzüge sind Laschen, die der Hufwand anliegen sollen. Es gibt mittige Zehenkappen, seitliche Zehenkappen, Seitenkappen und Schenkelkappen. Aufzüge sind größer als Kappen, diese beeinträchtigen den Hufmechanismus je nach Position stärker und sollten nur in Einzelfällen eingesetzt werden (Stashak 1989).

1.1.7 Material für Beschläge

Die Werkstoffe für Hufbeschläge werden unterteilt in Metalle, Nichtmetalle und Verbundwerkstoffe. Die Metalle werden wiederum in Eisenwerkstoffe und Nichteisenmetalle unterteilt. Stähle und Eisengusswerkstoffe fallen unter Eisenwerkstoffe, unterscheiden sich jedoch in ihren Eigenschaften. Eisengusswerkstoffe bestehen zu mehr als 2,06 % aus Kohlenstoff, Stähle zu weniger als 2,06 %. Die Nichteisenmetalle unterteilt man in Schwermetalle, mit einer Dichte über 5kg/dm^3 , und Leichtmetalle, mit einer Dichte unter 5kg/dm^3 . Besonders relevant für Hufbeschläge ist das Leichtmetall Aluminium. Bei den Nichtmetallen wird in organische und anorganische Werkstoffe unterteilt. Die Kunststoffe wie PVC, Polyethylen, Polyesterharz und thermoplastische Elastomere gehören zu den organischen Werkstoffen und werden ebenfalls für Hufbeschläge verwendet (Rau 2012).

1.1.7.1 Stahl

Stahl wird aus Eisenerz gewonnen. Zur Metallgewinnung aus einem Erz müssen dem Erz Sauerstoff und Schwefel entzogen werden. Diese chemische Reduktion passiert im Hochofen und bringt Roheisen hervor. Durch die Verminderung der Eisenbegleiter durch Verbrennen wird daraus dann Stahl. Je nach seinem Kohlenstoffgehalt ist der Stahl unterschiedlich hart und unterschiedlich schmiedbar. Unlegierte Baustähle mit 0,1-4 % Kohlenstoff werden für die Hufbeschläge verwendet. Stahl ist im erwärmten Zustand plastisch bildsam und durch Druck gut umformbar. Bei Baustahl liegt die Temperatur dafür zwischen $780\text{ }^{\circ}\text{C}$ (dunkel kirschrot) und $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (weiß glut). Die Verfärbung des Stahls gibt eine Aussage über die Temperatur (Rau 2012).

1.1.7.2 Aluminium

Aluminium hat eine Dichte von nur $2,7 \text{ kg/dm}^3$, das ist nur die Hälfte von Stahl. Aluminium ist korrosionsbeständig, jedoch ist die Zugfestigkeit und die Verschleißfestigkeit geringer als bei Stahl. Daher wählt man häufig Legierungen, durch die zum Beispiel die Zugfestigkeit erhöht werden kann. Häufig genutzt ist die Legierung mit den Legierungsanteilen Magnesium und Silicium. Diese Legierungen können als Knetlegierung oder zum Gießen verwendet werden. Aluminium ist gut zu bearbeiten, sowohl durch Schmieden als auch durch Bohren oder Schweißen. Beim Schmieden von Aluminium ist die Temperatur, in der es schmiedbar ist, deutlich schwieriger zu beurteilen als bei Stahl. Zur Temperaturbestimmung streicht man mit einem Holzspan über das Aluminium, und wenn dabei eine dunkelbraune bis schwarze Linie entsteht, ist die Schmiedetemperatur erreicht. Der größte Vorteil von Aluminium ist die Gewichtsersparnis, daher wird der Aluminiumbeschlag gerne im Sport und in der Orthopädie verwendet (Rau 2012).

1.1.7.3 Kunststoffe

In der Herstellung von Kunststoffen werden aus Rohstoffen Monomere hergestellt, aus denen wiederum durch Polyaddition oder Polykondensation Polymere hergestellt werden. Es wird unterschieden in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere. Die Thermoplaste sind bei Raumtemperatur fest und hart, bei Erwärmung auf 100°C werden sie leicht verformbar, weitere Erwärmung führt zu einem teigigen oder flüssigen Zustand. Typische Thermoplaste sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC). Duroplaste können durch Erwärmung nicht weicher gemacht werden, sind nicht verformbar und auch nicht schweißbar. Typische Duroplaste sind Polyesterharz, Epoxidharz und Polyurethanharz. Polyurethane spielen eine wichtige Rolle in der Hufbeschlagstechnik. Werden Polyurethanwerkstoffe aus 2 Komponenten zusammengebracht, so entsteht eine Reaktion, durch die es zur Aushärtung kommt. In diesem Zweikomponentensystem sind die Polyurethanwerkstoffe als Kunsthorn oder als Polyestermaße für den Schmied erhältlich. Ansonsten sind Polyurethane im Spritzgussverfahren oder als Vergussmassen für Kunststoffbeschläge gut zu verarbeiten. Elastomere sind gummielastische Kunststoffe, die aus weitmaschig vernetzten Makromolekülen bestehen, sich um viele 100 % dehnen können und immer in ihre ursprüngliche Form zurückkehren. In dieser Klasse sind Silikonkautschukprodukte als Polster

im Hufbeschlagn von großer Bedeutung. Die meisten Kunststoffe sind recht leicht zu bearbeiten, sie sind schneidbar, schleifbar und schweißbar, zum Beispiel mit einem Heißluftföhn, um Klebelaschen anbringen zu können (Rau 2012). Mit Kunststoffbeschlügen besteht ein vermindertes Verletzungsrisiko durch Huftritte im Vergleich zu Tritten mit Beschlügen aus Stahl oder Aluminium (Sprick et al. 2017). Dies stellt vor allem für Pferde in Gruppenhaltungen einen großen Vorteil dar. Außerdem haben Kunststoffbeschlüge durch die Elastizität eine bessere Stoßdämpfung und können sich damit positiv auf Lahmheiten auswirken (Back et al. 2006, Sleutjens et al. 2018). Ein weiterer Vorteil ist das geringe Gewicht der Kunststoffbeschlüge, da schwerere Beschlüge den Bewegungsablauf stärker verändern und die auf das Strahlbein wirkende Kraft erhöhen (Eliashar 2007).

1.1.8 Therapeutische Beschlüge

Therapeutische Beschlüge werden entweder aufgrund einer konkreten Diagnose oder spezieller Symptome angewendet. Dabei gilt es sechs Ziele zu erreichen: Stoßdämpfung, Verschiebung des Druckzentrums, Änderung der Kräfteverteilung, Optimierung der Bewegung des Hufgelenks, Veränderung der Bodenhaftung und Verbesserung der Vorführphase (Parks 2012). Für die Stoßdämpfung sind Kunststoffbeschlüge und spezielle Einlagen besonders hilfreich (Back et al. 2006). Einlagen können auch zum Schutz der Sohle eingesetzt werden. Außerdem ist der Hufmechanismus sehr wichtig für die natürliche Stoßdämpfung des Pferdes, die durch einen Beschlag möglichst wenig beeinträchtigt werden sollte (Brunsting et al. 2019), außer bei speziellen Erkrankungen bei denen der Hufmechanismus für die Heilung kontraproduktiv ist (Parks 2012, Curtis 2006). Einen Anteil des Hufbeschlags zu verlängern oder zu verbreitern wirkt sich vor allem auf die Druckverteilung aus. Bei Bewegung auf weichen Böden verändert eine Erweiterung nach innen das Einsinken des Hufes und dadurch die Kraftverteilung (Hüppler et al. 2016) und auf harten Böden verändert eine Erweiterung nach außen das Aufsetzen, den Bodenkontakt und das Absetzen (Parks 2012). Es gibt Hufbeschlüge mit Stegen. Ein Steg soll drei Funktionen erfüllen. Zum einen soll ein Steg den Beschlag je nach Material stabilisieren, zum anderen soll er das Druckzentrum weiter nach palmar/plantar versetzen um dorsale Bereiche zu entlasten, oder der Steg soll einen Bereich vor direktem Druck vom Boden schützen

(Back et al. 2006) Die Position des Druckzentrums und die Kräfteverteilung hängen eng zusammen. Das Druckzentrum verändert sich nicht, wenn die Kräfteverteilung symmetrisch erfolgt. Bei asymmetrischer Verteilung hingegen wird sich die Position des Druckzentrums verschieben (Parks 2012). Um den Druck auf das Hufgelenk, die tiefe Beugesehne und das Strahlbein zu reduzieren, müssen der Abrollpunkt in palmare Richtung verschoben und die Trachten erhöht werden. Der weiter palmar liegende Abrollpunkt erleichtert das Abrollen und bewirkt ein etwas früheres Abrollen und eine geringere Belastung des Hufgelenks. Auch Abschrägungen rundherum können das Abrollen erleichtern (Parks 2012, Eliashar et al. 2002). Die Erhöhung der Trachten entlastet die tiefe Beugesehne (Lochner et al. 1980) und das Strahlbein (Willemen et al. 1999). Die Bodenhaftung hängt stark vom Material des Beschlags und dem Profil ab (Parks 2012, Pardoe und Wilson 1999). Die Vorführphase soll verändert werden, wenn die Vorführphase nicht physiologisch ist. Dazu hat Clayton (1990) untersucht, wie sich der Bewegungsablauf mit dem Winkel der Dorsalwand ändert und dabei herausgefunden, dass eine längere Dorsalwand, also ein flacherer Winkel, den Abrollpunkt nach dorsal verschiebt und damit das Abfußen verzögert, bzw. den Bodenkontakt verlängert und die Pferde eher mit der Hufspitze zuerst auftreten, und bei einem normalen Winkel (Vorderextremität 48° - 55° , Hinterextremität 52° - 60°) mit den Trachten zuerst. Die Vorführphase blieb jedoch an der Vorderextremität unbeeinflusst und an der Hinterextremität wurde der Vorföhrbogen mit einem flacheren Winkel der Dorsalwand flacher als mit einem normalen Winkel.

Je nach Erkrankung müssen unterschiedliche betroffene Strukturen entlastet werden, was durch unterschiedliche Änderungen am Beschlag erreicht wird.

1.1.8.1 NBS Beschlag

Ein wichtiger Beschlag im Bereich der orthopädischen Beschlüge ist der NBS Beschlag. NBS steht für Natural Balance Shoeing. Ziel dieses Beschlages ist es, den natürlichen Abrollpunkt zu erhalten und dem Pferd eine natürliche Zehenrichtung zu geben. Der Beschlag wird so angebracht, dass er wenige Millimeter palmar/plantar der weißen Linie zu liegen kommt. Je weiter der Abrollpunkt zurückgesetzt wird, umso mehr wird die höchste Belastung des

Hufgelenks verringert. Mit einem NBS Beschlag ist die höchste Belastung auf dem Hufgelenk um 14 % verringert (Eliashar et al. 2002). Er ist an der Zehe fast gerade und verbreitert mit einer starken Zehenrichtung. Da die Hufspitze des Pferdes leicht übersteht, raspelt man der Dorsalwand eine leichte Zehenrichtung an und den Rest kann das Pferd sich selbst ablaufen. Dadurch wird die länger werdende Zehe innerhalb eines Beschlagsintervalls verhindert und langfristig der natürliche Abrollpunkt erhalten und die Belastung des Hufgelenks geringgehalten. Dass im Verlauf des Beschlagsintervalls das Wachstum der Zehe eine steigende Belastung des Hufgelenks bewirkt, haben Moleman et al. (2006) herausgefunden.

1.1.8.2 Beschläge bei Sehnenschäden

Bei Sehnenschäden müssen die Beschläge die Sehnen entlasten. Für die tiefe Beugesehne werden die Trachten höhergestellt, da die erhöhten Trachten die tiefe Beugesehne entlasten (Eliashar 2007). Lochner et al. (1980) haben herausgefunden, dass die Änderung des Hufwinkels von 40° auf 70° den Zug auf die tiefe Beugesehne reduziert. Bei einer Erhöhung der Trachten um 10° haben Stephens et al. (1989) keine Veränderung der Belastung der oberflächlichen Beugesehne feststellen können. Eine Studie von Willemen et al. (1999) hat eine Entlastung des Strahlbeins um 24 % bei einer Erhöhung der Trachten um 6° ergeben. Entlastet es das Strahlbein, muss gleichzeitig der Zug der tiefen Beugesehne verringert werden.

Bei Schäden an der oberflächlichen Beugesehne oder dem Fesselträger kann ein Denoixbeschlag verwendet werden. Durch die Verbreiterung am Schuss und verlängerte Schenkel wird das Einsinken auf weichem Boden deutlich reduziert und der Fesselträger und die oberflächliche Beugesehne entlastet. Die Verbreiterung am Schuss wirkt sich vor allem auf weichem Boden so aus, dass der Winkel des Hufbeins flach bleibt, anstatt durch tieferes Einsinken der Zehe steiler zu werden (Hüppler et al. 2016).

1.1.8.3 Podotrochlosebeschlag

Um ein Pferd mit Podotrochlose zu unterstützen, soll der Beschlag den Zug auf die tiefe Beugesehne und somit auch auf das Strahlbein (Eliashar 2007) reduzieren, das Abrollen erleichtern und das Aufsetzen dämpfen. Beobachtungen bei MRT Untersuchungen haben ergeben, dass in der Phase zwischen Standposition und Absetzen auf diesen Strukturen die

höchste Belastung liegt (Parks 2012). Daher soll die Zehenrichtung stark abgerundet und zurückgesetzt werden und die Trachte erhöht werden, um den Abrollpunkt nach palmar zu verschieben. Außerdem soll ein Steg mit Strahlunterstützung verwendet werden, damit auch auf weichem Boden die Trachten erhöht bleiben, die palmaren Anteile mehr tragen und auch dadurch der Abrollpunkt weiter nach palmar verschoben wird. Außerdem empfiehlt sich ein Kunststoffbeslag in Kombination mit einem vibrationsabsorbierenden Pad, um möglichst viel Stoßdämpfung zu erzielen (Parks 2012). Durch diese Maßnahmen wird der Zug auf die tiefe Beugesehne verringert und der Hufrollenkomplex entlastet. Eine Erhöhung der Trachten um 1° entlastet das Strahlbein um 6 % (Eliashar et al. 2004).

1.1.8.4 Hufrehebeslag

Bei der Hufrehe müssen die schmerzhaften Bereiche des Hufes entlastet werden, meistens ist das der dorsale Teil des Hufbeinträgers, es kann jedoch auch eine Seite stärker betroffen sein als die andere. Möchte man eine Seite entlasten, muss auf der anderen Seite ein Keil gesetzt werden. Möchte man den dorsalen Anteil entlasten, dann bietet sich ein Steg sowie ein Keil zur Erhöhung der Trachte an, der gleichzeitig auch den Zug der tiefen Beugesehne am Hufbein reduziert und somit die Gefahr einer Rotation senkt. Zum selben Zweck sollte das Abrollen erleichtert werden, was durch einen Beslag mit geradem Schuss, zurückgesetztem Schuss oder einem offenen Zehenteil unterstützt werden kann. Eine signifikante Entlastung des Dorsalteils des Hufes durch diese Maßnahmen haben Hüppler et al. (2016) gemessen. Durch Belastung des Strahls können der gesamte Hufbeinträger und die schmerzhaften Bereiche der Sohle entlastet werden, insgesamt sollte eine möglichst breite Unterstützungsfläche entstehen (Parks 2012). Um die Unterstützungsfläche zu vergrößern, kann ein Steg mit Strahlunterstützung den Strahl zum Mittragen heranziehen und so den Druck besser verteilen (Hüppler et al. 2016).

1.1.8.5 Beslag bei lateromedialer Imbalance

Bei einer lateromedialen Imbalance sollte möglichst zuerst die entsprechende Hufbearbeitung erfolgen. Sollte eine Wand deutlich zu kurz sein, kann dies durch einen Beslag mit einem

dickeren Schenkel auf der Seite ausgeglichen werden oder einer Einlage zwischen Hufkapsel und Beschlag auf der betroffenen Seite (Parks 2012). Wie dick der Schenkel sein muss, hängt von der Wandlänge ab. Außerdem kann der Schenkel auf der anderen Seite erweitert werden, um die Fußung sanfter abzufangen und ein korrektes Fußes zu fördern. Die dorsopalmare Imbalance wirkt sich eher auf das Hufgelenk und die Sehnen aus, die lateromediale Imbalance auf Kron- und Fesselgelenk (Chateau et al. 2010).

1.1.8.6 Spatbeschläge

Ein Spatbeschlag soll dem Pferd das Abrollen und Abfüßen erleichtern, was durch eine Erhöhung der Trachten und eine ausgeprägte Zehenrichtung erreicht wird. Zusätzlich kann der Beschlag leicht nach hinten versetzt angebracht werden, um den Abrollpunkt zusätzlich weiter nach hinten zu verlagern (Eliashar 2007, Brehm und Rijkenhuizen 2017). Die Erhöhung der Trachten um 8° oder 16° kann Pferden mit Spat, die Schmerzen bei der maximalen Extension des Sprunggelenks haben, helfen (Peham et al. 2006). Außerdem wird bei Spat ein Beschlag nach Nyffenegger angewendet, bei dem der laterale Schenkel breiter, dicker und weiter ist. Auf diese Weise sollen die medialen Anteile des Sprunggelenkes entlastet werden (Brehm und Rijkenhuizen 2017).

1.1.9 Korrekturbeschläge beim Fohlen

Ein weiterer sehr wichtiger Einsatzbereich für orthopädische Korrekturbeschläge sind Fehlstellungen beim Fohlen, die oft mit geklebten Konstruktionen individuell korrigiert werden. Der Fohlenhuf bildet sich durch die Belastung zu der späteren Hufform. Daher ist es wichtig, den Huf von Anfang an regelmäßig zu kontrollieren und zu korrigieren, damit sich ein physiologischer Huf entwickeln kann. Es sollte jedoch ausschließlich der Tragrand korrigiert werden, Sohle und Strahl sollten belassen werden wie sie sind. Wichtig ist dabei, dass die Trachten nicht zu lang werden, damit sie sich nicht einrollen oder unterschieben und so ein Zwanghuf entsteht. Angeborene Fehlstellungen sind am leichtesten zu beheben, wenn sie so früh wie möglich erkannt und therapiert werden. Dabei sollten alle 2-6 Wochen Hufkorrekturen

durchgeführt und Haltung und Fütterung optimiert werden, was auch die Entstehung erworbener Fehlstellungen verhindern kann (Lukas 2012).

Der häufigste Grund, weshalb beim Fohlen Hufbeschläge benötigt werden, sind Fehlstellungen. Fehlstellungen können angeboren oder erworben sein und werden unterteilt in Beugefehlstellungen, Streckfehlstellungen/Hyperextension und winkelige Fehlstellungen (Lukas 2012).

1.1.9.1 Streckfehlstellungen/Hyperextension

Einige neugeborene Fohlen haben eine leichte Hyperextension der Zehe aufgrund schlaffer Muskulatur, was sich jedoch mit leichter Bewegung von alleine gibt (Auer 2006). Die angeborene Überstreckung von Gelenken tritt vor allem an der Hintergliedmaße auf, insbesondere im Fesselgelenk (Lukas 2012). Stärker ausgeprägte Hyperextension muss umgehend therapiert werden, da es sonst zu Schädigungen der Haut kommt, was die Behandlung deutlich erschwert. Ein wichtiger Bestandteil der Therapie sind geklebte Schuhe, mit palmarer/plantarer Extension, um den Tragrand am Boden zu halten (Hertsch 1986). Lockere Verbände zum Schutz der Haut sind wichtig, starre stabilisierende Verbände und Schienen sind jedoch kontraindiziert, da dies die Muskulatur weiter schwächt.

1.1.9.2 Beugefehlstellungen

Auch bei den Beugefehlstellungen gibt es unterschiedlich starke Ausprägungen bis hin zur Stehunsfähigkeit. Sie können sowohl das Hufgelenk, als auch das Fessel- oder Karpalgelenk betreffen. Beteiligt sind oft die tiefe und oberflächliche Beugesehne, sowie der Fesselträger (Auer 2006). Die Behandlung hängt vom Schweregrad ab und erstreckt sich von kontrollierter Bewegung, über Streckverbände und Medikamente wie Oxytetracyclin bis hin zur chirurgischen Durchtrennung von Unterstützungsbändern oder Sehnen. In weniger stark ausgeprägten Fällen hilft ein geklebter Hufschutz, der die Zehe mit einer dorsalen Extension nach vorne verlängert, um den Huf in eine plane Fußung zu bringen und so beim Abfußen durch einen nach dorsal verschobenen Abrollpunkt mehr Zug auf die Beugeschnen kommt, um nach und nach die Stellung zu verbessern, was meistens in ca. 2 Wochen erreicht wird (Lukas 2012, Auer 2006). Die langsame intravenöse Infusion von 3g Oxytetracyclin in 250-500 ml NaCl soll das Sehnengewebe lockern und in Verbindung mit weiteren Maßnahmen die Korrektur von

Fehlstellungen ermöglichen (Lokai und Meyer 1985, zitiert nach Auer 2006). In Fällen, bei denen die Hufextension nicht ausreicht, werden Streckverbände erfolgreich eingesetzt (McIlwraith 1987), wobei eine analgetische Medikation unverzichtbar ist.

1.1.9.3 Mediolaterale Winkel-Fehlstellungen

Bei diesen Gliedmaßenfehlstellungen handelt es sich um Abweichungen der Gliedmaßenachse nach medial oder lateral, wovon besonders Karpal-, Tarsal- und Fesselgelenk betroffen sind. Diese Fehlstellungen können angeboren sein oder durch Verletzungen der Wachstumsfuge oder Fehlbelastungen, sowie durch Überfütterung, zu viel Bewegung oder falsche Hufbearbeitung entstehen. Die Therapie ist abhängig vom Alter des Fohlens, dem Schweregrad der Fehlstellung, der Lokalisation und der Richtung. Bei der O-Beinigkeits spricht man von einer Varusdeformation und bei der X-Beinigkeits von einer Valgusdeformation. Huforthopädische Korrekturen führen gerade in den ersten Lebenswochen in vielen Fällen zu guten Ergebnissen. Dabei wird die mehrbeanspruchte Hufwand erweitert, bei Valgus die mediale, bei Varus die laterale. Dies kann durch Aufnageln eines Extensionseisens oder Ankleben eines Extensionshufschuhs oder Anbringen von modellierbaren Kunststoffen auf die Hufwand erreicht werden. Zusätzlich muss die Bewegung eingeschränkt und Mineralstoffe und Spurenelemente zu gefüttert werden. Außerdem können Stützverbände zur Stabilisation angebracht werden. Sollten diese Maßnahmen keine Besserung bringen, müssen chirurgische Eingriffe zum Einsatz kommen (Lukas 2012).

1.1.9.4 Erworbene Fehlstellungen

Bei den erworbenen Fehlstellungen gibt es den Bockhuf und den Sehnenstelzfuß. Beide entstehen durch unpassende Fütterung, falsche oder mangelnde Hufkorrektur. Bei beiden muss der Huf korrigiert und mit einem orthopädischen Beschlag versehen werden und das Pferd mit nichtsteroidalen Antiphlogistika versorgt werden. Beim Bockhuf müssen die Trachten gekürzt und ein orthopädischer Hufbeschlag/Fohlenklebeschuh mit einer dorsalen Verlängerung angebracht werden. Mit dem Beschlag soll ein Schrittprogramm durchgeführt werden. Beim Stelzfuß muss der Huf ebenfalls korrigiert und mit einem orthopädischen Beschlag versorgt werden (Lukas 2012). Je nach Schweregrad des Bockhufes oder Sehnenstelzfußes muss das Unterstützungsband der tiefen Beugesehne chirurgisch durchtrennt werden. Da diese

erworbenen Fehlstellungen oft von falscher Fütterung ausgelöst werden, sollte auf korrekte Fohlenfütterung geachtet werden (Kidd und Barr 2002).

2 Material und Methoden

2.1 Material

Für dieses Projekt wurde ein 3D- Drucker, das entsprechende Kunststofffilament und die Software „Shoemaker“ (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland), im weiteren Beschlagssoftware genannt, benötigt. Außerdem waren ein Computer, eine Handykamera und ein Maßband/eine Schublehre in Verwendung.

Der 3D-Drucker fällt unter den Sammelbegriff des additive Manufacturing (AM). Dabei wird ein Kunststofffilament in den Drucker eingezogen und bei ca. 200-250 °C geschmolzen und als Lagen des Druckobjektes Schicht für Schicht aufgelegt (Adamek und Piwek 2019, Wild 2020). Dazu zählen unter anderem die Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication (FDM/FFF) oder die Melted Extrusion Modeling (MEM) Technologie. Das Druckobjekt wird auf eine Platte gedruckt und muss nach Fertigstellung von der Platte gelöst werden. Die Platte sollte auf ca. 60°C geheizt werden, damit das Druckobjekt während es Druckes gut haften bleibt. Nach Fertigstellung, wenn die Platte abgekühlt ist, kann das Objekt abgelöst werden (Wild 2020).

Für das FDM/FFF/MEM-Verfahren können Formwachse und Thermoplaste wie Polyethylen, Polypropylen und thermoplastische Elastomere eingesetzt werden (von Übel 2020). Außerdem können inzwischen Metallpulver verwendet werden, um aus Metall 3D- Drucke herzustellen. Bei dem hier verwendeten Kunststofffilament handelt es sich um ein Thermoplastisches Polyurethan (TPU), welches in die Gruppe der Thermoplastischen Elastomere einzuordnen ist. Dieses zeichnet sich durch seine hohe Abriebfestigkeit, gutes Dämpfungsvermögen und ausreichende Steifigkeit aus (Lütkemeyer 2020). Das Filament gibt es mit einem Durchmesser von 1,75 mm oder 2,85 mm. Für dieses Projekt wurde ein Durchmesser von 1,75 mm verwendet. Das Material wurde einmal im Verlauf der Studie ausgetauscht, um das Material an die Anforderungen zu adaptieren. Die wesentlichen Eigenschaften sind jedoch identisch geblieben. Für den eingesetzten Drucker können verschiedene Kunststoffe angewendet werden, wobei der Fokus auf Thermoplastischen Elastomeren liegt. Diese können in unterschiedlichen Härtegraden eingesetzt bzw. kombiniert werden (Holfort 2021). Die genauen Härtegrade gibt der Hersteller nicht bekannt.

2.2 Programm

Die Beschlagssoftware: Im ersten Schritt muss der Huf des Pferdes fotografiert und ausgemessen werden (Abb.1). Dann muss im Programm ein Pferd ausgewählt oder neu angelegt werden, sowie der zu beschlagende Huf und die Art des Beschlages bestimmt werden (Abb.2). Daraufhin wird ein Foto hochgeladen und die gemessene Länge und Breite des Hufes angegeben (Abb.3). Im nächsten Schritt wird eine Schablone an den Huf auf dem Bild angepasst, um die Größenmaßstäbe und das Bild des Hufes miteinander zu verbinden (Abb.4). Die Schablone muss gut an den Messpunkten anliegen, damit der gedruckte Beschlag am Ende die richtige Größe bekommt. Danach legt man mittels Mausklicks die Hufumrandung fest, kann dann den Beschlag anpassen, um auf individuelle Bedürfnisse einzugehen. Es gibt eine Zugabefunktion, bei der ausgewählt werden kann, wie viel Millimeter Reservematerial außen hinzugefügt werden sollen, dabei kann die Hufumrandung um 1,2,3,4,5 oder 6 mm vergrößert werden (Abb.5). In weiterer Folge können zusätzliche Tools ergänzt werden wie Keile (Abb.6), Strahlunterstützungen (Abb.7), Erweiterungen (Abb.8), Nagellöcher, Spikelöcher oder Stollenlöcher (Abb.9). Zum Abschluss muss der Button „Beenden“ gedrückt werden, um den Beschlag speichern und dann drucken zu können. Nach Fertigstellung oder auch mitten in der Konstruktion kann der Beschlag von allen Perspektiven in einem 3D Modell betrachtet werden.

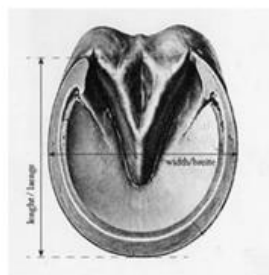


Abb. 1 Schritt 1: Huf in Länge und Breite ausmessen (Pfeifer 2018)

Schritt 1/7

Auftrag << Import Bemaßung Konstruktion Add-Ons Löcher Fertigstellen

Pferd:

Name:

Besitzer:

Huf:

Beschlagstyp:

- Beschlag mit Herz
- Beschlag mit Steg
- Traber
- Slider

< Zurück Weiter >  Speichern

Abb. 2 Schritt 2: Pferd, Besitzer und Beschlagsart wählen (Pfeifer 2018)

Datenimport

Pferd:

Huf:

Bild:

Länge: mm

Breite: mm

Winkel vorne: °

Winkel links: °

Winkel rechts: °

Keil: mm

Anmerkung:

OK  Abbrechen

Abb. 3 Schritt 3: Foto hochladen und Länge und Breite eingeben (Pfeifer 2018)

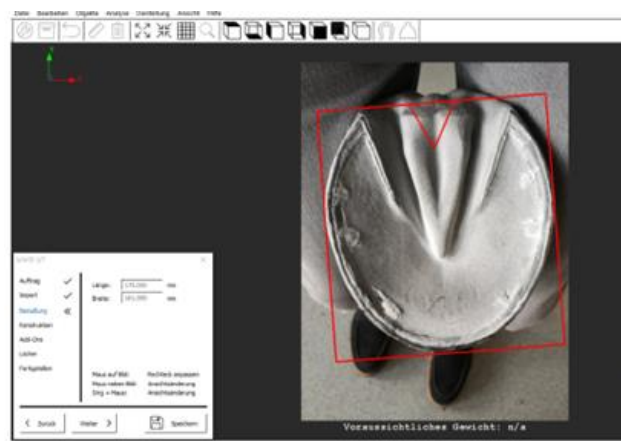


Abb. 4 Schritt 4: Schablone auf den Huf legen, sodass die Schablone an den Messpunkten anliegt (Pfeifer 2018)



◀ Zurück
Weiter ▶
 Speichern
Voraussichtliches Gewicht: 171.93 g



①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳	㉑	㉒	㉓	㉔	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙	㉚	㉛	㉜	㉝	㉞	㉟	㊱	㊲	㊳	㊴	㊵	㊶	㊷	㊸	㊹	㊺	㊻	㊼	㊽	㊾	㊿
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---



Voraussichtliches Gewicht: 175.47 g

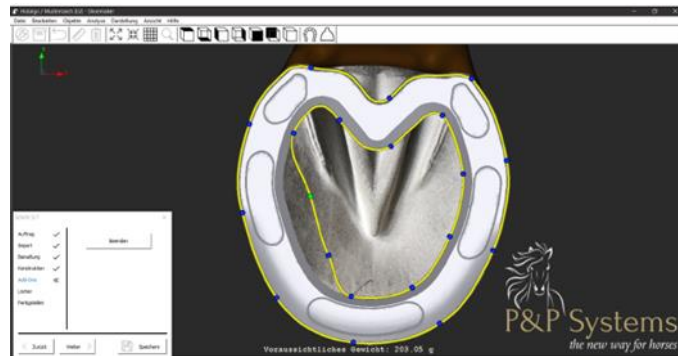


Abb.8 Schritt 9: falls benötigt Extensionen anfügen (Pfeifer 2018)



Abb. 9 Schritt 10: Nagellöcher, Spikelöcher und Stollenlöcher nach Bedarf einfügen (Pfeifer 2018)

2.3 Studienaufbau

Die Studie besteht aus Teil A und Teil B. Alle Messungen (Abb.10) wurden jeweils dreimal durchgeführt und die Mittelwerte daraus erhoben. Daher werden immer ausschließlich die Mittelwerte verwendet und nicht mehr als Mittelwerte bezeichnet. Jeder Beschlag wurde mit der Zusatzfunktion + 3 mm konstruiert, da die Firma bereits die Erfahrung gemacht hat, dass einige Beschläge zu schmal wurden. Alle Beschläge wurden mit Fotos dokumentiert und mit herkömmlichen Beschlägen verglichen, ob sie in Form und Funktion, als orthopädische Korrekturbeschläge den Anforderungen entsprechen oder dem Huf des Patienten genau passen.



Abb. 10: Messungen mit einer Schublehre von Länge, Breite, und Spezialanforderung (Keil) eines mit dem Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) hergestellten Beschlags (eigenes Bild)

2.3.1 Teil A: Testbeschlge

Zum Kennenlernen der Beschlagssoftware und um die Passgenauigkeit bzw. die Abweichungen der Maße von den gedruckten Beschlgen im Vergleich zum geplanten Beschlag zu überprüfen, wurden zehn Testbeschlge angefertigt. Diese Testbeschlge wurden als Studie konstruiert, um die Umsetzbarkeit der Anforderungen an orthopädische Spezialbeschlge zu überprüfen. Sie wurden nicht an Pferden angewendet. Die Testbeschlge wurden an drei Vorlagen angepasst. Als Vorlage dienten 3 Hufeisen aus einer Hufeisensammlung der Universittsschmiede. Die Vorlagen wurden parallel fotografiert, Länge und Breite ausgemessen und daran angepasst die Hufbeschlge in der Software konstruiert und dann gedruckt. Vorlage für die ersten vier Testbeschlge war ein Pantoffeleisen für die Vorderhufe. Der erste Testbeschlag sollte möglichst deckungsgleich zur Vorlage sein. Als zweiter Beschlag wurde ein NBS Beschlag gewählt, bei dem die Zehenrichtung gerade und zurückgesetzt konstruiert wurde. Ebenso werden für Sehnenerkrankungen besondere Beschlge benötigt, dafür wurde der dritte und vierte Testbeschlag gedruckt. Einer für Pferde mit Schäden an der tiefen Beugesehne mit 6 mm Keilen in der palmaren Hälfte der Schenkel zur Erhöhung der Trachten um 10°. Weiters wurde ein Denoixbeschlag für Schäden an der oberflächlichen Beugesehne oder dem Fesselträger, mit einer Verbreiterung an der Zehe sowie etwas verlängerten Schenkeln konstruiert. Die folgenden drei Beschlge wurden nach der Vorlage eines Herzeisens hergestellt: ein Podotrochlosebeschlag, der mit 4 mm Keilen an der palmaren Hälfte der Schenkel für die Trachtenerhohung um 6° und einem geraden und leicht zurückgesetzten Schuss erstellt wurde, außerdem ein Rehebeschlag, der mit einer offenen Zehe und einem Steg auf Höhe der Strahlspitze, sowie einem Herzsteg über dem Strahl geplant wurde, sowie ein Beschlag für Pferde mit einer lateromedialen Imbalance, bei dem der eine Schenkel dicker als der andere gedruckt wurde, um die Imbalance ausgleichen zu können. Der andere Schenkel erhielt eine Ausziehung nach lateral. Die letzten drei Testbeschlge wurden nach der Vorlage eines Hinterhufeisens gedruckt: Einmal ein Beschlag, der möglichst identisch zur Vorlage sein sollte, und zwei Spatbeschläge. Ein Spatbeschlag wurde mit 6 mm Keilen zur Erhöhung der Trachten um 10° und mit einer geraden Zehenrichtung konstruiert. Als letztes wurde ein Beschlag nach Nyffenegger zum Test gedruckt. Dafür wurde der laterale Schenkel durch eine Extension nach lateral verbreitert. Pro Beschlag betrug die Druckzeit, je nach Größe und Umfang der Zusatzobjekte, zwischen 35 und 50 Minuten.

2.3.2 Teil B: Patienten

Im zweiten Schritt des Projektes wurden für sechs Pferde im Auftrag der behandelnden Tierärztin/ des behandelnden Tierarztes zur Therapie individuell angepasste Beschläge mit dem 3D- Drucker für die persönlichen Bedürfnisse des Pferdes gedruckt. Bei jedem Pferd wurden zuerst die Anforderungen an den Beschlag aufgrund ihrer Diagnose beurteilt. Es wurde eine Hufkorrektur durch einen Schmied durchgeführt. Anschließend wurden Länge und Breite der zu beschlagenden Hufe gemessen und die Sohlenfläche des Hufes parallel fotografiert. Die Breite wird an der breitesten Stelle des Hufes gemessen und die Länge des Hufes von der Zehe bis zu einer gedachten Linie hinter den Eckstreben bzw. an der breitesten Stelle des Strahls (siehe Abb.1). Mit diesem Foto und den erhobenen Maßen wurde in der Beschlagssoftware der passende Beschlag konstruiert und gedruckt und nach Fertigstellung am Huf angebracht. Die Passgenauigkeit im Sinne einer Abweichung von den am Huf erhobenen Maßen wurde dokumentiert und die Beschläge am Huf durch Fotos festgehalten.

2.3.3 Statistik

Die Abmessungen der erstellten Beschläge wurden mit einer deskriptiven Statistik ausgewertet. Die Unterschiede zwischen den gedruckten Beschlägen und den geplanten Beschlägen wurden mittels Wilcoxon- Test, einem nicht parametrischen Test für verbundene Stichproben, auf Signifikanz getestet.

3 Ergebnisse

3.1 Teil A: Testbeschlge

3.1.1 Nach Vorlage eines Pantoffeleisens

Für vier von den zehn Testbeschlgen wurde ein Pantoffeleisen (Abb.11) für die Vorderextremität als Vorlage zur Überprüfung der Passgenauigkeit verwendet. Dieses Eisen ist rundlich mit einer Breite von 127 mm und einer Länge von 120 mm und besteht aus Aluminium. Die Huffläche ist nicht beurteilbar, da das Eisen an einer Wand hängt, an der einige Hufeisen ausgestellt sind. An der Bodenfläche hat es 14 Nagellöcher in einer von einem Schenkelende zum anderen Schenkelende durchgehenden Falz und hat rundum eine steile Abdachung. Am Schuss ist ein schmaler und flacher Griff. Es handelt sich um einen Beschlag für Galopprennpferde.



Abb. 11: eigenes Foto des oben beschriebenen Pantoffeleisens als Vorlage für die ersten vier Testbeschlge

Der erste Testbeschlag soll möglichst identisch zu diesem Pantoffeleisen rekonstruiert werden, um die Passgenauigkeit, die die Beschlagssoftware erreichen kann, zu bestimmen. Die Außenkontur ist nahezu deckungsgleich, jedoch ist es je einen Millimeter breiter und länger als die Vorlage, die Schenkel sind etwas breiter und der gesamte Beschlag ist 4 mm dicker (Abb. 12). Die Beschlagsdicke, die Schenkelbreite und die Form des Schusses sind nicht

beeinflussbar, sondern werden vom Programm automatisch an die Maße des Beschlages angepasst. Außerdem sind die gedruckten Beschläge alle geschlossene Beschläge, um die Stabilität dieses Kunststoffbeschlages zu gewährleisten. Als Form kann entweder ein gerader Steg oder die Herzform gewählt werden, wobei die Winkelung der Strahlunterstützung ebenfalls automatisch vom Programm bestimmt wird und durch eine Erweiterung vergrößert werden kann. Ebenso kann kein Falz ausgewählt werden, sodass die Nagelköpfe überstehen und nicht richtungsweisend sind. Die Zehenrichtung wird auch vom Programm an den Beschlag automatisch angepasst.



Abb. 12: eigene Fotos eines Standardbeschlages für die Vorderhufe zum Vergleich des gedruckten Beschlages mit der Vorlage. Links: der gedruckte Beschlag auf der Vorlage aufliegend, um zu zeigen, dass die Außenkontur deckungsgleich ist. Rechts: beide Beschläge im direkten Vergleich der Form und der Nagellochanzahl.

Der zweite Beschlag ist ein NBS Beschlag (Abb.13) nach Maßen des Pantoffeleisens (Abb. 11) und orientiert an dem NBS Beschlag (Abb.13). Der gedruckte Beschlag ist 3 mm breiter und 3 mm kürzer als die Vorlage. In diesem Fall soll er jedoch auch kürzer sein als die Vorlage, da der Schuss zurückgesetzt wurde. Der Schuss sollte hier 4 mm hinter den der Vorlage zurückgesetzt werden, um auf der weißen Linie zu enden, in dem Fall auf Höhe der Falz. Der Beschlag ist also ca. 1 mm zu lang, da er nur 3 mm kürzer ist als die Vorlage, aber 4 mm kürzer sein sollte. Außerdem stellt sich die Kontur des Beschlages nicht ganz symmetrisch rund dar, sondern ist an der rechten dorsalen Kontur etwas gerader als links. Dies ist auch bei der 3D Ansicht im Programm (Abb.13) schon erkennbar, folglich also ein Problem in der Konstruktion des Beschlages in der Software und unabhängig vom Druck. Wie weit der Schuss zurückgesetzt

wird, muss je nach Pferd und abhängig von seinen Bedürfnissen entschieden werden. Ein NBS Beschlag soll mit einem zurückgesetzten geraden, verstärkten Schuss den Abrollpunkt nach hinten versetzen, um das Abrollen zu erleichtern und Pferde mit Arthrosen, Sehnenschäden oder Podotrochlose zu unterstützen. Ziel ist, dass das Pferd sich die überstehende Zehe selbst abläuft und sich so nicht im Verlauf des Beschlagsintervalls, durch das Wachstum des Hufes, der Abrollpunkt Richtung dorsal verschiebt (Moleman et al. 2006). Er wird auch gerne für Springpferde verwendet (Berndt 2012).



Abb. 13: Links ein NBS Beschlag als Beispiel. Abb. Aus Scherer et al. (2012). In der Mitte die 3 D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) und rechts das gedruckte Resultat (eigene Bilder)

Der nächste Beschlag wurde zur Therapie eines Schadens der tiefen Beugesehne angefertigt (Abb. 14). Er weicht in der Breite nicht von der Vorlage ab und in der Länge ist er um 2 mm zu lang. Der Beschlag soll durch eine Erhöhung der Trachten die tiefe Beugesehne entlasten. Die Erhöhung der Trachten kann mit einem Keil erreicht werden, der hier mit 6 mm Höhe gewählt wurde, da das einer Erhöhung um 10° entspricht. Der gedruckte Beschlag ist an der Trachte 17 mm dick. Das sind 6 mm mehr als die Beschläge ohne Keil dick sind, somit ist die Anforderung erfüllt (Abb. 14).



Abb. 14: Links: 3D gedruckter Beschlag zur Entlastung der TBS; oben Mitte und rechts: 3D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland); unten rechts: Höhenvergleich mit Maßstab zur Darstellung der Trachtenerhöhung um 6 mm (eigene Bilder)

Außerdem wurde für Erkrankungen der oberflächlichen Beugesehne oder des Fesselträgers ein Denoixbeschlag gedruckt (Abb. 15), nach der Vorlage eines Denoixbeschlags aus Aluminium (Abb. 15) mit den Maßen des Pantoffeleisens (Abb.11). Der Denoixbeschlag soll die oberflächliche Beugesehne und den Fesselträger dadurch entlasten, dass durch den deutlich verbreiterten Schuss das Einsinken auf weichen Böden verhindert wird. Der Plan war den Schuss um $\frac{3}{4}$ der ursprünglichen Schussbreite zu erweitern. In diesem Fall sind das 20 mm und der Schuss am gedruckten Beschlag ist auch genau 20 mm stärker als der Schuss ohne Erweiterung wäre. Der gedruckte Beschlag ist nur einen Millimeter breiter, jedoch 5 mm länger als die Maße der Vorlage. Außerdem unterscheiden sich die Form der Schusserweiterung und die Positionen der Nagellöcher deutlich. Bei der Vorlage ist die Erweiterung als Dreieck Richtung Strahlspitze geformt und die Nagellöcher sind mehr auf Höhe der Trachten. Der gedruckte Beschlag hat die Nagellöcher rund um die breiteste Stelle des Hufes verteilt und die Erweiterung des Schusses geht gerade bis auf Höhe der Strahlspitze zurück. Außerdem ist die Zehenrichtung deutlich gerader als im Beispiel und die Nagellöcher liegen nicht in einer Falz, da die Beschlagssoftware dies nicht anbietet.



Abb. 15: links der Denoixbeschlag aus Aluminium als Beispiel (The Horseshoe Barn 2020). In der Mitte die 3D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings Ltd.®, Dublin, Ireland) von der Konstruktion und rechts eigenes Foto des gedruckten Denoixbeschlags.

3.1.2 Nach Vorlage eines Herzeisens

Drei der Testbeschläge sind an ein Herzeisen (Abb.16) als Vorlage angepasst. Es ist ein längsoval, dünnes Herzeisen mit 2 Falzen und 6 Nagellöchern und hat eine Breite von 120 mm und eine Länge von 126 mm. Es hat keine Abdachung und keine Zehenrichtung.



Abb.16: Herzeisen von der Wand mit den ausgestellten Hufeisen

Der erste Beschlag, der an die Vorlage des Herzeisens angepasst wurde, ist ein Beschlag für Pferde mit Podotrochlose. Diese Pferde haben häufig etwas längere Dorsalwände und einen schwachen Strahl. Der Beschlag soll mit einer stärkeren Strahlunterstützung den Strahl wieder mittragen lassen. Mit einer Erhöhung der Trachten kann der Zug auf die Beugesehne und damit der Druck auf das Strahlbein reduziert werden. Durch ein Zurücksetzen des Schusses kann zusätzlich das Abrollen erleichtert und der Zug auf die Beugesehne vermindert werden. Bei dem gedruckten Podotrochlosebeschlag (Abb. 17) ist die Strahlunterstützung nicht ganz symmetrisch und die Kontur rechts dorsal etwas steiler als links. Der Beschlag ist an der Trachte 5 mm höher als der Vergleichsbeschlag ohne Keil. Angegeben war ein Keil von 4 mm. Der Keil ist also um einen knappen Millimeter höher als geplant. Der 5 mm Keil bewirkt eine Trachtenerhöhung von 8° , was einer Entlastung des Strahlbeins von 48 % entspricht. Der Beschlag ist nur 4 mm kürzer als die Vorlage, sollte jedoch um 7 mm kürzer sein.



Abb. 17: Podotrochlosebeschlag. Links: 3D- Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) am Hufmodell, man sieht den zurückgesetzten Schuss. Mitte: der gedruckte Podotrochlosebeschlag. Rechts: Der Beschlag ist an der Trachte 5 mm höher als der Vergleichsbeschlag ohne Keil. (Eigene Bilder)

Der zweite Beschlag nach der Vorlage des Herzeisens ist ein Beschlag zur Therapie und Unterstützung bei Hufrehe (Abb.18). Dieser Beschlag hat keine Nagellöcher, da in der akuten Phase keinesfalls genagelt werden sollte (Curtis 2006). Gerade bei Hufrehe ist der 3D-Druck von großem Vorteil, weil sehr individuell auf die Bedürfnisse des jeweiligen Pferdes eingegangen werden kann. Der Strahl und die Trachten sollen mehr tragen und der dorsale Hufbeinträger soll möglichst entlastet werden. Daher gibt es einen Steg auf Höhe der Strahlspitze quer vom linken zum rechten Schenkel und es gibt eine Strahlunterstützung. Es gibt zwei Erweiterungen nach vorne entlang des Tragrandes, um ein Überkippen zu verhindern, die Zehe bleibt jedoch offen, um den Hufbeinträger dorsal maximal zu entlasten, daher ist die Länge des Beschlags nicht bewertbar. Der Ansatz für die Erweiterungen nach vorne steht immer etwas hervor, kann aber beim Anschweißen der Klebelaschen begradigt werden. Die Breite ist nur einen Millimeter breiter als die Vorlage.



Abb. 18: Links: 3D Ansicht des Beschlags für Hufrehe im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland). Rechts: der gedruckte Beschlag (eigene Bilder).



Abb. 19: Links Foto eines Hufes mit einer lateromedialen Imbalance. Abb. aus Kauffmann (2017) Rechts eine dorsopalmare Röntgenaufnahme einer linken Vorderextremität mit einer lateromedialen Imbalance (Röntgenbild der Universitätsklinik für Pferde)

Der dritte Beschlag, nach der Vorlage des Herzeisens, wird zur Korrektur einer lateromedialen Imbalance (Abb. 19) benötigt. Der Beschlag soll auf der Seite mit der höheren Wand einen breiteren und weiteren Schenkel haben um das Aufpußen besser abzufangen und eine planere Fußung zu ermöglichen. Die Seite mit der kürzeren Wand braucht einen Höhenausgleich. Wie dick der Schenkel des Beschlags zum Höhenausgleich sein muss, hängt individuell vom jeweiligen Huf ab. Bei diesem Beschlag ist der breitere Schenkel 6 mm breiter als der Schenkel auf der anderen Seite (Abb.20). Die Erhöhung des anderen Schenkels ist genau 2 mm höher als auf der anderen Seite. Das entspricht genau der Angabe. In diesem Fall stößt das Programm allerdings an eine Grenze. Es gibt noch keine Funktion, mit der man eine Erhöhung in Form eines Plateaus konstruieren kann. Daher wurde hier ein 2mm hoher Keil über die ganze Länge des Schenkels (Abb.20) mit dem Höhepunkt im hinteren Drittel des Schenkels gewählt, um auszunutzen, dass ein längerer flacher Keil von 2 mm durch das Druckprinzip, dass eine Schicht auf die andere gelegt wird, automatisch nahezu ein Plateau bilden muss. In der seitlichen Ansicht in der Abbildung sieht man, dass der Versuch, mit einem flachen Keil eine weitläufige Erhöhung zu erreichen, aufgrund der nicht vorhandenen Möglichkeit ein Plateau zu erstellen, relativ gut funktioniert hat. Nachträglich könnte man noch mit einer Raspel oder der Schleifmaschine etwas nachhelfen. Die 3D-Ansicht im Programm und die gedruckte Version ist ebenfalls dargestellt. Die Breite des gedruckten Beschlags ist aufgrund der Schenkelerweiterung nicht mit der Vorlage vergleichbar, in der Länge ist der gedruckte Beschlag 5 mm länger geworden als die Vorlage.



Abb. 20: Links die 3D Ansicht des konstruierten Beschlags im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) für die lateromediale Imbalance. Daneben der gedruckte Beschlag, rechts von der Seite im 3D Modell im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) und am gedruckten Beschlag. Mit dem orangen Pfeil jeweils der Höhepunkt des 2 mm Keils markiert (eigene Bilder)

3.1.3 Nach Vorlage eines Hinterhufeisens

Drei der Testbeschläge sind für die Hinterhufe und wurden an die Vorlage eines Hinterhufbeschlages (Abb.21) angepasst, um die Passgenauigkeit auch für die längsovale Hufform zu überprüfen. Weiters wurde die Umsetzbarkeit zweier Spatbeschläge getestet. Als erstes wurde der Beschlag möglichst genau rekonstruiert um die Passgenauigkeit für längsovale Beschlagsformen zu überprüfen. Es handelt sich um ein Pantoffeleisen für die Hinterhufe, es ist ein längsovaler Beschlag. Die Huffläche ist auch hier nicht beurteilbar, da der Beschlag an der Wand hängt. An der Bodenfläche ist ein durchgehender Falz von Schenkelende zu Schenkelende mit zehn Nagellöchern und vorne befindet sich ein schmaler und flacher Griff. Es ist 122 mm breit und 133 mm lang.



Abb. 21: Hinterhufeisen als Vorlage für drei Testbeschlge (eigenes Bild)

Der erste Beschlag für einen Hinterhuf sollte die Vorlage möglichst identisch wiedergeben (Abb. 22). Der Beschlag ist 4 mm zu schmal geworden und 2 mm zu lang. Außerdem ist der Beschlag dünner als die anderen, da während des Druckens das Material aufgebraucht war und nicht schnell genug gewechselt wurde. Um Material zu sparen, wurde er jedoch nicht neu gedruckt, da es bei diesem Testbeschlag nur um die Form und die Passgenauigkeit der Größe ging und es daher nicht von Relevanz ist, dass er statt 11 mm dick nur 8 mm Stärke hat. Die Kontur des rechten Schenkels erscheint eckiger als die des linken, was jedoch identisch zur Vorlage und daher kein Mangel der Konstruktion oder des Druckers ist.



Abb. 22: Standardbeschlag Hinterhufe. Links: 3D Modell des Beschlags im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland). Mitte: gedruckter Beschlag. Rechts: Unterschied in der Dicke aufgrund eines frühzeitigen Druckabbruches (eigene Bilder)

Der nächste Beschlag ist ein Spatbeschlag (Abb.23). Der Beschlag soll Pferden mit Spat den Bewegungsablauf erleichtern. Dafür werden die Trachten mit einem Keil erhöht und der Schuss gerader und etwas zurückgesetzt konstruiert. Das entlastet die Beugestrukturen und erleichtert

das Abrollen. An den Trachten ist der Beschlag 18 mm dick, die Beschläge ohne Keil sind an den Trachten zwischen 11 und 12 mm dick. Geplant war ein 6 mm Keil, somit erfüllt der Beschlag diesbezüglich die Kriterien. Der 6 mm Keil bewirkt eine Erhöhung der Trachten von 10° . Der Schuss ist auch deutlich gerader und etwas zurückgesetzt. Allerdings ist der Beschlag 3 mm länger als die Vorlage und sollte laut Plan 5 mm kürzer sein.



Abb. 23: Spatbeschlag. Links: Die 3D Ansicht des Beschlags im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland), daneben das gedruckte Resultat. Rechts oben: Seitenansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland), darunter Seitenansicht des gedruckten Beschlags im Vergleich der Schenkelhöhen im Trachtenbereich mit einem Beschlag ohne Erhöhung (eigene Bilder)

Der letzte Testbeschlag ist ein Beschlag nach Nyffenegger (Abb. 24). Die Maße sind von dem Hinterhufeisen (Abb. 21) übernommen und die Form ist an dem Beispiel aus Abb. 24 orientiert. Der laterale Schenkel ist verbreitert, um die medialen Anteile des Sprunggelenks zu entlasten. Der verbreiterte Schenkel soll um ein Drittel der Schenkelbreite verbreitert sein. Bei dem gedruckten Nyffenegger - Beschlag kann daher die Breite nicht verglichen werden. In der Länge ist er 7 mm länger als die Vorlage. Der Ansatz der Erweiterung ist wieder nicht gerade, kann aber beigeraspelt oder geschliffen werden. Der verbreiterte Schenkel ist 39 mm breit, der auf der gegenüberliegenden Seite ist 26 mm breit. Die Vorgabe, dass er um ein Drittel breiter sein soll ist also erfüllt. Dies spiegelt sich jedoch nicht vollständig in der Breitenmessung wider, da diese an der breitesten Stelle des Hufes gemessen wird und die hauptsächliche Verbreiterung des Schenkels im hinteren Schenkeldrittel positioniert ist.



Abb. 24: Links: Beispiel eines Beschlags nach Nyffenegger (Wäfler 2020) Mitte: 3D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland). Rechts: der gedruckte Nyffeneggerbeschlag (eigene Bilder)

3.2 Teil B: Patienten

Im zweiten Teil des Projekts wurden sechs Pferde mit individuell angepassten 3D- gedruckten Beschlügen beschlagen oder beklebt. Bei einigen Patienten wurden die Beschlüge zu Beginn provisorisch mit Klebeband geklebt, um sie jederzeit wechseln zu können und erst später mit Klebelaschen angebracht.

Drei Pferde benötigten in Gruppenhaltung einen Hufschutz und wurden daher mit einem 3D- gedruckten individuell angepassten Beschlag versorgt, aufgrund der geringeren Verletzungsgefahr durch Tritte mit Kunststoffbeschlügen (Sprick et al. 2017).

Pferd 1

Das erste Pferd, eine siebenjährige Haflingerstute mit einem Körpergewicht von 570 kg, brauchte einen Hufschutz nach einer Hufeiterung. Vorher ging sie barhuf. Der erste Beschlag für das erste Pferd war an den Schenkelenden deutlich zu eng und musste neu gedruckt werden. Die zweite Variante passte dann aber vorne rechts gut (Abb. 25) und vorne links war der Beschlag etwas zu lang, wurde aber auch weiter zurückgesetzt aufgebracht als der rechte.

Das Pferd hatte vorne rechts eine Hufbreite von 125 mm und eine Länge von 146 mm, der gedruckte Beschlag hatte exakt dieselben Maße. Anders war das vorne links. Da war der Huf 121 mm breit und 140 mm lang. Der gedruckte Beschlag wurde jedoch 143 mm lang, die Breite passte. Das Pferd wurde 10 Wochen lang damit geritten und lief deutlich besser als ohne Beschlag.



Abb. 25: Pferd 1. Von links nach rechts: die 3D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland), der gedruckte Beschlag am Huf von der Sohlenfläche, von lateral und von vorne (eigene Bilder)

Pferd 2

Das zweite Pferd war ebenfalls aus dieser Gruppenhaltung, eine 18-jährige Haflingerstute mit einem Körpergewicht von 500 kg, mit starker Fühligkeit nach einer Hufrehe in der Vergangenheit. Deshalb hat auch sie einen 3D gedruckten Beschlag bekommen. Ihr Huf vorne links war 116 mm breit und 136 mm lang. Vorne rechts 118 mm breit und 136 mm lang. Beide Beschläge waren jeweils 2 mm zu lang (Abb.27) und der linke 3 mm zu breit und der rechte 2 mm zu breit (Abb. 26). Trotz der Abweichungen des gedruckten Beschlags im Vergleich zu den Maßen des Hufes wurde der Beschlag angebracht. Sie konnte mit dem Beschlag deutlich besser laufen, wird allerdings nicht geritten und hat diesen Beschlag 12 Wochen getragen.



Abb. 26: Pferd 2 von links nach rechts: 3D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland); Huf mit Beschlag von der Sohlenfläche und beide Vorderhufe von vorne (eigene Bilder)



Abb. 27: links der linke Vorderhuf mit gedrucktem Beschlag von der Seite. Rechts der rechte Vorderhuf mit gedrucktem Beschlag von der Seite (eigene Bilder)

Pferd 3

Das dritte Pferd, eine sechsjährige Haflingerstute mit einem Körpergewicht von 470 kg, ebenfalls aus der Gruppenhaltung, brauchte wegen starker Fühligkeit einen Hufschutz. Beide Vorderhufe sind 135 mm lang und breit. Der Beschlag für den linken Vorderhuf ist 2 mm zu breit geworden, der für den rechten 2 mm zu lang und einen Millimeter zu breit. Bei dieser Stute wurden die Beschläge geklebt und nicht genagelt, da die Hufwände sehr brüchig waren. Auf den Fotos (Abb. 28) waren die Beschläge vorerst provisorisch mit Klebeband befestigt, um, vor dem richtigen Kleben mit Carbonklebelaschen, zu sehen, ob das Pferd damit zurechtkommt.



Abb. 28: von links nach rechts: die 3 D Ansicht des Beschlags des dritten Pferdes im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland), der Beschlag am Huf vorne links, die Ansicht der Sohlenfläche, von lateral und von vorne (eigene Bilder)

Die nächsten drei Patienten waren Hufrehepatienten der Klinik.

Pferd 4

Der erste Hufrehepatient war ein 16-jähriger Shetlandponywallach mit chronischer Hufrehe, für den ein Rehebeschlag konstruiert werden sollte, mit dem er besser laufen kann, da andere Hufbeschläge für ihn noch nicht das Richtige waren. Sein rechter Vorderhuf war 65 mm breit und 76 mm lang. Der linke war ebenfalls 76 mm lang, aber 69 mm breit. Konstruiert wurde ein Beschlag mit Strahlunterstützung und einem bis zur Strahlspitze zurückgesetzten geraden Schuss. Durch den Beschlag tragen die Trachten und der Strahl möglichst viel Gewicht und die Hufspitze schwebt (Abb. 29). Der Beschlag für den linken Vorderhuf ist einen Millimeter zu breit geworden und der für den rechten zwei. Die Länge ist bei diesem Beschlag nicht vergleichbar, da der Schuss stark zurückgesetzt wurde. Der Schuss sollte jeweils 13 mm zurückgesetzt werden, war vorne rechts jedoch nur 12 mm zurückgesetzt und vorne links 14 mm. Der Wallach konnte mit diesem Beschlag deutlich besser laufen und konnte auf diese Weise gut unterstützt werden.



Abb. 29: Rehebeschlag für den linken Vorderhuf in der 3D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) links, daneben von links nach rechts die Ansicht der Sohlenfläche, von lateral und von schräg vorne (eigene Bilder)

Pferd 5

Der zweite Hufrehepatient war ein 21-jähriger Ponywallach mit einem Körpergewicht von 240 kg mit chronischer Hufrehe. Sein Huf vorne rechts war 90 mm breit und 95 mm lang, vorne links 89 mm breit und ebenfalls 95 mm lang. Er benötigte auch einen Rehebeschlag, der die Trachten und den Strahl mehr tragen lässt und den dorsalen Anteil des Hufbeinträgers entlastet. Aufgrund zusätzlicher Probleme sollte er jedoch eine geschlossene Platte auf dem Huf haben, sodass kein Schmutz zwischen den Beschlag und den Huf kommen kann. Bei dem konstruierten Beschlag schützt die Platte den Huf. Auf die Bodenfläche der Platte wurden einige Keile

konstruiert, sodass die Hufspitze schwebt (Abb.30). Optimaler wäre es, wenn man mit dem Programm die Möglichkeit hätte, einen Rehebeschlag wie bei dem Testbeschlag in Abb. 18, zusätzlich auf die Platte drucken zu lassen. Das Programm bietet diese Möglichkeit noch nicht und es war mit der Konstruktion im Druck überfordert, sodass die Struktur des Beschlags nicht so stabil wie normalerweise, sondern relativ locker wurde, was dem Pony aufgrund seiner Elastizität entgegenkam, sich jedoch negativ auf die Haltbarkeit auswirkt, da der Abrieb, auch bei einem leichten Pony, viel schneller geht als üblich. Jedoch kam das Pony mit der Konstruktion gut zurecht. Die Maße der Beschläge waren identisch mit denen der Hufe. (Abb.31)



Abb. 30: Beschlag für den rechten Vorderhuf. Von links nach rechts: die 3D Ansicht des Beschlags im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) mit der Platte und den aufgesetzten Keilen. Der Beschlag von der Bodenfläche und der Huffläche. Man erkennt die lockere Struktur. Ganz rechts ist der Beschlag von der Seite fotografiert, die Keile ermöglichen ein Schweben der Hufspitze mit vollständig geschützter Sohlenfläche (eigene Bilder)



Abb. 31: Der genagelte Beschlag des linken Vorderhufs. Links die Bodenfläche dargestellt und rechts den Beschlag von der Seite. Der rechte Vorderhuf wurde identisch beschlagen (eigene Bilder)

Pferd 6

Die dritte Hufrehepatientin war eine 19- jährige Araberstute mit 443 kg Körpergewicht, mit Cushing, die deswegen eine Hufrehe bekommen hat. Der rechte Vorderhuf war 119 mm breit und 117 mm lang. Der linke Vorderhuf war 125 mm breit und 120 mm lang. Die Stute hatte unter der Hufbeinspitze ein Serom, was bei der Konstruktion des Beschlags berücksichtigt werden musste. Der erste Beschlag für den rechten Vorderhuf war mit 110mm Breite und 121 mm Länge zu schmal und der für den linken Vorderhuf mit 120 mm Breite und 119 mm Länge ebenfalls deutlich zu schmal, jedoch passte der für den linken Vorderhuf gut auf den rechten Vorderhuf und es musste nur für den linken Huf ein neuer Beschlag angefertigt werden. Der Beschlag war dann 126 mm breit und 128 mm lang und passte gut. Die Stute hatte die Beschläge für ca. 24 h provisorisch mit Klebeband geklebt um zu testen, ob der Beschlag ihr guttut (Abb.32). Der Erfolg war nicht vollständig zufriedenstellend, daher bekam sie vorübergehend eine Konstruktion mit Styrodurpads und Imprintbeschlägen.



Abb. 32: Links die 3D Ansicht des Rehebeschlags für den rechten Vorderhuf im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland), rechts daneben der provisorisch mit Klebeband geklebte Beschlag am rechten Vorderhuf mit dem Serom unter der Hufbeinspitze (eigene Bilder)

3.3 Auswertung

Die Ergebnisse der Studie und die erhobenen Maße sind in Tabelle 1 und Abb. 33 und 34 dargestellt.

Tabelle 1: Maße der 22 mit dem Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) gedruckten Beschläge in Breite und Länge (mm) und jeweils die Abweichungen (mm) zur Bestimmung der Passgenauigkeit, sowie eine Quantifizierung der Anforderungen an die Spezialitäten der orthopädischen Beschläge

Beschlag	Breite (mm)	Abweichung (mm)	Länge (mm)	Abweichung (mm)	Spezial Soll	Spezial Ist
Pantoffeleisen als Vorlage	127	-	120	-	keine	-
Testbeschlag Pantoffeleisen gedruckt	128	1	121	1	keine	-
NBS	130	3	117	Nicht bewertbar (n.b.)	Schuss zurückgesetzt um 4 mm	Ist 3 mm
Beschlag zur Entlastung d. TBS	127	-	122	2	Trachten-erhöhung 6 mm	Ist 6 mm
Beschlag zur Entlastung d. OBS/FT	128	1	125	5	Erweiterung des Schusses um 20 mm	Ist 20 mm
Herzeisen als Vorlage	120	-	126	-	keine	-
Podotrochlose - beschlag	121	1	122	n.b.	Trachtenerhöhung 4mm	Ist 5 mm

					Zurücksetzen d. Schusses 7 mm	Ist 4 mm
Rehebeschlag	121	1	124	n.b.	Zehe offen	-
Mediolaterale Imbalance	126	n.b.	131	5	Erweiterung 6 mm Erhöhung 2 mm	Ist 6mm Ist 2 mm
Hinterhufeisen als Vorlage	122	-	133	-	keine	-
Testbeschlag Hinterhufeisen	118	-4	136	+2	keine	-
Spatbeschlag	124	+2	136	+3	Erhöhung 6 mm Zurücksetzen 5 mm	Ist 6 mm Ist 3 mm zu lang statt 5 mm kürzer
Nyffenegger	127	n.b.	141	+7	Erweiterung soll 13 mm	Ist 13 mm
Pferd 1 Huf VL	121	-	140	-	-	-
Pferd 1 Beschlag VL	121	0	143	3	-	-
Pferd 1 Huf VR	125	-	146	-	-	-
Pferd 1 Beschlag VR	125	0	146	0	-	-
Pferd 2 Huf VL	116	-	136	-	-	-

Pferd 2 Beschlag VL	119	3	138	2	-	-
Pferd 2 Huf VR	118	-	136	-	-	-
Pferd 2 Beschlag VR	120	2	138	2	-	-
Pferd 3 Huf VL	135	-	135	-	-	-
Pferd 3 Beschlag VL	137	2	135	0	-	-
Pferd 3 Huf VR	135	-	135	-	-	-
Pferd 3 Beschlag VR	136	1	137	2	-	-
Pferd 4 Huf VL	69	-	76	-	-	-
Pferd 4 Beschlag VL	70	1	n.b.	n.b.	Schuss zurückgesetzt Soll 13 mm	Ist 14 mm
Pferd 4 Huf VR	65	-	76	-	-	-
Pferd 4 Beschlag VR	67	2	n.b.	n.b.	Schuss zurückgesetzt Soll 13 mm	Ist 12 mm
Pferd 5 Huf VL	89	-	95	-	-	-
Pferd 5 Beschlag VL	89	0	95	0	-	-
Pferd 5 Huf VR	90	-	95	-	-	-

Pferd	5	90	0	95	0	-	-
Beschlag VR							
Pferd	6	Huf	125	-	120	-	-
VL							
Pferd	6		126	1	n.b.	n.b.	Zehe offen
Beschlag VL							
Pferd	6	Huf	119	-	117	-	-
VR							
Pferd	6		120	1	n.b.	n.b.	Zehe offen
Beschlag VR							

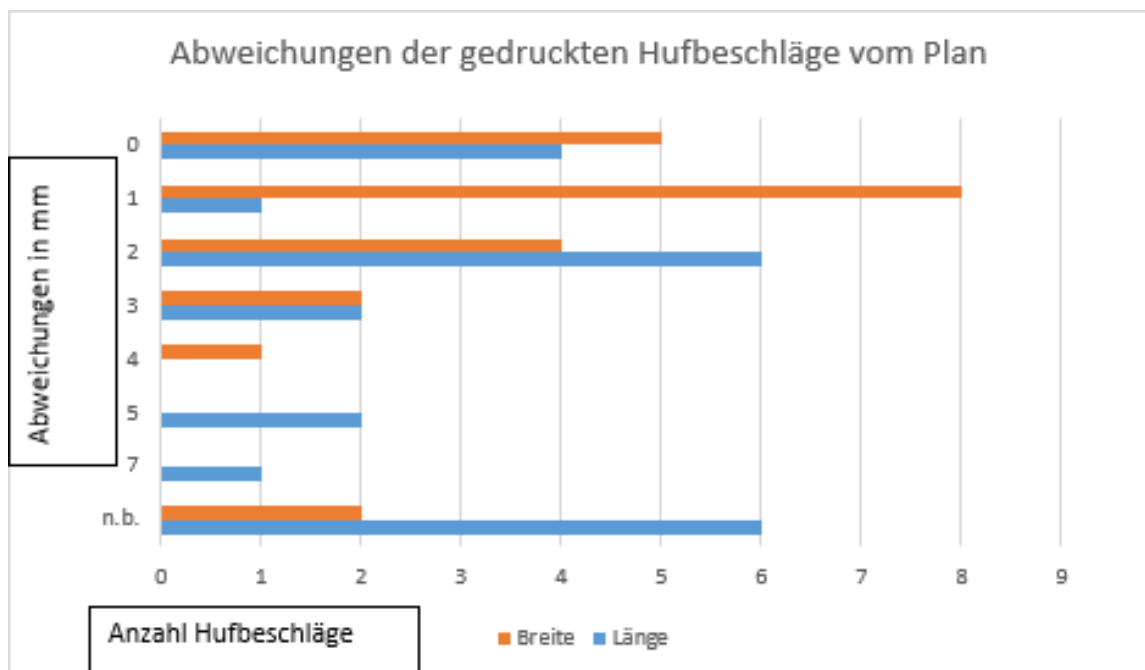


Abb. 33: In diesem Diagramm sind auf der x- Achse die Anzahl der Beschlge, auf der y-Achse die Abweichungen in mm dargestellt. Insgesamt wurde bei 22, mit dem Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) gedruckten, Beschlgen Länge und Breite bestimmt und mit dem jeweiligen Plan verglichen.

Statistik für Test ^a				
	Breite ist- Breite soll	Länge ist- Länge soll	Spez. Ist- Spez. soll	2. Spez. Ist- 2.Spez. soll
Z	-2,606 ^b	-2,956 ^b	,000 ^c	-1,342 ^d
Asymptotische Signifikanz (2-seitig)	,009	,003	1,000	,180

a. Wilcoxon-Test

b. Basiert auf negativen Rängen.

c. Die Summe der negativen Ränge ist gleich der Summe der positiven Ränge.

d. Basiert auf positiven Rängen.

Abb. 34: Wilcoxon-Test um Abweichungen in Länge, Breite und Spezialanforderungen auf Signifikanz zu testen. Bei der Breite und der Länge sind die Abweichungen signifikant ($p=0,009$ und $p=0,003$), bei den Spezialanforderungen ($p=1,0$ und $p=0,18$) nicht

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass es möglich ist, anhand eines Fotos und der Maße der Hufe mit der Beschlagssoftware individuell angepasste Kunststoffbeschläge zu drucken. Es konnten für sechs Patientenpferde Hufbeschläge gedruckt und am Huf angebracht werden. Bei der Überprüfung der Passgenauigkeit haben sich signifikante Unterschiede bei Länge ($p=0,003$) und Breite ($p=0,009$) ergeben. Die orthopädischen Spezialbeschläge waren umsetzbar und es gab keine signifikanten Unterschiede ($p=1,0$ und $p=0,18$) zum Plan.

4 Diskussion

In dieser Arbeit wurde untersucht, ob es möglich ist, anhand eines Fotos der Sohlenebene und der Maße von Länge und Breite der Hufe mit der Beschlagssoftware individuell angepasste Kunststoffbeschläge zu konstruieren und auszudrucken. Außerdem war das Ziel, Daten zur Passgenauigkeit zu erheben, um die Präzision der Hufbeschläge zu verbessern. Der dritte Aspekt, der in dieser Arbeit behandelt wurde, war die Verwendung des 3 D Druckes zur Produktion von orthopädischen Beschlägen zu überprüfen.

Die Arbeit hat ergeben, dass es möglich ist, anhand eines Fotos und der Maße angepasste Beschläge zu drucken. Die mit der Beschlagssoftware hergestellten Beschläge konnten am Huf angebracht und verwendet werden und wurden von den Pferden gut angenommen. Bei der Anbringung am Huf kann der Beschlag genagelt oder geklebt werden. In dieser Arbeit wurden die Beschläge nur genagelt bzw. kurzfristig mit Klebeband angebracht. Eine deutliche Einschränkung des Hufmechanismus durch - rundum bis in den Trachtenwandbereich - geklebte Beschläge haben Yoshihara et al. (2010) in einer Studie im Vergleich zu genagelten Beschlägen bestätigt. Den mit der Beschlagssoftware hergestellten Beschlag mit Carbonlaschen an den Huf zu kleben, stellt eine gute Möglichkeit bei einigen Erkrankungen dar, wie beispielsweise Hufrehe, Hufwandschäden oder Hufbeinfrakturen (Curtis 2006). Bei diesen Erkrankungen ist es für die Heilung besonders wichtig, keinen Reiz im Huf zu verursachen und den Hufmechanismus einzuschränken (Yoshihara et al. 2010). In diesem Fall ist eine Einschränkung des Hufmechanismus hilfreich, was bei gesunden Hufen jedoch von Nachteil ist, da der Effekt der Stoßdämpfung und der Blutversorgung vermindert wird (O'Grady und Poupard 2003, Curtis 2006). Auch wenn das Kleben zur Befestigung der Hufbeschläge am Huf eine hilfreiche Möglichkeit darstellt, besonders in der therapeutischen Anwendung, ist das Aufnageln immer noch die am häufigsten angewendete Methode (O'Grady und Poupard 2003). Bei den in dieser Studie hergestellten Beschlägen aus dem 3 D Drucker stehen nach dem Aufnageln die Nagelköpfe über die Bodenfläche des Beschlags hervor, da der Beschlag weder einen Falz hat, noch die Form der Nagellöcher Platz für die Nagelköpfe bietet. Über die vorstehenden Nägel werden die Stöße direkt in die Hufwand weitergeleitet, was zum Verlust des stoßdämpfenden Effekts des Kunststoffbeschlags führen kann (Back et al. 2006). Eine

gewisse Konzentration der Kraftübertragung an den Nägeln ist bei jedem beschlagenen Huf messbar (Hinterhofer 2017). Die Nagellöcher der in dieser Studie hergestellten Beschläge sind nicht richtungsweisend, trotzdem ergaben sich keine Probleme beim Aufnageln. O'Grady und Poupard (2003) schreiben, dass möglichst wenige und dünne Nägel verwendet werden sollen, und diese vor der breitesten Stelle des Hufes anzubringen sind, um den Hufmechanismus nicht einzuschränken. Außerdem sollen sie durch richtungsweisende Nagellöcher in die feste Hufwand geschlagen werden, damit die Hufwand nicht beschädigt wird und der Beschlag gut hält.

Die statistische Auswertung der Passgenauigkeit der in der vorliegenden Studie hergestellten 3 D Beschläge hat signifikante Unterschiede zwischen den Maßen in Länge und Breite des geplanten Beschlags und des gedruckten Beschlags ergeben. Bis auf eine Ausnahme waren die 3 D Beschläge eher zu lang und zu breit. Wird ein Beschlag zu schmal oder zu kurz, ist der Beschlag nicht verwendbar und muss neu gedruckt werden, was einen Zeitaufwand von ca. 30 - 50 min je nach Beschlag ausmacht und den Materialverbrauch steigert. Wird ein Beschlag zu lang oder zu breit, muss beurteilt werden, ob der Beschlag trotzdem so brauchbar ist, oder ob er im Nachhinein z.B. durch Raspeln noch verändert werden oder neu ausgedruckt werden muss. Die mit der Beschlagssoftware hergestellten Kunststoffbeschläge lassen sich gut mit einem Hufmesser, einer Raspel oder einer Schleifmaschine bearbeiten. O'Grady und Poupard (2003) beschreiben die gewünschte Länge eines Beschlages so, dass die Eckstreben gut abgedeckt sind und die Trachten gestützt werden. Der Schuss kann bis zur weißen Linie zurückgesetzt werden (O'Grady und Poupard 2003, Stashak 1989). Eine Dorsalverlängerung eines Beschlages wird zur Korrektur eines Sehnenstelfußes angewandt (Auer 2006), wobei der Abrollpunkt nach dorsal verschoben wird, was das Abrollen verzögert (Willemsen et al. 1999). In den meisten Fällen soll ein Beschlag den Abrollpunkt nach palmar verschieben, um die Belastung des Hufgelenks und der tiefen Beugesehnen zu verringern (Eliashar et al. 2002). Daher kann ein zurückgesetzter Schuss und dadurch ein in der Gesamtlänge etwas kürzerer Beschlag erwünscht sein, jedoch sollten die Schenkel eines Beschlages nicht zu kurz sein. Zu lang sollte der Beschlag nicht sein, da dann entweder eine unerwünschte Dorsalverlängerung entstehen würde oder die Gefahr besteht, dass das Pferd sich den Beschlag abtritt. Im Hinblick auf die Breite des Beschlages muss beachtet werden, dass der Beschlag genau an den Umriss des Hufes angepasst werden soll (O'Grady und Poupard 2003), im palmaren/plantaren Teil der

Schenkel jedoch etwas breiter (3-4 mm) sein darf als der Huf, da der Huf einerseits beim Hufmechanismus etwas Platz braucht (Stashak et al. 2002, O'Grady und Poupard 2003) und andererseits innerhalb des Beschlagintervalls wächst und auch dann nicht über den Beschlag ragen sollte (Parks 2012). Inwiefern sich der Kunststoffbeschlag aufgrund seiner eigenen Elastizität beim Hufmechanismus mit dem Huf gemeinsam weitet, ist unklar.

Back et al. (2006) haben einen stoßdämpfenden Effekt von Kunststoffbeschlügen nachgewiesen und die Vermutung geäußert, dass das unter anderem an dem Steg liegen könnte, der aufgrund des weichen Materials zur Stabilität benötigt wird, da er den palmaren Teil des Strahls mehr mit einbezieht. Die Kombination der vermehrten Belastung des palmaren Teils des Strahls, was möglicherweise zur Verstärkung des Hufmechanismus führt (Roepstorff et al. 2001), mit den Eigenschaften des Kunststoffs, würde erklären warum Back et al. (2006) in ihrem Versuch bei dem Kunststoffbeschlag weniger Vibrationen gemessen haben, als am unbeschlagenen Huf. Diese Beobachtung ist insofern für die in dieser Studie mit der Beschlagssoftware hergestellten Beschlüge relevant, da sie ebenfalls aus Kunststoff sind und einen Steg haben, der den palmaren Teil des Strahls vermehrt belastet. Untersuchungen zum Hufmechanismus und der Stoßdämpfung wurden mit den hier verwendeten Beschlügen noch nicht durchgeführt.

Fabrikhufeisen gibt es in Größenabständen von 2-7 mm zwischen den Größen zu kaufen (Strohm 2020). Der Schmied/die Schmiedin wählt dann die passende Größe aus und passt das Eisen an den Huf an. Dieses kann nicht so präzise angepasst werden wie ein handgeschmiedeter Beschlag, der möglichst exakt angefertigt wird (Brehm 2017). Studien mit genauen Daten zur Präzision von Stahlbeschlügen gibt es nicht, es wird jedoch in einem Zeitungsartikel des Kölner Stadtanzeigers als „millimetergenau“ bezeichnet (Hofmann 2006). Die Genauigkeit der Anpassung eines Beschlags durch die Beschlagssoftware kann nicht als „millimetergenau“ bezeichnet werden, da die Schwankungsbreite der Abweichungen von 1-7 mm reichte, auch wenn die meisten Beschlüge nur 1-2 mm Abweichung aufwiesen. Tendenziell wurden die mit der Beschlagssoftware hergestellten Beschlüge eher etwas zu breit ausgedruckt. Einige passten genau oder waren nur 1 mm zu breit. Hinzu kommt jedoch, dass die Maße des Hufes mit der Zugabefunktion plus 3 mm der Beschlagssoftware den Plan für die Beschlüge darstellen. Ohne die 3 mm Zugabe wären so gut wie alle Beschlüge zu schmal geworden. Das bedeutet wiederum, dass man bei der Interpretation der Passgenauigkeit der Beschlüge die 3 mm noch

zur Abweichung hinzurechnen müsste. Ein Beschlag, der 4 mm zu kurz geworden ist, weicht also im Prinzip 7 mm von den Angaben ab, die der Beschlagssoftware genannt wurden, aber nur 4 mm von dem benötigten Maß. Da dies ein bekanntes Problem der Software ist, wurde diese Zugabefunktion eingeführt, um zu schmale Beschlüge zu vermeiden. Dadurch werden zwar passende Beschlüge gedruckt, die Präzision der Beschlagssoftware kann jedoch die der Schmiede nicht übertreffen. Jedoch könnte das Programm durch Verbesserungen mit der Zeit präziser werden und ohne die Zugabefunktion passende Beschlüge herstellen.

Auch wenn die nachträgliche Bearbeitung der mit der Beschlagssoftware hergestellten Kunststoffbeschlüge nur begrenzt möglich ist, verbindet die Beschlagssoftware dennoch die Vorteile eines Kunststoffbeschlugs mit individuellen Gestaltungsmöglichkeiten zur möglichst genauen Herstellung individuell angepasster Kunststoffbeschlüge. Bei Kunststoffbeschlügen, wie sie ansonsten auf dem Markt erhältlich sind, ist die individuelle Anpassbarkeit, abgesehen von der Größenauswahl, kaum möglich. Ein weiterer Vorteil ist die Reproduzierbarkeit eines identischen Beschlugs durch erneutes Ausdrucken aus dem Archiv der Beschlagssoftware, was schnell und ohne Zusatzaufwand möglich ist, falls man wenige Wochen nach dem ersten Beschlag den selben nochmal benötigen sollte.

Die Überprüfung der Verwendung des 3 D Druckes zur Produktion von orthopädischen Beschlügen brachte ebenfalls ein gutes Ergebnis. Die angefügten Keile bei dem Beschlag zur Entlastung der TBS (Eliashar 2007), beim Podotrochlosebeschlag (Eliashar 2007), beim Spatbeschlag (Brehm und Rijkenhuizen 2017) und bei der lateromedialen Imbalance (Parks 2012) erreichten bei allen 4 Beschlügen mit Keilen zuverlässig die geplante Erhöhung. Ein Keil wurde mit 1 mm mehr gemessen als geplant, was jedoch in der Anwendung kein Problem darstellt, oder leicht mit der Schleifmaschine behoben werden kann. Etwas weniger zuverlässig waren die Ergebnisse in Bezug auf die Beschlüge, bei denen der Schuss zurückgesetzt wurde. Dabei handelt es sich um den NBS Beschlag (Eliashar et al. 2002), den Podotrochlosebeschlag (Eliashar 2007) und den Spatbeschlag (Brehm und Rijkenhuizen 2017) und zwei Patientenbeschlüge. Das funktionierte bei 3 von 5 Beschlügen annähernd, bei 2 Beschlügen war der Schuss weniger zurückgesetzt als der Plan es vorgesehen hat. Die Erweiterungen bei dem Denoixbeschlag (Hüppler et al. 2016), dem Beschlag für die lateromediale Imbalance

(Parks 2012) sowie dem Nyffenegger (Brehm und Rijkenhuizen 2017) hingegen waren sehr genau konstruierbar und waren auch im gedruckten Endprodukt präzise getroffen.

Der Wilcoxon- Test hat für die Unterschiede bei den Spezialzusätzen der orthopädischen Beschläge keine Signifikanz ergeben. Bei den Keilen und den Extensionen passt das gut, da es kaum bis keine Abweichungen gab. Bei den zurückgesetzten Schüssen gab es jedoch deutliche Abweichungen. Dass dennoch keine Signifikanz besteht, kann an der geringen Anzahl der Daten liegen.

Da die Software schon sehr viele wichtige Funktionen enthält, jedoch noch in der Entwicklung steht, gibt es ein paar Dinge, die verbessert werden könnten. Die Beschlagssoftware kann noch keine Plateauerhöhungen konstruieren, was jedoch für einige orthopädische Indikationen notwendig wäre. Beispielsweise zur Therapie einer lateromedialen Imbalance (Parks 2012) oder für einen Spatbeschlagnagel (Brehm und Rijkenhuizen 2017). Diese Funktion wäre eine sinnvolle Ergänzung, welche leicht umsetzbar sein müsste. Bei der Konstruktion eines Keils bestimmt man den Anfangspunkt des Keils, den höchsten Punkt und den Endpunkt. Es müsste in der Software nur programmiert werden, dass man zwei höchste Punkte festlegen kann. Auf diese Weise könnte man die Form eines Plateaus sehr flexibel und individuell gestalten. Weitergehend sind mit dem Programm keine Aufzüge möglich. Für den bestmöglichen Erhalt des Hufmechanismus ist es sinnvoll, keine Aufzüge zu verwenden. Jedoch gibt es auch Krankheitsbilder, bei denen Aufzüge gerade wegen der Einschränkung des Hufmechanismus einen wichtigen Aspekt des Beschlagnagels ausmachen. Auch für Pferde, bei denen der Hufmechanismus nicht eingeschränkt werden muss, können Aufzüge die Fixierung am Huf beim genagelten Beschlag erleichtern und die Stabilität erhöhen (Stashak 1989). Außerdem wäre es bei bestimmten Beschlägen hilfreich, die Zehenrichtung nicht nur in der Kontur konstruieren zu können, sondern auch in der Form, da bei einigen Beschlägen eine ausgeprägte Zehenrichtung von Vorteil wäre (Eliashar 2002). Noch eine weitere hilfreiche Ergänzung wäre die Möglichkeit, an beliebiger Stelle einen Steg von einem Schenkel zum anderen Schenkel in wählbarer Stärke platzieren zu können.

Die Herstellungsdauer der verschiedenen Beschlagsarten muss gewissenhaft verglichen werden. Die Korrektur der Hufe wäre in beiden Fällen mit ca. 20 min zu berechnen. Im Normalfall werden keine handgeschmiedeten Beschläge mehr verwendet, sondern nur noch

Fabrikhufeisen an den jeweiligen Huf angepasst. Es gibt Wettbewerbe, wie die Eagle Eye Competitions, bei denen Schmiede einen Huf 10 Sekunden sehen, jedoch nicht anfassen oder ausmessen dürfen und dann innerhalb von 20 Minuten aus einem Stahlstab einen passenden Beschlag schmieden oder innerhalb von 5 Minuten ein Fabrikhufeisen anpassen müssen (Olds College 2019). Derjenige, der am genauesten geschmiedet hat, gewinnt (Bleichenbacher 2016). Anich et. al (1997) haben dokumentiert, dass die Herstellung eines handgeschmiedeten Aluminiumhufeisens zwischen 45 und 75 min dauert je nach Art des Hufeisens. Ein 3D-gedruckter Beschlag dauert inklusive Fotografieren und Ausmessen, Konstruieren und Drucken ca. 50 - 60 min. In der Druckzeit kann man jedoch bereits weitere Beschläge konstruieren oder weitere Pferde ausschneiden oder beschlagen. Außerdem besteht ein weiterer Vorteil darin, dass das Pferd nur einmal zum Hufe Ausmessen und Fotografieren den Huf geben muss und dann erst wieder zum Beschlagen. Gerade orthopädische Patienten mit stärkeren Schmerzen können davon sehr profitieren und benötigen dann eventuell keine Sedierung oder Leitungsanästhesien, um den Hufbeschlag überhaupt zu ermöglichen. Beim Anpassen eines Stahl- oder Aluminiumbeschlags kann möglicherweise häufigeres Überprüfen der Passform und Größe nötig sein.

Insgesamt ist die in dieser Studie überprüfte und verwendete Beschlagssoftware einfach zu bedienen und es bringt gut anwendbare individuell angepasste Hufbeschläge hervor, ohne dass ein 3D-Scanner benötigt wird. Aufgrund der Kombination der individuellen Gestaltungsmöglichkeiten mit den Vorteilen des Kunststoffbeschlags (Sleutjens et al. 2018, Back et al. 2006) stellt das Programm eine gute Einsatzmöglichkeit insbesondere in der Orthopädie dar. Stahl- und Aluminiumbeschläge werden jedoch für Standardbeschläge ohne spezielle Indikationen vermutlich nicht abgelöst werden. Die vorliegende Studie hat Einschränkungen durch die geringe Anzahl an Tieren, die in der Studie beschlagen wurden. Außerdem steckt das Programm noch in der Entwicklung und wird, aufgrund der Lerneffekte während der Verwendung des Programms fortlaufend verbessert. Außerdem hat zwischendrin eine Adaptation des Materials stattgefunden für eine bessere Haltbarkeit. Die Möglichkeiten der Beschlagssoftware hängen auch von der anwendenden Person ab, sowie von deren Einschulung in das Programm und die Übung und Erfahrung mit dem Programm. In dieser Studie wurden jedoch alle Beschläge von einer Person konstruiert, so dass die anwendende

Person die Vergleichbarkeit der Beschlge nicht beeinflusst, abgesehen von der mit jedem konstruierten Beschlag wachsenden Erfahrung im Umgang mit dem Programm.

In künftigen Studien könnte eine Langzeitbeobachtung der gedruckten Beschlge in Bezug auf die Haltbarkeit und ihren Nutzen in der Anwendung von Therapiebeschlgen durchgeföhrt werden. Dabei wären insbesondere die Stabilität von Interesse und, ob vor allem bei den orthopädischen Therapiebeschlgen, nach einiger Zeit ein Funktionsverlust eintritt, wenn beispielsweise Keile stärker abgenutzt werden als der Rest. In Hinsicht auf die Abnutzung wäre auch interessant wie viel Materialverlust in der Nutzung entsteht, wodurch möglicherweise Mikroplastik (Stöven et al. 2015) in die Umwelt gebracht werden könnte. Im Hinblick auf die Umwelt könnte auch noch der Aspekt des Recyclings betrachtet werden, ob es möglich ist den Beschlag für zwei Beschlagsintervalle zu nutzen oder durch Recycling aus benutzten Beschlgen neues Druckermaterial herzustellen. Außerdem wäre eine interessante Fragestellung, wie sich der Hufmechanismus mit einem Kunststoffbeschlag im Vergleich zu Aluminium und Stahlbeschlgen verhält, und ob der Beschlag selbst sich auch beim Fußen weitet. In dem Zusammenhang haben bisher Brunsting et al. (2019) das Verhalten des Hufmechanismus am unbeschlagenen Huf, mit einem Standardbeschlag mit Zehenkappe und einem Beschlag, der an der Zehe geteilt ist, sodass sich die Hälften unterschiedlich bewegen können, untersucht. Yoshihara et al. (2010) haben die Ausprägung des Hufmechanismus bei genagelten und rundherum geklebten Beschlgen untersucht. Eine Studie zum Verhalten des Hufmechanismus mit Kunststoffbeschlag wäre jedoch von Interesse.

5 Zusammenfassung

In der Weiterentwicklung des Hufbeschlags bietet sich der 3D- Druck aufgrund seiner Vielseitigkeit zur Herstellung individuell angepasster Kunststoffbeschlüge an. In dieser Studie wurde geprüft, ob es möglich ist, anhand eines Fotos der Sohlenebene und der Maße von Länge und Breite des Hufes einen individuell angepassten Beschlag mit der Beschlagssoftware herzustellen und zu drucken. Weitergehend sollten Daten zur Passgenauigkeit der mit dem Programm gedruckten Beschlüge im Vergleich zum Plan erhoben und die Einsatzmöglichkeit für orthopädische Spezialbeschlüge geprüft werden. Dafür wurden zehn Testbeschlüge für unterschiedliche orthopädische Indikationen hergestellt und sechs Patientenpferde mit individuell angepassten Beschlügen versorgt. Die Studie hat ergeben, dass es möglich ist, individuell angepasste Hufbeschlüge anhand eines Fotos und der Maße der Hufe zu drucken und orthopädische Spezialbeschlüge den Anforderungen entsprechend herzustellen. Die statistische Auswertung der Daten zur Passgenauigkeit hat signifikante Abweichungen der gedruckten Beschlüge in Länge und Breite zum Plan ergeben, jedoch keine signifikanten Abweichungen der Spezialanforderungen (wie zum Beispiel Keile, Erweiterungen etc.) zum Plan. Diese Studie zeigt, dass die mit der Beschlagssoftware 3D-gedruckten Kunststoffbeschlüge prinzipiell anwendbar sind und in der Orthopädie eine hilfreiche Unterstützung versprechen.

6 Summary

Printing horseshoes using a 3D- print system consisting of a custom made software and a standard printer offers many possibilities in further development of horseshoeing to produce individually adapted plastic horseshoes, because 3D-Print is a very multifaceted technology. In the present study, the usability of the 3D Print system was tested to evaluate, whether it is possible to produce an individually adapted plastic horseshoe based on a photograph of the weightbearing surface of the hoof and its measured dimensions. Furthermore, data on the accuracy of the print of the horseshoes compared to the planned models were collected for plain as well as orthopaedic shoes with features such as wedges and extensions. For this test ten shoes with fittings for different orthopaedic indications were produced and six patient horses were supplied with individually adapted fittings according to the instructions of the treating veterinarian. The present study has shown that it is possible to print individually adapted horseshoes using a photograph and the dimensions of the hooves and to produce orthopedic shoes according to given specifications. The statistical evaluation of the data on the accuracy of fit revealed significant differences in length and width from the planned horse shoes (within a few millimetres), but there were no significant deviations of the special orthopaedic requirements from the plan. This study shows that it is possible to plan and to 3D print plastic horseshoes with an adequate precision using the “Shoemaker” (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) software and printer, which is a promising result for future patients requiring such shoes.

7 Abkürzungsverzeichnis

OP	Operation
CT	Computertomographie
MRT	Magnetresonanztomographie
FFF	Fused Filament Fabrication
FDM	Fused Deposition Modeling
MEM	Melted Extrusion Modeling
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
NBS	Natural Balance Shoe
TBS	Tiefe Beugesehne
NSAID	Nichtsteroidale Antiphlogistika
AM	additive Manufacturing

8 Literaturverzeichnis

- Adamek J, Piwek V. 2019. Additive Fertigung – 3D- Druck. Stand der Technik, Anwendungsempfehlungen und aktuelle Entwicklungen. In: Witte H, Rauscher R, Ryba M, Hrsg. Lingener Studien Management und Technik. Münster: LIT Verlag, Bd 11, 2-4.
- Anich J, Stanek C, Hinterhofer C, Kretz R. 1997. Aluminiummatrixverbundwerkstoffe- neue Werkstoffe im Hufbeschlag Teil 1: Die Herstellung von handgeschmiedeten Hufeisen. Pferdeheilkunde, 13 (6): 629-637.
- Auer J. 2006. Diagnosis and Treatment of Flexural Deformities in Foals. Clinical Techniques in Equine Practice, 5 (4): 282-295.
- Bachmann I, Stauffacher M. 2002. Haltung und Nutzung von Pferden in der Schweiz: Eine repräsentative Erfassung des Status quo. Schweizer Archiv für Tierheilkunde, 144 (7): 331-347.
- Back W, van Schie HM, Pol JN. 2006. Synthetic shoes attenuate hoof impact in the trotting warmblood horse. Equine and Comparative Exercise Physiology, 3 (3): 143-151.
- Berndt A. 2012. Hufpflege beim erwachsenen Pferd. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. Der Huf. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 160-167.
- Berndt A. 2016. Orthopädische Hufbeschläge- traditionell bei Sehnen- und Fesselträgererkrankungen verwendete Hufeisenmodifikationen. In: Rackwitz R, Pees M, Aschenbach JR, Gäbel G, Hrsg. 8. Leipziger Tierärztekongress- Tagungsband 2. Berlin: Lehmanns Media GmbH, 274-276.
- Bleichenbacher AV. 2016. Feuer und Flamme für heiße Eisen. Tagblatt Ostschweiz 2016. <https://www.tagblatt.ch/ostschweiz/feuer-und-flamme-fuer-heisse-eisen-ld.655298>. (Zugriff 20.10.2020).
- Bras R, Redden R. 2018. Understanding the Basic Principles of Podiatry. Veterinary clinics of North America: Equine Practice, 34 (2): 391-407.
- Brehm W. 2017. Grundlagen der Hufpflege und des Hufbeschlags. In: Brehm W, Gehlen H, Ohnesorge B, Wehrend A, Hrsg. Handbuch Pferdepraxis. Vierte Aufl. Stuttgart: Enke, 1083-1101.
- Brehm W, Rijkenhuizen A. 2017. Lokale Periarthritis et Osteoarthrosis tarsi ("Spat"). In: Brehm W, Gehlen H, Ohnesorge B, Wehrend A, Hrsg. Handbuch Pferdepraxis. Vierte Aufl. Stuttgart: Enke, 990- 994.
- Bronkhorst G, de Zwaan J, Back W. 2012. Nagelloser Hufschutz. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. Der Huf. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 51-58.
- Brunsting J, Dumoulin M, Oosterlinck M, Haspelslagh M, Lefère L, Pille F. 2019. Can the hoof be shod without limiting the heel movement? A comparative study between barefoot, shoeing with conventional shoes an an split-toe shoe. The Veterinary Journal, 246: 7-11.
- Budras K. 2012a. Bauelemente. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. Der Huf. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 75.

- Budras K. 2012b. Hufkapsel (Capsula ungulae). In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. Der Huf. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 75-78.
- Budras K. 2012c. Mikrostruktur der Hufhaut. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. Der Huf. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 78-79.
- Budras K. 2012d. Segmente des Hufes und ihre Hornprodukte. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. Der Huf. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 85-90.
- Budras K. 2012e. Nervenversorgung. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. Der Huf. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 108-112.
- Budras K. 2012f. Hufbeinträger und weiße Linie. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. Der Huf. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 92-97.
- Budras K, König H. 2005. Huf (Ungula) des Pferdes. In: König H, Liebich HG, Hrsg. Anatomie der Haussäugetiere. Dritte Aufl. Stuttgart: Schattauer, 644- 653.
- Budras K, König H. 2008. Allgemeine Körperdecke. In: Salomon FV, Geyer H, Gille U, Hrsg. Anatomie für die Tiermedizin. Zweite Aufl. Stuttgart: Enke, 644.
- Budras K, Mülling C, Reese S. 2005. Zehenendorgan (Organum digitale). In: König H, Liebich HG, Hrsg. Anatomie der Haussäugetiere. Dritte Aufl. Stuttgart: Schattauer, 624-630.
- Chateau H, Degueurce C, Jerbi H, Crevier- Denoix N, Pourcelot P, Audigié F, Pasqui-Boutard V, Denoix JM. 2010. Normal three-dimensional behaviour of the metacarpophalangeal joint an the effect of uneven foot bearing. *Equine Veterinary Journal*, 33 (33): 84-88.
- Clayton HM. 1990. The effect of an acute hoof wall angulation on the stride kinematics of trotting horses. *Equine Veterinary Journal*, 9: 86-90.
- Curtis S. 2006. Nail-less horseshoeing. In: Curtis S, Hrsg. Corrective Farriery a textbook of remedial horseshoeing. Zweite Aufl. Suffolk: Newmarket Farrier Consultancy, 495-514.
- Eliashar E. 2007. An Evidence-Based Assessment of the Biomechanical Effects of the Common Shoeing an Farriery Techniques. *Veterinary clinics of North America: Equine Practice*, 23 (2): 425-442.
- Eliashar E, McGuigan MP, Rogers KA, Wilson AM. 2002. A comparison of three horseshoeing styles on the kinetics of breakover in sound horses. *Equine Veterinary Journal*, 34 (2): 184-190.
- Eliashar E, McGuigan MP, Wilson KA. 2004. Relationship of foot conformation and force applied to the navicular bone of sound horses at the trot. *Equine Veterinary Journal*, 36 (5): 431-435.
- Geyer H. 2008a. Huf, Ungula, des Pferdes. In: Salomon FV, Geyer H, Gille U, Hrsg. Anatomie für die Tiermedizin. Zweite Aufl. Stuttgart: Enke, 666.
- Geyer H. 2008b. Das Zehenendorgan. In: Salomon FV, Geyer H, Gille U, Hrsg. Anatomie für die Tiermedizin. Zweite Aufl. Stuttgart: Enke, 656.

- Geyer H. 2008c. Huf (Ungula) des Pferdes. In: Salomon FV, Geyer H, Gille U, Hrsg. Anatomie für die Tiermedizin. Zweite Aufl. Stuttgart: Enke, 659-660.
- Hertsch B. 1986. Durchtrittigkeit. In: Dallmer H, Hrsg. Müssen es immer Nägel sein? Neue Wege der Hufbehandlung. Salzhausen-Putensen: Selbstverlag, 44-51.
- Hertsch B, Höppner S. 1999. Zur Diagnostik des Podotrochlose-Syndroms in der Praxis. Pferdeheilkunde, 15 (4): 294- 308.
- Hespel AM, Wilhite R, Hudson J. 2014. Invited Review- applications for 3D Printers in veterinary medicine. Veterinary Radiology and Ultrasound, 55 (4): 347-358.
- Hinterhofer C. 2017. Computermodell des beschlagenen Hornschuhs. In: Brehm W, Gehlen H, Ohnesorge B, Wehrend A, Hrsg. Handbuch Pferdepraxis. Vierte Aufl. Stuttgart: Enke, 1094.
- Hinterhofer C, Stanek C, Haider H. 2000. The effect of flat horseshoes, raised heels and lowered heels on the biomechanics of the equine hoof assessed by finite element analysis (FEA). Journal of veterinary medicine. A Physiology, Pathology, Clinical medicine, 47 (2): 73-82.
- Hirschberg R, Budras K. 2012. Blutgefäßversorgung. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. Der Huf. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 103-108.
- Hofmann R. 2006. Hämmer sausten, Funken stoben. Kölner Stadtanzeiger 2006.
<https://www.ksta.de/haemmer-sausten-funken-stoben-13112462>. (Zugriff 20.10.2020).
- Holfort L. 2021. Haben Sie jemals über den 3D- Druck flexibler Teile nachgedacht? Layerbylayer.
<https://www.layerbylayer.de/de/3d-druck-wissen/tutorials/tpu-3d-druck-ein-leitfaden-fuer-den-3d-druck-von-flexiblen-teilen.html>. (Zugriff 24.01.2021).
- Hüppler M, Häfner F, Geiger S, Mäder D, Hagen J. 2016. Modifying the Surface of Horseshoes: Effect of Eggbar, Heartbar, Open Toe, and Wide Toe on the Phalangeal Alignment, Pressure Distribution, and the Footing Pattern. Journal of Equine Veterinary Science, 37: 86-97.
- Imhof U. 2010. Die Geschichte des Hufbeschlags. Schweizer Archiv für Tierheilkunde, 152 (1): 21-29.
- Joss R, Baschnagel F, Ohlerth S, Piskoty G, Fürst A, Bischofsberger AS. 2019. The risk of a shod and unshod Horse Kick to Create Orbital Fractures in Equine Cadaveric Skulls. Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology, 32: 282-288.
- Kauffmann S. 2017. Useful anatomical terms. In: Kauffmann S, Cline C. The essential hoofbook: the complete modern guide to horse feet- anatomy, care and health, disease diagnosis and treatment. North Pomfret, Vermont: Trafalgar Square Books, 25.
- Kidd JA, Barr ARS. 2002. Flexural deformities in foals. Equine Veterinary Education, 14 (6): 311-321.
- Knubben JM, Gyax L, Stauffacher M. 2008. Horses in Switzerland: results of a representative survey of population, housing and use in 2004. Schweizer Archiv für Tierheilkunde, 150 (8): 387-397.
- Liebich HG, Maier, J, König H. 2005. Vorder- oder Schultergliedmaßen (Membra thoracica). In: König H, Liebich HG, Hrsg. Anatomie der Haussäugetiere. Dritte Aufl. Stuttgart: Schattauer, 141-210.

- Lingens I, Al Aiyan A, Budras KD. 2011. Die Entwicklung der Hufpflege und des Hufbeschlages von der Antike bis in die Neuzeit. *Pferdeheilkunde*, 27 (5): 514-521.
- Lochner FK, Milne DW, Mills EJ, Groom JJ. 1980. In vivo and in vitro measurement of tendon strain in the horse. *American Journal of Veterinary Research*, 41 (12): 1929-1937.
- Lütkemeyer M. 2020. 3D- Druck mit TPU: Eigenschaften, Tipps und beste Einstellungen. The 3D Printerbee. <https://the3dprinterbee.com/de/3d-druck-mit-tpu-eigenschaften-tipps-beste-einstellungen>. (Zugriff 22.01.2021).
- Lukas U. 2012. Der Fohlenhuf und Fehlstellungen. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. *Der Huf*. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 152- 159.
- Malone S, Davies H. 2019. Changes in Hoof Shape During a Seven- Week Period When Horses Were Shod Versus Barefoot. *Animals*, 9 (12): 2-13.
- McIlwraith C. 1987. Diseases and problems of tendons, ligaments and tendon sheaths. In: Adams OR, Stashak TS. *Adam's Lahmheit bei Pferden*. Vierte Aufl. Hannover: Schaper, 447-481.
- Moleman M, van Heel C, van Weeren P, Back W. 2006. Hoof growth between two shoeing sessions leads to a substantial increase of the moment about the distal, but not proximal, interphalangeal joint. *Equine Veterinary Journal*, 38 (2): 170-174.
- O'Grady S, Poupard D. 2003. Proper physiologic horseshoeing. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice*, 19 (2): 333-351.
- Olds College. 2019. <https://www.oldscollege.ca/about/news/2019/farrier-students-dominate-alberta-farrier-championships/index.html>. (Zugriff 20.10.2020).
- Pardoe C, Wilson A. 1999. In vitro mechanical properties of different equine hoof wall crack fixation techniques. *Equine Veterinary Journal*, 31 (6): 506-509.
- Parks A. 2012. Therapeutic Farriery - One Veterinarian's Perspective. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice*, 28 (2): 333-350.
- Peham C, Girtler D, Kicker C, Licka T. 2006. Raising heels of hind hooves changes the equine coffin, fetlock and hock joint angle: a kinematic evaluation on the treadmill at walk and trot. *Equine Veterinary Journal*, 38 (36): 427-430.
- Pfeifer G. 2018. Software Shoemaker®. The new Century.2020. <https://www.the-new-century.com/the-new-century>. (Zugriff 20.10.2020).
- Rau B. 2012. Werkstoffe. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. *Der Huf*. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 13- 29.
- Roepstorff L, Johnston C, Drevemo S. 2001. In vivo and in vitro heelexpansion in relation to shoeing and frog pressure. *Equine Veterinary Journal*, 33: 54-57.
- Salomon F. 2008. Bewegungsapparat. In: Salomon FV, Geyer H, Gille U, Hrsg. *Anatomie für die Tiermedizin*. Zweite Aufl. Stuttgart: Enke, 65.

- Scherer M, Bronkhorst, G, de Zwaan J, Back W. 2012. Huf- und Gleitschutz. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. Der Huf. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 30-58.
- Schieder K, Kneissl S. 2013. Extremitäten. In: Schieder K, Kneissl S. Lagerungsfibel für röntgenologische Untersuchungen am stehenden Pferd. Wien: Vetmeduni Vienna, 36-47.
- Sleutjens J, Serra Braganca FM, van Eempelen MW, Ten Have RE, de Zwaan J, Roelfsema E, Oosterlinck M, Back W. 2018. Mouldable, thermoplastic, glue-on frog- supportive shoes change hoof kinetics in normal and obese Shetland ponies. Equine Veterinary Journal, 50 (5): 684-689.
- Sprick M, Fürst A, Baschnagel F, Michel S, Piskoty G, Hartnack S, Jackson M. 2017. The influence of aluminium, steel and polyurethane shoeing systems and of the unshod hoof on the injury risk of a horse kick. An ex vivo experimental study. Veterinary and comparative orthopaedics and traumatology, 30 (5): 339-345.
- Stashak TS. 1989. Hufeisen und Hufnägel. In: Adams OR, Stashak TS. Adam's Lahmheit bei Pferden. Vierte Aufl. Hannover: Schaper, 793.
- Stashak TS, Hill C, Klimesh R, Ovnicek G. 2002. Trimming and shoeing for balance and soundness. In: Adams OR, Stashak TS. Adam's Lameness in Horses. Fünfte Aufl. Baltimore: Lippincott Williams and Wilkins, 1081-1144.
- Stephens P, Nunamaker D, Butterweck D. 1989 Application of a Hall-effect transducer for measurement of tendon strains in horses. American Journal of Veterinary Research, 50 (7): 1089-1095.
- Stöven K, Jacobs F, Schnug E. 2015. Mikroplastik: Ein selbstverschuldetes Umweltproblem im Plastikzeitalter. Journal für Kulturpflanzen, 67 (7): 241-250.
- Strohm A. 2020. <https://www.strohm.de/de/shop/NBS-Stahl,162/NBS-Centre-Fit-Hufeisen,814.html>. (Zugriff 20.10.2020).
- The Horseshoe Barn. 2020. Von <https://www.thehorseshoebarn.com/shop/aluminum-shoes/specialty-shoes/grand-circuit/denoix-reverse>. (Zugriff 20.10.2020).
- Thum M. 2013 3d- grenzenlos <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-objekte/titan-hufeisen-aus-3d-drucker-274263>. (Zugriff 20.10.2020).
- Von Übel M. 2020. All3DP. <https://all3dp.com/de/1/3d-drucker-material-3d-druck-materialen>. (Zugriff 05.02.2021).
- von Zadow C. 2011. Praxis der Hufuntersuchung. In: Pees M, Aschenbach JR, Gäbel G, Truyen U, Hrsg. 6. Leipziger Tierärztekongress- Tagungsband 2. Leipzig: Messedruck Leipzig, 319-321.
- von Zadow C. 2012a. Röntgenanatomie. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. Der Huf. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 112-114.
- von Zadow C. 2012b. Hufformen. In: Litzke LF, Rau B, Hrsg. Der Huf. Sechste Aufl. Stuttgart: Enke, 114-119.

- Wäfler P. 2020. Wäfler Hufbeschlag. <http://web482.login-7.hoststar.ch/spezialbeschlag.php>. (Zugriff 5.2.2021)
- Wild J. 2020. Einführung in den 3D- Druck. In: Wild W, Hrsg. 3D- Druck Schritt für Schritt: Der Praxisguide für Einsteiger und Anwender. Berlin: XinXii E-book Verlag, 4-10.
- Willemen M, Savelberg H, Barneveld A. 1999. The effect of orthopaedic shoeing on the force exerted by the deep digital flexor tendon on the navicular bone in horses. *Equine Veterinary Journal*, 31 (1): 25-30.
- Yoshihara E, Takahasi T, Otsuka N, Isayama T, Tomiyama T, Hiraga A, Wada S. 2010. Heel movement in horses: comparison between glued and nailed horse shoes at different speeds. *Equine Veterinary Journal*, 42 (38): 431-435.

9 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Schritt 1: Huf in Länge und Breite ausmessen (Pfeifer 2018).....	31
Abbildung 2: Schritt 2: Pferd, Besitzer und Beschlagsart wählen (Pfeifer 2018).....	32
Abbildung 3: Schritt 3: Foto hochladen und Länge und Breite eingeben (Pfeifer 2018).....	32
Abbildung 4: Schritt 4: Schablone auf den Huf legen, sodass die Schablone an den Messpunkten anliegt (Pfeifer 2018)	32
Abbildung 5: Schritt 5: Hufumrandung festlegen und Schritt 6: Beschlag individuell anpassen (Pfeifer 2018)	33
Abbildung 6: Schritt 7: falls benötigt, Keil einfügen (Pfeifer 2018)	33
Abbildung 7: Schritt 8: falls benötigt Strahlunterstützung anfügen (Pfeifer 2018).....	33
Abbildung 8: Schritt 9: falls benötigt, Extensionen anfügen (Pfeifer 2018)	34
Abbildung 9: Schritt 10: Nagellöcher, Spikelöcher und Stollenlöcher nach Bedarf einfügen (Pfeifer 2018)	34
Abbildung 10: Messungen mit einer Schublehre von Länge, Breite, und Spezialanforderung (Keil) eines mit dem Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) hergestellten Beschlags.....	34
Abbildung 11: eigenes Foto des oben beschriebenen Pantoffeleisens als Vorlage für die ersten vier Testbeschläge	37
Abbildung 12: eigene Fotos eines Standardbeschlags für die Vorderhufe zum Vergleich des gedruckten Beschlags mit der Vorlage. Links: der gedruckte Beschlag auf der Vorlage aufliegend, um zu zeigen, dass die Außenkontur deckungsgleich ist. Rechts: beide Beschläge im direkten Vergleich der Form und der Nagellochzahl	38
Abbildung 13: Links ein NBS Beschlag als Beispiel. Abb. Aus Scherer et al. (2012). In der Mitte die 3 D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) und rechts das gedruckte Resultat.....	39
Abbildung 14: 3D gedruckter Beschlag zur Entlastung der TBS; oben Mitte und rechts: 3D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland); Unten rechts: Höhenvergleich mit Maßstab zur Darstellung der Trachtenerhöhung um 6 mm.....	39
Abbildung 15: links der Denoixbeschlag aus Aluminium als Beispiel (The Horseshoe Barn 2020). In der Mitte die 3D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) von der Konstruktion und rechts eigenes Foto des gedruckten Denoixbeschlags.....	40
Abbildung 16: Herzeisen von der Wand mit den ausgestellten Hufeisen.....	41
Abbildung 17: Podotrochlosebeschlag. Links: 3D- Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) am Hufmodell, man sieht den zurückgesetzten Schuss. Mitte: der gedruckte Podotrochlosebeschlag. Rechts: Der Beschlag ist an der Trachte 5 mm höher als der Vergleichsbeschlag ohne Keil.	41

- Abbildung 18:** Links: 3D Ansicht des Beschlags für Hufrehe im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland). Rechts: der gedruckte Beschlag42
- Abbildung 19:** Links Foto eines Hufes mit einer lateromedialen Imbalance. Abb. aus Kauffmann S. (2017) Rechts eine dorsopalmare Röntgenaufnahme einer linken Vorderextremität mit einer lateromedialen Imbalance (Röntgenbild der Universitätsklinik für Pferde).....43
- Abbildung 20:** Links die 3D Ansicht des konstruierten Beschlags im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) für die lateromediale Imbalance. Daneben der gedruckte Beschlag, rechts von der Seite im 3D Modell im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) und am gedruckten Beschlag. Mit dem orangen Pfeil jeweils der Höhepunkt des 2 mm Keils markiert44
- Abbildung 21:** Hinterhufeisen als Vorlage für drei Testbeschläge.45
- Abbildung 22:** Standardbeschlag Hinterhufe. Links: 3D Modell des Beschlags im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland). Mitte: gedruckter Beschlag. Rechts: Unterschied in der Dicke aufgrund eines frühzeitigen Druckabbruches.45
- Abbildung 23:** Spatbeschlag. Links: Die 3D Ansicht des Beschlags im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland), daneben das gedruckte Resultat. Rechts oben: Seitenansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland), darunter Seitenansicht des gedruckten Beschlags im Vergleich der Schenkelhöhen im Trachtenbereich mit einem Beschlag ohne Erhöhung.46
- Abbildung 24:** Links: Beispiel eines Beschlags nach Nyffenegger (Wäfler 2020) Mitte: 3D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland). Rechts: der gedruckte Nyffeneggerbeschlag47
- Abbildung 25:** Pferd 1. Von links nach rechts: die 3D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland), der gedruckte Beschlag am Huf von der Sohlenfläche, von lateral und von vorne.48
- Abbildung 26:** Pferd 2. Von links nach rechts: die 3D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland), Huf mit Beschlag von der Sohlenfläche und beide Vorderhufe von vorne...48
- Abbildung 27:** links der linke Vorderhuf mit gedrucktem Beschlag von der Seite. Rechts der rechte Vorderhuf mit gedrucktem Beschlag von der Seite.....49
- Abbildung 28:** von links nach rechts: die 3 D Ansicht des Beschlags des dritten Pferdes im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland), der Beschlag am Huf vorne links, die Ansicht der Sohlenfläche, von lateral und von vorne49
- Abbildung 29:** Rehebeschlag für den linken Vorderhuf in der 3D Ansicht im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) links, daneben von links nach rechts die Ansicht der Sohlenfläche, von lateral und von schräg vorne.....50
- Abbildung 30:** Beschlag für den rechten Vorderhuf. Von links nach rechts: die 3D Ansicht des Beschlags im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) mit der Platte und den aufgesetzten Keilen. Der Beschlag von der Bodenfläche und der Huffläche.

Man erkennt die lockere Struktur. Ganz rechts ist der Beschlag von der Seite fotografiert, die Keile ermöglichen ein Schweben der Hufspitze mit vollständig geschützter Sohlenfläche.....51

Abbildung 31: Der genagelte Beschlag des linken Vorderhufs. Links die Bodenfläche dargestellt und rechts den Beschlag von der Seite. Der rechte Vorderhuf wurde identisch beschlagen51

Abbildung 32: Links die 3D Ansicht des Rehebeschlags für den rechten Vorderhuf im Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland), rechts daneben der provisorisch mit Klebeband geklebte Beschlag am rechten Vorderhuf mit dem Serom unter der Hufbeinspitze.....52

Tabelle 1: Maße der 22 mit dem Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) gedruckten Beschläge in Breite und Länge (mm) und jeweils die Abweichungen (mm) zur Bestimmung der Passgenauigkeit, sowie eine Quantifizierung der Anforderungen an die Spezialitäten der orthopädischen Beschläge.....53

Abb. 33: In diesem Diagramm sind auf der x- Achse die Anzahl der Beschläge, auf der y-Achse die Abweichungen in mm dargestellt. Insgesamt wurde bei 22, mit dem Shoemakerprogramm (The New Century horseshoes & fittings ltd.®, Dublin, Ireland) gedruckten, Beschlägen Länge und Breite bestimmt und mit dem jeweiligen Plan verglichen.....56

Abb. 34: Wilcoxon-Test um Abweichungen in Länge, Breite und Spezialanforderungen auf Signifikanz zu testen. Bei der Breite und der Länge sind die Abweichungen signifikant ($p=0,009$ und $p=0,003$), bei den Spezialanforderungen ($p=1,0$ und $p=0,18$) nicht57

