

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
„Master of Science in Engineering“
im Studiengang Sports Technology

Bestimmung der Vibrationen von Pferdehu- fen unter Belastung mit Hufeisen, Hufschu- hen, Klebebeschlägen und ohne Beschlag durch einen Prüfstand

Ausgeführt von: Fabienne Alisa Sobeck, BSc

Personenkennzeichen: 51831378

Begutachter: Christoph Mohl, MSc

Zweiter Begutachter: Christian Peham, Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing.
Dr.techn.

Wien, den 16. Januar 2023

Eidesstattliche Erklärung

„Ich, als Autor / als Autorin und Urheber / Urheberin der vorliegenden Arbeit, bestätige mit meiner Unterschrift die Kenntnisnahme der einschlägigen urheber- und hochschulrechtlichen Bestimmungen (vgl. Urheberrechtsgesetz idgF sowie Satzungsteil Studienrechtliche Bestimmungen / Prüfungsordnung der FH Technikum Wien idgF).

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und Gedankengut jeglicher Art aus fremden sowie selbst verfassten Quellen zur Gänze zitiert habe. Ich bin mir bei Nachweis fehlender Eigen- und Selbstständigkeit sowie dem Nachweis eines Vorsatzes zur Erschleichung einer positiven Beurteilung dieser Arbeit der Konsequenzen bewusst, die von der Studiengangsleitung ausgesprochen werden können (vgl. Satzungsteil Studienrechtliche Bestimmungen / Prüfungsordnung der FH Technikum Wien idgF).

Weiters bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit bis dato nicht veröffentlicht und weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt habe. Ich versichere, dass die abgegebene Version jener im Uploadtool entspricht.“

Wien, 16. Januar 2023

Unterschrift

Kurzfassung

Die intensive Nutzung des Pferdes durch den Menschen hat die Anforderungen an das komplizierte Zehenorgan, den Huf, über die Jahre hinweg stark verändert, unter anderem durch Stallhaltung und erhöhte Belastungen z. B. als Kutschpferd oder im Sport. Aufgrund dessen werden die Hufe vieler Pferde durch Hufeisen, Klebebeschläge oder Hufschuhe geschützt. Es gibt jedoch kaum wissenschaftliche Grundlagen im Hinblick auf den Vergleich der verschiedenen Beschlagsmethoden. Dementsprechend ist die Forschungsfrage aufgekomen, ob die Absorptionseigenschaften von Eisenbeschlag, Klebebeschlag und Hufschuhen aufgrund von Schwingungen an der Hufwand mit einem Pendelschlagversuch verglichen werden können.

Das Ziel dieser Arbeit war also die Entwicklung eines Testverfahrens, um die Absorptionseigenschaften und die Auswirkungen von Hufschuhen und -beschlägen auf die Beschleunigungen in der Hufwand, vergleichen zu können.

Hierzu wurde ein Prüfstand entwickelt, der mittels Schlagversuch einen Pferdehuf zum Schwingen gebracht hat. Dazu wurde eine definierte Masse auf die Hufsohle fallen gelassen. Es wurden bei verschiedenen Hufen, welche mit Hufschuhen, Hufeisen oder einem Klebebeschlag präpariert waren, die Vibrationen mittels Beschleunigungssensor ADXL-001-250 an der Zehenwand des Hufes gemessen. Die Messdaten wurden mit MatLab ausgewertet und gegenübergestellt.

Es konnte gezeigt werden, dass die auftretenden Beschleunigungen bei Hufschuhen und Klebebeschlägen sehr viel geringer sind als bei Hufeisen. Die Hufschuhe zeigen dabei die besten Absorptionseigenschaften. Die Ergebnisse der Klebebeschläge sind ähnlich wie die der Barhuf Messungen.

Schlagworte: Pferdehufe, Vibrationen, Hufeisen, Hufschuhe, Klebebeschlag, Prüfstand

Abstract

The intensive use of the horse by humans has greatly changed the demands on the complicated toe organ, the hoof, over the years, including stabling and increased loads, e.g. as a carriage horse or in sports. Because of this, the hooves of many horses are protected by horseshoes, adhesive shoes or hoof shoes. However, there is hardly any scientific basis with regard to the comparison of the different shoeing methods. Accordingly, the research question has arisen whether the absorption characteristics of iron shoeing, adhesive shoeing and hoof shoes due to vibrations at the hoof wall can be compared with a pendulum impact test. Thus, the objective of this work was to develop a test method to compare the absorption characteristics and the effects of shoeing and shoeing on the accelerations in the hoof wall.

For this purpose, a test rig was developed which made a horse hoof vibrate by means of an impact test. For this purpose, a defined mass was dropped onto the sole of the hoof. The vibrations of various hooves, which were prepared with hoof shoes, horseshoes or an adhesive shoe, were measured on the toe wall of the hoof using an ADXL-001-250 acceleration sensor. The measurement data were analyzed and compared using MatLab.

It could be shown that the accelerations occurring with hoof shoes and adhesive shoes are much lower than with horseshoes. The hoof shoes show the best absorption properties. The results of the adhesive shoes are similar to those of the bare hoof measurements.

Keywords: Horse hooves, vibrations, iron shoeing, hoof shoes, adhesive shoeing, test stand

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Domestikation Pferd	3
2.2	Anatomie Pferdehuf	4
2.2.1	Äußere Strukturen	4
2.2.2	Innere Strukturen	6
2.2.3	Hufmechanismus	10
2.2.4	Gangbild des Pferdebeins	11
2.3	Beanspruchungsveränderung über die Jahre	12
2.4	Geschichte Hufschutz	13
2.4.1	Barhuf	14
2.4.2	Hufeisen	14
2.4.3	Klebebeschlag	15
2.4.4	Hufschuh	16
2.5	Häufige Erkrankungen	17
2.5.1	Lahmheiten	17
2.5.2	Hufrehe	19
2.5.3	Arthrose	19
2.6	Technische Grundlagen	20
2.6.1	Schwingungsanalyse	20
2.6.2	Funktionsweise Beschleunigungssensor	21
3	Stand der Technik	23
3.1	Vibrationen im Körper	23
3.2	Vibrationen im Huf	25
3.3	Vergleich von frischem und gefrorenem Gewebe eines Pferdehufes	27
3.4	Untersuchung der Dämpfungseigenschaften von Synthetischen Beschlägen	28
4	Problemstellung	30
4.1	Zielsetzung	30
4.2	Forschungsfrage und Hypothese	30

5 Methoden	32
5.1 Aufbau	32
5.1.1 Pendel	32
5.1.2 Messvorrichtung	33
5.2 Einstellungen des Oszilloskops	34
5.3 Probemessungen	35
5.4 Hauptmessungen	36
5.5 Berechnung des Pendels	38
5.6 Datenauswertung	41
5.7 Statistische Auswertung	44
6 Ergebnisse	45
6.1 Probemessungen	45
6.2 Hauptmessungen	49
6.3 Statistische Ergebnisse	55
7 Diskussion	57
7.1 Probemessungen	57
7.2 Hauptmessungen	59
7.3 Statistische Auswertung	61
8 Fazit	62
8.1 Ausblick	64
8.2 Herausforderungen	64
Literatur	66
Abbildungsverzeichnis	69
Tabellenverzeichnis	71
Abkürzungsverzeichnis	72
A Anhang A	73

1 Einleitung

Als der Mensch das erste Mal mit den Vorgängern des modernen Pferds in Kontakt kam ging es dabei ausschließlich um die Nahrungsaufnahme. Erst später wurden die ersten Tiere gezähmt und als Nutztiere gesehen. Pferde wie wir sie heute kennen sind die einzigen Lebewesen im Tierreich, die nur einen einzigen Zeh haben – das komplexe Zehenorgan den Huf. Es hat sich erst vor etwa fünf Millionen Jahren entwickelt, als die seitlichen Zehen schrumpften, bevor sie ganz verschwanden. Dies geschah in der Entwicklung des Pferdes zu einem schnelleren Tier mit größeren Beinen, welches sich weiter fortbewegen konnte. Durch die Evolution des Pferdes ist der Bewegungsapparat des heutigen Sportpferdes so ausgereift, dass es in den verschiedensten Bereichen zu Höchstleistung fähig ist. Jedoch wird er oft bis an seine physiologischen Grenzen belastet. Unabhängig von der Disziplin werden Muskeln, Sehnen, Fasern, Knochen und Gelenke übermäßig beansprucht, belastet und verdreht. Dies kann das Risiko von Gelenkschäden und Arthrose erhöhen [1].

Das beschränkt sich jedoch nicht nur auf den Hochleistungssport, viele Freizeitpferde leiden ebenfalls unter Gelenksbeschwerden. Da beispielsweise auch das Gehen auf befestigten Wegen wie der Straße zwar gut für die Stimulierung und Härtung der Knochen ist, aber auch zu einer übermäßigen Beanspruchung und Schäden in den Strukturen der Gliedmaßen der Pferde führen kann. Besonders der Aufprall gilt als der kritischste Teil der Standphase für die Entwicklung chronischer Gelenksbeschwerden wie Arthrose in den distalen Gliedmaßen des Pferdes. Es wird angenommen, dass moderne synthetische Beschlagsmaterialien den Aufprall modifizieren und daher häufig zur Behandlung und/oder Vorbeugung von Lahmheiten aufgrund chronischer Gelenkerkrankungen eingesetzt werden. Es gibt jedoch kaum wissenschaftliche Beweise dafür [2].

Das Ziel dieses Projekts war die Entwicklung eines Testverfahrens, um die Absorptionseigenschaften des Pferdehufes mit Hufeisen, Barhuf, mit Hufschuhen und mit Klebebeschlägen vergleichen zu können.

Eine vorangegangene Studie hat bereits Sensoren in die Beine der Pferde einoperiert, was zur heutigen Zeit aufgrund des Tierschutzes nicht mehr erlaubt ist, um die Beschleunigungen der unteren Gliedmaßen eines Pferdes zu ermitteln [3]. In der Studie von Willem Back [2] dagegen wurden die Beschleunigungen an der Hufwand gemessen während das Pferd über einen asphaltierten Boden trabte. Es ging dabei um den Vergleich der Beschleunigungen bei Pferden mit einem Eisenbeschlag und Pferden mit einem Kunststoffbeschlag. Da es jedoch sehr schwierig ist vergleichbare Versuche mit unterschiedlichen Pferden zu messen, wurde beschlossen die Messungen am toten Huf durchzuführen. Durch die Zusammenarbeit mit der veterinärmedizi-

nischen Universität Wien bestand die Möglichkeit an schlachtfresh eingefrorene Pferdehufe für die Messungen zu gelangen.

Es gab bereits mehrere Studien, welche mithilfe von Beschleunigungssensoren die Schwingungen am Huf, im Huf und im Gelenk bestimmt haben. Durch deren Ergebnisse wurde klar, dass Schwingungen, welche im Huf auftreten nur in abgeschwächter Form an die Gelenke weitergegeben werden [3]. Dementsprechend wurden die Vibrationen direkt an der Hufwand erfasst. Für die Erfassung der Beschleunigungen wurde der einachsige Beschleunigungssensor ADXL001-250 gewählt, da die aufgezeichneten Beschleunigungen eines dreiachsigen Sensors keine Aussagekraft über die Beschleunigungen eines Pferdehufes unter normalen Belastungen hat.

Durch ein Pendel, welches in einer Ebene frei schwingen und so die kinetische Höhenenergie auf den Huf übertragen kann, wurde der Huf in Schwingung gebracht. Durch das Definieren des Gewichts und der Fallhöhe konnten die Messungen reproduzierbar gemacht werden und die Ergebnisse der Messungen und auch zukünftiger Messungen können verglichen werden.

2 Grundlagen

Um sowohl die Hintergründe als auch die Ergebnisse der Studie nachvollziehen zu können sind ein paar grundsätzliche Informationen wichtig, welche in diesem Kapitel zusammengefasst sind.

2.1 Domestikation Pferd

Die Entwicklung der Pferdefüße zu Hufen begann vor Millionen von Jahren, als das Pferd sich vom Leben in den geschützten Wäldern auf das offene Grasland umstellte. Im Vergleich zum heutigen, bekannten Pferd, war das Urpferd anders proportioniert und somit nicht geeignet für die mittlerweile gängigen Einsatzmöglichkeiten von Pferden. Es hatte die Größe eines Hundes mit kurzen Beinen, drei Zehen an den Vorderfüßen, vier an den Hinterfüßen und es bewegte sich nur sehr langsam voran.

Die neue, exponierte Umgebung auf dem offenen Grasland zwang das Urpferd dazu, längere Beine zu entwickeln und größer zu werden, um vor Fressfeinden fliehen zu können.

Mit der Zeit entwickelten sich auch die Zehen des Urpferds zu einer einzelnen Zehe, wodurch sich die innere Geometrie der Knochen veränderte, sodass spätere größere Pferdearten sich schlussendlich auf einer Zehe fortbewegen konnten.

Im Zuge einer Studie modellierten Harvard-Wissenschaftler die Hufe 12 ausgestorbener Pferdearten. Es war möglich anhand der 3D-Modelle der Fossilien auf die Hintergründe der Entwicklung der Pferdehufe schließen zu können. Mithilfe der Simulation wurde der Druck auf die Beine bei Trabgeschwindigkeit sowie Galoppgeschwindigkeit und dem Springen errechnet.

Die Ergebnisse zeigten, dass bei vielen frühen Pferdearten die seitlichen Zehen eine entscheidende Rolle spielten, da sie einen Teil des Gewichts des Tieres tragen konnten, um Knochenbrüche zu vermeiden. Sie stützten auch die Hypothese, dass die zunehmende Masse der Tiere ein potenzieller Auslöser für die Reduktion der Zehen war. Eine einzelne, robuste Zehe konnte den erhöhten Biegekräften besser standhalten als drei kleinere Zehen mit der gleichen Gesamtknochenmasse. Bei späteren Pferden war deshalb der Knochen im lasttragenden Zeh weiter von der Mitte des Querschnitts entfernt.

Als das Gewicht zunahm und die seitlichen Zehen durch ausbleibende Belastung schrumpften, wurde das durch das mittlere Glied kompensiert. Das Pferd konnte auf einer Zehe stehen. Mit zunehmender Masse des Pferdes verbrauchten aber die zusätzlichen Zehen zu viel Energie, da sie zu weit von der tatsächlichen Bewegung - am Pferdebein - entfernt waren. Dies verlangsamte das Tier und verringerte ebenfalls die Anzahl der Schritte, die es pro Minute machen

konnte. Die Zehen verkümmerten also gänzlich und im selben Zug nahm die Gesamtmenge an Knochen in den Pferdehufen zu, wodurch die uns heute so bekannten Füße entstanden [4].

Ein einzelner Huf trägt das Gewicht eines Pferdes besser und ermöglicht es ihm, seine Beine effizienter zu schwingen und mit viel höherer Geschwindigkeit zu galoppieren, wie die Forscher der Harvard University anhand von 12 Fossilien herausfanden.

Mitautor Professor Andrew Biewener sagte in einem Artikel: "Wenn die fossilen Pferde, die wir untersuchten, nicht die einstelligen modernen Pferde hervorgebracht hätten, die wir heute kennen, und wenn sie drei oder vier Zehen behalten hätten, hätten wir keine Pferde, die so groß und flink sind, und auch keine Tiere, die wir in irgendeinem sportlichen Wettkampf einsetzen könnten." [5]

Auch die Hauptautorin Brianna McHorse sagte: "Pferde können sehr leistungsfähig sein - sie können mit hoher Geschwindigkeit laufen, springen und sehr schnell zur Seite ausweichen, und wenn sie richtig trainiert sind, können sie 100 Meilen an einem Tag zurücklegen. Und viele Menschen wissen nicht, dass sie das alles auf einer Zehe tun."

Die Domestikation der Hufe bringt dementsprechend viele Vorteile für das Pferd und hat es so zu dem Tier gemacht, welches als Springpferd, Rennpferd oder vor eine Kutsche gespannt immer wieder zu Höchstleistungen fähig ist [5].

2.2 Anatomie Pferdehuf

Der Huf des Pferdes ist ein Wunderwerk der Technik. Er enthält eine ganze Reihe von harten und weichen Strukturen, die, wenn sie gesund sind, im Gleichgewicht zueinanderstehen. Sie bilden eine Hufkapsel, die in der Lage ist enormen Kräften standzuhalten, ohne nennenswerte Schäden oder Verformungen davonzutragen und die aufgenommene Energie zur Unterstützung der Vorwärtsbewegung zu nutzen [6].

2.2.1 Äußere Strukturen

Die äußeren Strukturen eines Pferdehufs sind jene, welche mit bloßem Auge von außen sichtbar sind. Ihre Hauptfunktion ist dabei der Schutz der inneren Strukturen vor Belastungen und Bakterien.

Hufwand

Die Hufwand bedeckt den Großteil des Hufes und ist der Teil des Hufs, der immer sichtbar ist. Sie bedeckt die Vorderseite, die Seiten des dritten Phalanx (Zehenglied) bzw. des Hufbeins und endet im Tragrand. Die Wand hat drei Bereiche: die Zehenwand, die Seitenwand und die Trachtenwand welche in der Abbildung 1 zu sehen sind. Sie reichen jeweils vom Kronrand des

Hufes (rote Linie) bis zum Tragrand (blaue Linie).

Die Hufwand besteht aus einem hornartigen Material, welches aus dem Eiweißprotein Keratin aufgebaut ist. Durch ihren niedrigen Feuchtigkeitsgehalt ist sie sehr hart und ihre Hauptaufgabe ist der Schutz der inneren Strukturen des Pferdehufes. Dabei kann sie enorme Kräfte aufnehmen, ohne bleibende Schäden davonzutragen. Die energieabsorbierenden und stoßfesten Eigenschaften der Hufwand stehen in Zusammenhang mit ihrem Material und ihrem strukturellen Aufbau [6].

Neue Hufwandschichten werden kontinuierlich knapp unterhalb des Kronrandes an der Schnittstelle zwischen Haut und Hufwand gebildet, weshalb diese regelmäßig geschnitten werden muss falls sie sich nicht von selbst abnutzt. Die Hufwand kann jedoch keine starke Abnutzung verkraften, die meisten Hufe werden deshalb mittlerweile durch Hufeisen geschützt [3]. Normalerweise wächst die Hufwand mit einer Geschwindigkeit von etwa drei Achtel Zoll pro Monat. Sie muss, wenn sie sich nicht von selbst abnutzt, alle 6 – 8 Wochen geschnitten werden.

Die Hufwand selbst enthält keine Blutgefäße oder Nerven. Sie unterscheidet sich jedoch in ihrer Dicke zwischen den Vorder- und Hinterbeinen. Bei den Vorderbeinen ist die Zehenwand dicker als die Seiten- oder Trachtenwand, bei den Hinterbeinen ist sie überall gleichmäßig dick.

Zusätzlich ist die Hufwand mit einem Material bedeckt, welches die Verdunstung von Feuchtigkeit verhindert. Weißt das Material jedoch Mängel auf, so wird die Hufwand trocken, kann Risse bekommen oder sogar Abblättern [7].

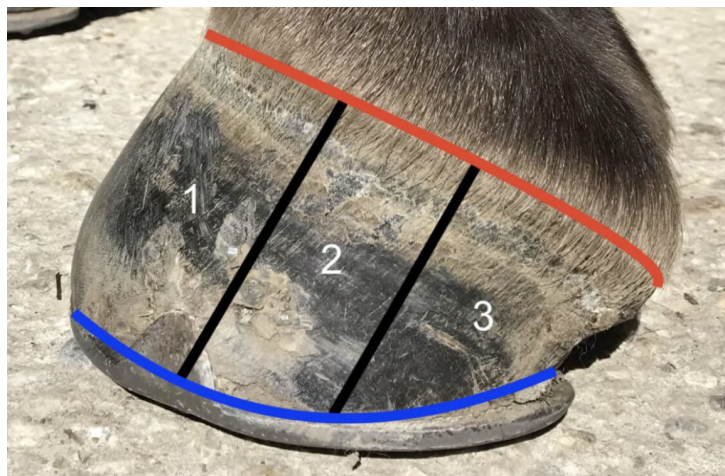


Abbildung 1: Die drei Bereiche der Hufwand; 1: Zehenwand, 2: Seitenwand, 3: Trachtenwand [8]

Sohle

Wenn der Fuß vom Boden abgehoben wird, sind die Sohle und der Strahl sichtbar, ebenso wie die Eckstreben der Hufwand, der Tragrand und die Strahlfurchen. Die Sohle befindet sich an der Unterseite des Hufes und hat ebenfalls einen niedrigen Feuchtigkeitsgehalt, weshalb sie sich hart anfühlt. Sie ist leicht konkav und hat normalerweise keinen Kontakt zum Boden. Sie schützt die inneren Strukturen des Hufes und unterstützt die Hufwand.

Strahl

Der Strahl hat eine gummiartige Konsistenz und eine V-förmige Struktur, wie in Abbildung 2 zu sehen. Durch die weiche Konsistenz werden Stöße bei der Bewegung des Pferdes auf das Fußsohlenpolster verteilt. Die Struktur ist durch die Furche innerhalb des V's unregelmäßig und hilft vor allem auf unebenen Böden einen guten Grip zu haben. Auf beiden Seiten des Strahls liegen die Strahlfurchen welche sich mit Dreck füllen wenn das Pferd in Bewegung ist und so den Grip zusätzlich erhöht. Die Tiefe der Furchen ist proportional zur Dicke der Sohle.

Ballen

Der hintere Bereich des Hufes wird Ballen genannt und besteht aus weichem Gewebe. Dieses weiche Gewebe umschließt das Ballenpolster (digital cushion).

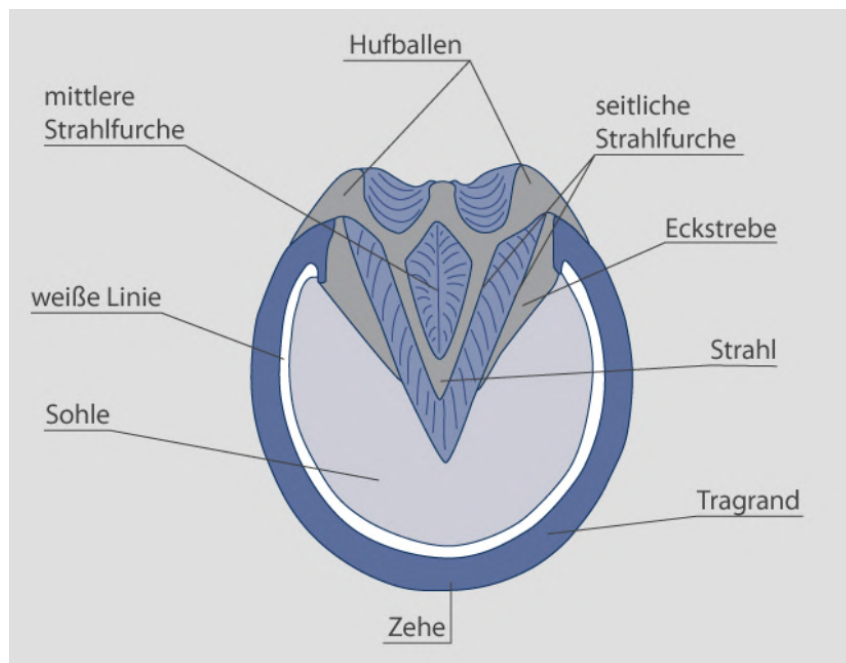


Abbildung 2: Hufsohle eines Pferdes [9]

2.2.2 Innere Strukturen

Das Innere des Hufes besteht aus verschiedenen Strukturen, welche in Abbildung 3 zu sehen sind. Im folgenden Abschnitt werden diese Strukturen und ihre Funktion im Pferdehuf genauer beschrieben.

Röhrbein und Karpalgelenk

Mit der Evolution hat sich das Pferd so verändert, dass es nur noch auf einer Zehe steht. Diese Zehe ist das Röhrbein, welches sich stark verlängert und verdickt hat. Es ist sehr stabil

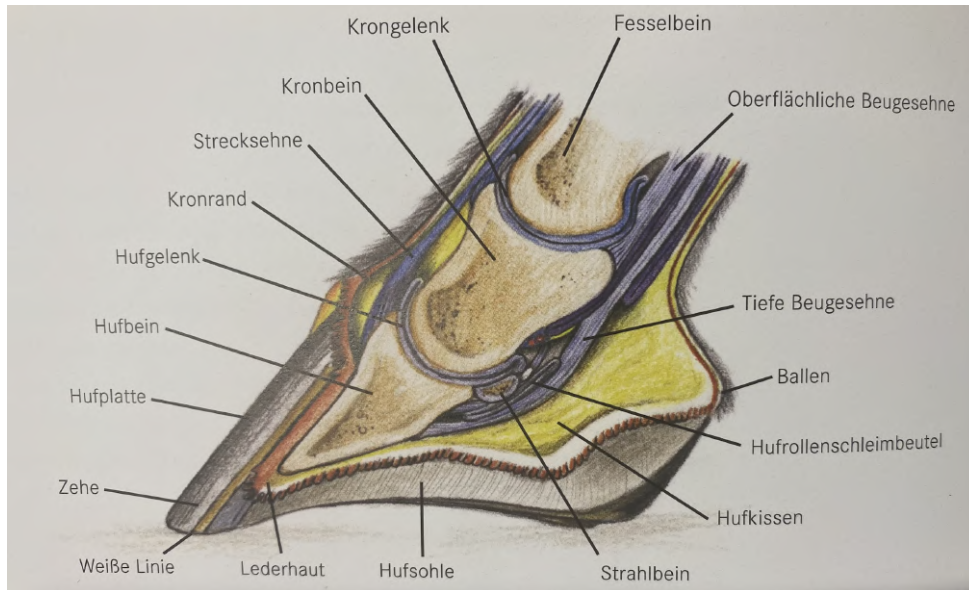


Abbildung 3: Innerer Aufbau eines Pferdehufs [10]

gebaut, da es viel Gewicht tragen muss. Die anderen Zehenknochen sind verkümmert und liegen seitlich am Röhrbein, wo sie eine Art Führungsschiene für die Beugesehnen bilden. Oberhalb des Röhrbeins befindet sich bei den Vorderbeinen das Karpalgelenk und bei den Hinterbeinen das Sprunggelenk. Das Karpalgelenk ist dabei ein zusammengesetztes Gelenk aus drei Gelenkreihen und mehreren kleinen Einzelgelenke [10].

Fesselgelenk

Das Fesselgelenk ist ein Scharniergelenk mit einem ausgeprägten Kamm, welcher Drehungen verhindert. Es verbindet das Röhrbein mit dem Fesselbein und hat die Funktion eines Stoßdämpfers, was bedeutet, dass sich der Fesselkopf Richtung Boden senkt, wenn das Pferd auftritt, wobei die Stoßenergie von der Beugesehne ausgenommen wird. Auf der Plantarseite des Gelenks befinden sich die Sesambeine. Sie werden von sieben Bändern gestützt und dienen als Umlenkrolle für die Beugesehne [10].

Fesselbein und Kronbein

Das Fessel- und Kronbein sind Teile des Fesselgelenks und durch das Krongelenk verbunden. Es sind beides kurze Knochen, wobei das Fesselbein den Bereich ausmacht, welcher allgemein als „Fessel“ bekannt ist. Das Kronbein, welches auch als Mittelphalanx bezeichnet wird, sitzt über dem Gelenk des Sprungbeins und unterhalb des Fesselbeins. Nur der untere Teil dieses Knochens reicht bis zur Hufkapsel. Die Knochen absorbieren Erschütterungen bei der Bewegung des Pferdes und haben abgerundete Enden, damit sich der Huf auf unebenem Boden von einer Seite zur anderen drehen kann [10].

Hufbein und Hufgelenk

Das Hufbein ist der unterste Knochen des Pferdebeins, ähnlich zu den Endgliedern der menschlichen Hand. Er ist hufförmig und über der Lederhaut schwebend in der Hufhornkapsel aufgehängt, was eine effektive Stoßdämpfung erlaubt. Er beeinflusst zudem die Bewegung des Pferdes und variiert in der Form zwischen Vorder- und Hinterhufen. In den Vorderhufen hat das Hufbein eine breite und runde Form, wogegen es in den Hinterhufen eine eher schmale und spitze Form hat. Durch das Hufgelenk, welches das Hufbein und das Kronbein verbindet, ist es dem Pferd möglich, bei Bewegungen ebenfalls über die Mitte des Hufes zu brechen. Es handelt sich um ein Sattelgelenk, welches Beugung, Streckung und leicht kippende Bewegungen zulässt. Obwohl selten, sind Verletzungen des Hufbeins sowohl ernst als auch gefährlich, da die Hufkapsel um diesen Knochen herum geformt ist [10].

Strahlbein

Zusammen mit dem Hufbein und dem Kronbein bildet das Strahlbein die Gelenksflächen des Hufes. Das Strahlbein ist ein kleiner Knochen, welcher plantar am Hufgelenk sitzt und eine Art Umlenkrolle für die tiefe Beugesehne darstellt. Zudem verhindert er auch eine Überbeweglichkeit des Hufgelenks. Das Strahlbein und der dazugehörige Schleimbeutel - ein mit Flüssigkeit gefüllter Sack, der die Reibung zwischen der Sehne und dem Knochen verringert - sind an der sogenannten Strahlbeinerkrankung beteiligt, die eine häufige Ursache für Lahmheit ist [10].

Ballenpolster

Das Ballenpolster, auch Hufkissen genannt, besteht aus flexiblem Material und wirkt dementsprechend als Dämpfung. Durch seine Flexibilität pumpt es Blut in den Huf, wenn das Pferd sich bewegt, um diesen zu versorgen [10].

Beugesehnen

Die Beugesehnen befinden sich auf der plantaren Seite der distalen Vordergliedmaße und umfassen die oberflächliche digitale Beugesehne und die tiefe Beugesehne, wie in Abbildung 4 zu sehen. Sie dienen der Beugung des Fesselgelenks und der Zehe, sowie der Speicherung und Abgabe elastischer Dehnungsenergie während der Fortbewegung. Sie gehen beide aus Muskelbäuchen hervor, wobei die oberflächliche Beugesehne aus dem Musculus digitalis superficialis ansetzt, der am medialen Epicondylus des Oberarmknochens entspringt. Die Sehne ist auf Höhe des Karpalgelenks, oberhalb des Röhrbeins, von außen spürbar. Proximal geht sie über in das schmale proximale Kontrollband, das am distalen medialen Rand des Radius entspringt.

Die oberflächliche Beugesehne verläuft weiter nach distal und umhüllt die tiefe Beugesehne auf Höhe des Fesselgelenks. In der Mitte des Fesselbeins spaltet es sich in zwei Äste auf, wo-

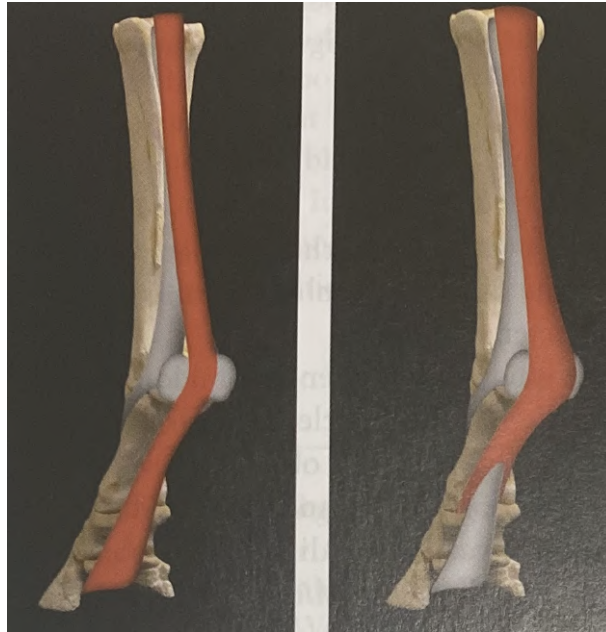


Abbildung 4: Beugesehnen der distalen Vordergliedmaße; Links: Tiefe Beugesehne, Rechts: Oberflächliche Beugesehne [11]

bei jeder der Äste sowohl am distalen Aspekt des Fesselbeins, als auch am proximalen Aspekt des Mittelglieds ansetzt. Die tiefe Beugesehne entspringt aus den drei Muskelbäuchen des tiefen digitalen Beugemuskels.

Die gemeinsame Sehne verläuft distal entlang der dorsalen Seite der oberflächlichen Beugesehne und endet an ihrem Ansatz an der Beugeseite des Hufbeins. In der Mitte des Röhrlbeins verbindet es sich mit dem dicken Faserband des distalen Kreuzbandes, das aus dem Ligamentum palmaris des Karpalgelenks entspringt [11].

Strecksehne

Ventral des Röhrlbeins verläuft die Strecksehne. Sie hat weniger elastische Fasern als die Beugesehne, da sie als Zehenstrecker dient und keine stoßdämpfende Funktion hat. Sie ist der Gegenspieler der Beugesehnen [10].

Weißer Linie

An der Verbindungsstelle zwischen der Lederhaut und der Hufwand findet man die Weiße Linie. Besonders bei einem frisch geschnittenen dunklen Huf lässt sie sich zwischen dem Tragrand und der Sohle erkennen. Der Zweck der Weißen Linie besteht darin, die Sohle mit der Innenwand des Hufes zu verbinden und den Rand des Hufbeins abzudichten, um ihn vor dem Eindringen von Bakterien zu schützen. Sie versiegelt das Hufbein innerhalb des Hufes und bildet eine flache Falte am unteren Ende des Hufs, welche sich bei Bewegung mit Schmutz füllt und so ebenfalls die Traktion unterstützt [11].

2.2.3 Hufmechanismus

Mit Hufmechanismus ist das elastische Verformen des Pferdehufes unter Belastung gemeint, welche in Abbildung 5 schematisch dargestellt wird. Das Ballenpolster ist eine Masse aus flexiblem Material, die zur Bildung der Ferse beiträgt. Diese Struktur ist einer der wichtigsten Stoßdämpfer des Fußes.

Wenn der Huf mit Gewicht belastet wird, wird der Druck durch die Zehenglieder auf die Wand und auf das Ballenpolster und den Strahl übertragen. Der Strahl, eine hochelastische, keilförmige Masse, kommt normalerweise zuerst mit dem Boden in Berührung. Der Strahl drückt auf das Ballenpolster, das sich abflacht und nach außen gegen die Seitenknorpel gedrückt wird. Die Strahlfurchen werden ebenfalls abgeflacht und neigen dazu, die Stege der Wand auseinander zu drücken. Wenn der Fuß angehoben wird, kehren der Strahl und andere flexible Strukturen des Fußes in ihre ursprüngliche Position zurück.

Beim Aufsetzen des Fußes auf den Boden wird das Blut durch den erhöhten Druck und die Formveränderung des Ballenpolsters und des Strahls vom Fuß in das Bein gepresst. Durch den Druck und die Formveränderung werden die Venen im Fuß zusammengedrückt. Wenn der Fuß angehoben wird, wird die Kompression aufgehoben und das Blut fließt wieder in die Venen. Auf diese Weise wirkt die Bewegung dieser Strukturen im Huf wie eine Pumpe. Die Blutzirkulation im Fuß wird durch die Bewegung erhöht und begünstigt den Wachstum des Hufes. Im Gegenzug hemmen Bewegungsmangel, Trockenheit der Hornwand und schlechte Ernährung das Hufwachstum [7].

Der Huf muss die bei jedem Auftritt entstehenden Stoßwellen ableiten. Die Strukturen des Hufes sind besonders geeignet Energie zu absorbieren, da die Hornwand des Hufes während des Hufaufpralls eine viskoelastische Verformung erfährt. Der Ballenbereich des Hufes weitet sich, während sich die Höhe des Tragrandes durch eine Verengung der inneren Strukturen verringert. Dadurch wird die Aufprallzeit verlängert und die Spitzenbelastung vermindert [3].

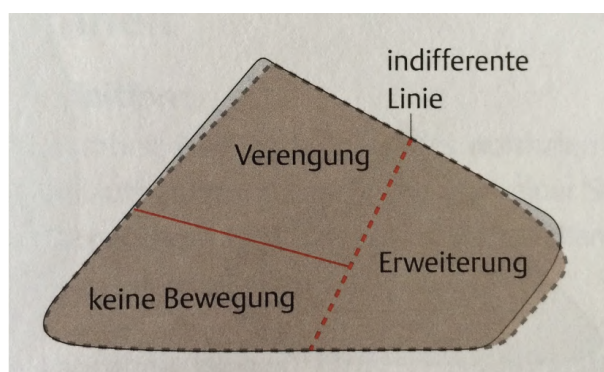


Abbildung 5: Schematische Abbildung des Hufmechanismus [12]

2.2.4 Gangbild des Pferdebeins

Trotz ihrer großen Größe und Masse sind Pferde Lauftiere mit einem umfangreichen Gangrepertoire und beträchtlichen athletischen Fähigkeiten. Die Gliedmaßen haben sich so entwickelt, dass die schwere Muskulatur auf die proximalen Gliedmaßen beschränkt ist. Die distalen Gliedmaßen haben dagegen ein geringes Gewicht, mit einem einzigen funktionellen Glied, dem Zeh, und langen, leichten Sehnen zur Bewegung und Unterstützung der distalen Gelenke.

Diese Anpassungen in der Evolution der Pferde reduzierte das Trägheitsmoment und verringerte den Energieaufwand für das Ein- und Ausfahren der Gliedmaßen während der Fortbewegung. Auch gibt es eine Arbeitsteilung zwischen den vorderen Gliedmaßen und hinteren Gliedmaßen. Die vorderen Gliedmaßen haben eine säulenartige Konstruktion, welche auf das Tragen von Lasten spezialisiert ist und dementsprechend auch den Großteil des Körpergewichts eines Pferdes tragen kann. Die hinteren Gliedmaßen haben dagegen stärker abgewinkelte Gelenke, welche eine Hebelwirkung für die Erzeugung von Vortrieb bieten. Das Gewicht eines erwachsenen Pferdes beträgt etwa 400 kg, wobei ein Pferd in Ruhe 58 % seines Körpergewichts auf den Vorderbeinen trägt, während die Anatomie der Hinterbeine mehr auf eine vorwärts/aufwärts Bewegung des gesamten Körpers spezialisiert ist.

Der Gang eines Pferdes kann in Flug- und Stützbeinphase unterteilt werden, wobei das Vörschwingen des Beines als Protraktion bezeichnet wird und das Abdrücken nach hinten als Retraktion. In Abbildung 6 wird der genaue Ablauf des Ganges an einem Vorderbein des Pferdes aufgezeigt. Die Stützbeinphase beginnt mit dem Anfangskontakt, wenn der Huf mit der äußeren Trachtenwand auf den Boden aufkommt. Danach folgt die innere Trachtenwand, wobei die zeitliche Differenz mit bloßem Auge nicht sichtbar ist. Mit dem Aufprall des Zehenbereichs steigen die Bodenreaktionskräfte, bis der ganze Huf am Boden steht. Dabei treten die größten Belastungen im Huf auf und es besteht eine hohe Verletzungsgefahr. Es wird vermutet, dass das Landen auf den Trachten durch einen Reflex bestimmt wird, da Zehenlandungen nur äußerst selten vorkommen [13].

Eine erhebliche Dämpfung der Aufprallschwingungen erfolgt innerhalb des Hufs, durch die Hufmechanik. Die Trachten weiten sich durch die Belastung und das Fesselgelenk senkt sich Richtung Boden, um den auftretenden Kräften entgegenzuwirken, wenn das Gewicht des Pferdes auf das Bein gebracht wird. Ebenso sinkt dabei der Thorax zwischen den Vorderbeinen ab, was ebenso der Stoßdämpfung dient.

Anschließend kommt es zum Übertritt, wenn das Gewicht auf das andere Bein übergeht und die Flugphase beginnt indem der Huf mit den Trachten zuerst vom Boden abgehoben wird. Dadurch ist es dem Pferd möglich am Ende der Retraktion mit der Zehe horizontale Kräfte aufzubringen und sich nach vorne hin vom Boden abzustoßen. Der Thorax wird dabei zwischen den Vorderbeinen nach vorne und oben gehoben. Die Flugphase beginnt mit dem maximalen Rückzug der Gliedmaßen, und der Huf erreicht kurz darauf seine maximale Höhe. Ein zweiter Höhepunkt tritt kurz vor der maximalen Protraktion auf. Anschließend wird die Extremität vor

dem Anfangskontakt leicht zurückgezogen, um sie abzubremsen und den Huf optimal für den Aufprall auszurichten. Die Verlangsamung der Vorwärtsbewegung des Fußes ist wichtig, um die Belastungen beim Aufprall zu verringern.

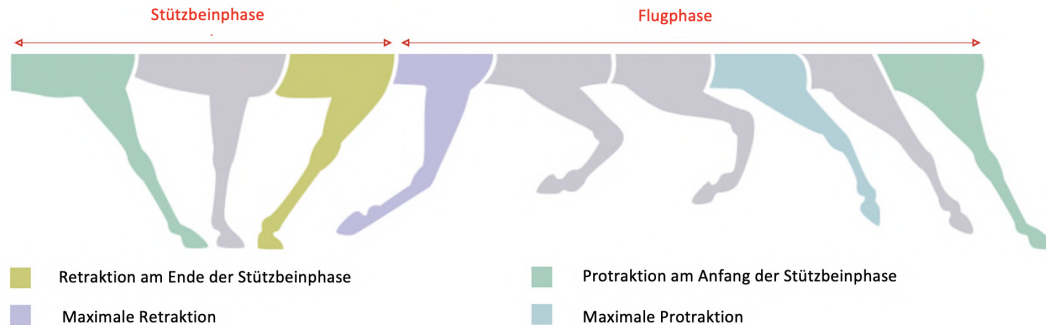


Abbildung 6: Gangablauf bei einem Pferdebein [14]

2.3 Beanspruchungsveränderung über die Jahre

Durch sportliche Betätigung werden verschiedene Prozesse im Körper angeregt, welche dazu führen, dass Körpergewebe wie Muskeln, Knochen oder Gelenke gestärkt werden und Risiken für die Gesundheit vermindert werden. Doch heutzutage hat beim Mensch sowie beim Pferd der Hochleistungssport mit Gesundheit nichts mehr zu tun. Die Sportler überschreiten regelmäßig ihre psychosomatischen Grenzen, was zu irreversiblen Schäden des Bewegungsapparates führen kann. Auch Sportärzte wurden von dem Leistungsdruck beeinflusst, da es immer wieder vorkommt, dass sie die ärztliche Sorgfaltspflicht missachten. Aufgrund von persönlichem Ehrgeiz oder anderen kommerziellen Gründen wird auch einem nicht gesunden Athleten eine Sportlerlaubnis ausgestellt, um an Wettkämpfen teilzunehmen.

Dieses System führt zu einer frühzeitigen Invalidisierung, dabeispielsweise schon nach 10 Jahren im Leistungsfußball oder Gewichtheben zu 100 % Abnutzungsschäden auftreten und die Menschen durch verschiedene Bedingungen anfälliger sind für kleine Infekte, welche beispielsweise das Herz gefährden [15].

Bereits im alten Rom wurden bei Pferderennen die Tiere speziell präpariert. Mittels Doping wurde die natürliche Sicherung des Körpers gegen Überbeanspruchung ausgesetzt und Pferde über ihre Belastungsgrenzen hinausgetrieben [15]. In den höheren Schwierigkeitsstufen der Reitturniere hängt der Erfolg dann mehr von den finanziellen Mitteln als den Fähigkeiten des Reiters ab, die Anzahl der Top Athleten ist in den letzten Jahren gestiegen während gleichzeitig das Preisgeld insgesamt im Reitsport gesunken ist. Wer tatsächlich hauptberuflich reitet bildet dabei noch nebenher Jungpferde aus oder gibt Reitunterricht, wobei die meisten Reiter ihren Fokus auf den Wettbewerb legen und die Ausbildung des Pferdes nur zweitrangig ist. So ist die

Ausbildung häufig in erster Linie auf die Erfüllung der Turnieranforderungen ausgerichtet und die Bedürfnisse des Pferdes werden in den Hintergrund gedrängt. Dazu kommt, dass es einen Mangel an gutem Reitunterricht gibt. Kompetente Ausbilder wollen keinen Reitunterricht für Anfänger geben, weshalb es vielen Reitern an einer soliden Reitbasis fehlt, sowie dem Wissen, wie man ein Pferd richtig und gesund trainiert.

Schlechtes, falsches Reiten kann das Auftreten von klinischen Problemen beschleunigen, wobei viele Verletzungen im Sport in der Regel durch wiederholte Belastungen entstehen, die die Kapazität des Gewebes übersteigen. Das Ausmaß der Belastungen und damit die Wahrscheinlichkeit von Verletzungen hängen, bei den Menschen wie bei den Tieren, häufig von Gleichgewicht und Körperbau des Athleten ab. Die Aufrechterhaltung eines guten Gleichgewichts und Körperbaus ist deshalb eine Grundvoraussetzung für die optimale Funktion der Gliedmaßen und dem Schutz vor Sportverletzungen.

Sportreiter sind jedoch wie viele anderen Hochleistungssportler von übermäßigem Ehrgeiz gepaart mit Selbstüberschätzung getrieben und verlangen zu viel von sich und ihren Pferden. Zeigt das Pferd dann aufgrund von Überbeanspruchung oder falscher Belastung gesundheitliche Probleme, so zwingen finanzielle Beschränkungen die Reiter oft, einen schnellen und einfachen Weg zu finden, um trotzdem im Wettbewerb zu bestehen [16].

Jedoch gab es mit den Jahren einen gesellschaftlichen Wandel, sodass nicht nur wie am Tierschutztag 2018 der Tierschutz im Pferdesport überarbeitet wurde, sondern auch immer mehr Reiter und Reiterinnen von den weit verbreiteten Hufeisen abkommen und auf Hufschuhe oder Klebebeschläge umsteigen [17].

Durch die erhöhte Nachfrage nach alternativen Beschlägen wird außerdem die Forschung in diesem Bereich vorangetrieben, sodass die Alternativen zu den Hufeisen nicht nur immer zahlreicher werden, sondern auch immer weiter optimiert und ergonomischer für die Pferde werden.

2.4 Geschichte Hufschutz

Die Notwendigkeit eines Hufschutzes kam schon im Altertum auf, als die Pferde zunehmend für das Militär genutzt wurden. Da die Ansprüche an die Pferde über ihre natürlichen Grenzen und Möglichkeiten hinaus gingen, musste man sich etwas einfallen lassen. Denn ein Pferd, welches nicht sauber laufen kann, ist auch in der heutigen Zeit nicht gebrauchsfähig.

Den Vorgänger der Hufeisen nannte man auch Hipposandalen. Ein sandalenähnlicher Hufschutz aus geflochtenem Bast oder Lederschuhen, wurde damals im alten Ägypten verwendet. Befestigt wurde das Ganze mit Stricken und Riemen am Pferdebein, was jedoch nicht sehr langlebig war. Ein Hufschutz aus Bronze oder Eisen wurde von den Römern genutzt, jedoch wurde dieser ebenfalls mit Riemen am Pferdebein befestigt und verursachte Scheuerwunden. Besonders bei schnellen Ritten konnten sich die Eisen lösen und das Pferd zum Stolpern brin-

gen. Seit dem 5. Jahrhundert gab es dann die genagelten Hufeisen wie wir sie heute kennen. Sie wurden wahrscheinlich von den Hunnen aus Asien importiert und in Europa etabliert [18]. Heutzutage wenden sich immer mehr Pferdebesitzer von den weit verbreiteten Hufeisen ab. Das kann verschiedene Gründe haben, wie zum Beispiel, dass die Hufqualität des Pferdes sehr abgenommen hat, sodass die genagelten Eisen nicht mehr halten, oder dass aufgrund von Krankheiten auf die Eisen verzichtet werden muss. Es gibt bereits viele Vor- und auch Nachteile für die verschiedenen Methoden einen Huf zu schützen, jedoch hängt es meist von der persönlichen Einstellung der Pferdebesitzer ab, welche Methode bei ihrem Pferd verwendet wird [19].

2.4.1 Barhuf

Bei Pferden, welche ohne Beschlag laufen (in weiterer Folge als Barhuf bezeichnet), das heißt ohne die Verwendung von zusätzlichem Schutz, werden die natürlichen Funktionen nicht gestört wie bei festen Beschlägen. Die Stoßdämpfung des Hufmechanismus kann ungehindert die Gelenke vor den Belastungen schützen und die Blutzirkulation im Huf anregen. Ebenso wird der Tastsinn und die natürliche Form des Hufes erhalten. Der Huf hat außerdem die Möglichkeit das optimale Gleichgewicht zwischen Abrieb und Wachstum zu erreichen. Wogegen die Hufqualität bei einem permanenten Hufschutz stark abnimmt, sodass der Huf sehr weich wird und sich schnell abnutzt. Durch den natürlichen Hufabrieb wird zudem das Hornwachstum angeregt und die Kräftigung des Hufes gefördert. Die Hufe eines Pferdes passen sich immer dem Untergrund an, auf welchem es sich die meiste Zeit bewegt. Bei weichem Untergrund wächst das Horn etwas weicher und bei hartem Untergrund härter, um trotz der Umstände das Gleichgewicht zwischen Wachstum und Abrieb sicherzustellen. Wird der Untergrund gewechselt, so wird ein Impuls an den Kronrand übertragen, wo das Horn entsprechend des Untergrunds gebildet wird. Innerhalb eines Jahres hat sich dann das komplette Horn der Hufwand des Hufes ausgewechselt [19].

2.4.2 Hufeisen

Ein Hufeisen ist ein gebogenes U-förmiges Eisen, welches mit Nagellöchern versehen ist. Es stellt eine Verlängerung des Tragrandes dar und dient dem Schutz von Pferdehufen. Anbringen der Hufeisen wird von ausgebildeten Hufschmieden ausgeführt und umgangssprachlich beschlagen genannt. Jedes Hufeisen hat zusätzlich zu den Nagellöchern eine mittige Rille, die Falz, welche als Basisgleitschutz dient und verhindert, dass die Nägelköpfe über das Hufeisen hinausragen.

Das normale Hufeisen besteht aus Stahl, da es recht widerstandsfähig ist, zusätzlich gibt es aber auch Hufeisen, welche aus Aluminium oder Kupfer gefertigt wurden. Die Hufeisen von Rennpferden zum Beispiel werden meist aus Aluminium gefertigt, da es viel leichter ist als Stahl. Auch gibt es Hufeisen aus Aluminium, welche Stahlgriffe im Zehenbereich der Falz ha-



Abbildung 7: Klebebeschlagn von N & U Sport Horse Shoes GmbH

ben, um eine starke Abnutzung zu verhindern und die Lebensdauer zu erhöhen [18]. Besonders geformte Hufeisen können ebenfalls für orthopädischen Zwecke dienen, ob es darum geht eine größeren Unterstützungsfläche für erhöhte Stabilität zu schaffen oder ein bequemes Abrollen über die Zehenwand durch ein angeschliffenes Eisen im Zehenbereich [12].

2.4.3 Klebebeschlagn

Eine weitere Möglichkeit den Pferdehuf zu schützen bildet der Klebebeschlagn. Er besteht aus einem Kunststoff und wird mithilfe von Laschen auf den Pferdehuf geklebt. Bei dem Klebstoff handelt es sich meist um einen Zweikomponentenkleber oder einen Polyurethankleber. Auch da gibt es verschiedene Arten wie der Beschlagn auf dem Huf festgeklebt wird beziehungsweise ob er permanent oder nur temporär angewandt wird. Der offensichtlichste Unterschied zwischen einem Klebebeschlagn und einem Hufeisen oder Barhuf ist die Elastizität des Kunststoffes. Beim Aufußben des Hufes wird das Gelenk geschont indem der Stoß abgedämpft wird. Für den Gebrauch auf weichen Untergründen, wie zum Beispiel beim Vielseitigkeitsreiten, gibt es zudem die Möglichkeit Stollen in den Kunststoffbeschlagn einzusetzen, da der Untergrund für die bloße Anwendung von Eisen oft zu rutschig ist.

Allerdings sind die Kunststoffbeschläge lange nicht so haltbar wie ein Eisen und müssen je nach Abrieb regelmäßig ausgetauscht werden. Bisher gibt es noch keine Studien zu den Langzeitfolgen des Klebstoffs auf dem Pferdehuf, jedoch kann es aufgrund des Klebers zur Schädigung des Hufhorns kommen. Zwischen Beschlagn, Klebstoff und dem Huf können sich Bakterien ansammeln, welche den Huf angreifen [20].

Für die Studie wurde der Klebebeschlagn von N & U Sport Horse Shoes GmbH verwendet, welcher in Abbildung 7 zu sehen ist. Er besteht größtenteils aus TPU (Thermoplastische Polyurethane) und zeichnet sich vorallem durch seine Elastizität und Beständigkeit gegen Abrieb aus. Dadurch ist es möglich den Klebebeschlagn vor der Applikation durch heißes Wasser weicher zu machen, um ihn optimal an den Pferdehuf anzupassen. Innerhalb der Laschen befinden sich

Klebeflächen, welche durch ein Papier geschützt werden bis der Beschlag auf den Huf geklebt wird.

2.4.4 Hufschuh

Hufschuhe sind ein temporärer Hufschutz, der den Huf vor Belastungsspitzen schont und gleichzeitig durch die Elastizität des Materials den Hufmechanismus erhält. Die Hufqualität ist dadurch sehr viel besser als mit Hufeisen. Die Pferde können ohne einen Hufbeschlag leben, und bei ungünstigen Bodenverhältnissen, längeren Ausritten oder starken Belastungen durch die Hufschuhe geschont werden.

Die ersten Hufschuhe gab es bereits lange vor den Hufeisen (siehe Kapitel Geschichte Hufschutz), jedoch wurden sie aufgrund des Vorteils, dass die Hufeisen viel besser an den Hufen befestigt werden konnten, bald vom Markt vertrieben. Mit der Zeit wurden die Hufschuhe immer weiter verbessert, sodass heutzutage das Augenmerk nicht mehr auf der Haftung am Pferdehuf liegt, sondern darauf, wie sie die Biomechanik der Pferde unterstützen und gleichzeitig den Huf schützen.

Da ein Pferd die wenigste Zeit des Tages tatsächlich hohen Belastungen ausgesetzt ist, sind Hufschuhe in der täglichen Praxis sehr hilfreich. Sie werden nur bei Bedarf angelegt und das Pferd kann so den Großteil des Tages ohne Beschlag laufen.

Auch können Hufschuhe als Unterstützung bei der Behandlung verschiedener Hufkrankheiten dienen, sowie als Übergangslösung falls ein Pferd ein Eisen verloren hat, bis der Hufschmied ein neues aufnageln kann. Es gibt bereits Therapieschuhe von unterschiedlichen Herstellern wie Easyboot RX, Scoot Boots oder die Flex Boots [19].



Abbildung 8: Hufschuh von Swiss Galoppers

Die für diese Studie verwendeten Hufschuhe, welche in Abbildung 8 zu sehen sind, sind von Swiss Galoppers. Sie bestehen ebenfalls aus TPU (siehe Kapitel Klebebeschlag). Durch ihren Form und den Gurt mit Klettverschluss, welcher um den ganzen Schuh herum reicht, können

sie sehr gut an den Huf angepasst werden. Dadurch sinkt nicht nur die Wahrscheinlichkeit dass sie während einem Ritt verloren gehen sondern auch die Gefahr, dass der Schuh eine Reibstelle am Huf entwickelt. Der Schuh besticht vor allem durch seine flexible, stoßdämpfende und drehhemmende Innensohle, sowie das Rutsch- und Abriebfeste Sohlenprofil, mit welchem ohne Probleme bis zu 2000 km zurückgelegt werden können [20].

2.5 Häufige Erkrankungen

Pferde waren seit jeher Nutztiere, wobei sich ihre Rolle über die Jahre sehr verändert hat. Wo es damals hauptsächlich darum ging mithilfe von Pferden große Strecken zurückzulegen oder arbeiten auf den Landhöfen zu verrichten, wird das Pferd heutzutage mehr als ein Sportgerät angesehen. Aber egal, ob man nun einen Acker bestellen oder auf einem Turnier antreten möchte, ein Pferd, welches nicht laufen kann hat heute wie damals keinen großen Nutzen.

Häufige Ursachen dafür sind Erkrankungen der Gliedmaßen beim Pferd. Bei der Fortbewegung schlägt der Huf häufig und mit großer Kraft auf den Boden auf, was die Strukturen der Gliedmaßen bei jedem Auftritt stark beansprucht. Der Aufprall selbst gilt als der kritischste Teil der Standphase für das Auslösen von chronischen Gelenkbeschwerden wie Arthrose in den distalen Gliedmaßen des Pferdes [2]. Aber auch durch Überbelastung oder Fehlbelastung werden häufig Erkrankungen wie Hufrehe oder allgemeine Lahmheiten ausgelöst.

2.5.1 Lahmheiten

Lahmheit ist die häufigste Ursache für Nutzungsausfälle bei Pferden [21]. Es ist keine Krankheit im eigentlichen Sinne, sondern ein klinisches Zeichen für Schmerzen, mechanische Einschränkungen oder auch eine neuromuskuläre Erkrankung. Das Pferd kann oder will durch eine strukturelle oder funktionelle Störung des Bewegungsapparates nicht normal stehen oder sich bewegen. Das Ganze kann durch Traumata, angeborene oder erworbene Störungen, Infektionen, Stoffwechselstörungen oder eine Erkrankung des Nerven- und Kreislaufsystems ausgelöst werden.

Schmerzen sind bei allen Pferden die häufigste Ursache für Lahmheit, wobei es von entscheidender Bedeutung ist die genaue Ursache zu bestimmen, da die Behandlung je nachdem sehr unterschiedlich sein kann. Wo beispielsweise bei Lahmheiten ausgelöst durch Schmerzen häufig ein systemisches oder lokales Analgetikum (ein schmerzstillende oder schmerzlindernde Arzneimittel) hilft, ist bei mechanischer Lahmheit eine ganz andere Herangehensweise gefragt. Einige Lahmheitsursachen führen zu sehr charakteristischen und klassisch beschriebenen Gangbildern, weshalb sie meist gut zu identifizieren sind.

Bei der fibrotischen Myopathie, einer mechanischen Lahmheit, wird die betroffene Gliedmaße vor dem Ende der Protraktionsphase (siehe Kapitel Gangbild des Pferdebeins) schnell nach

hinten und unten gezogen, so dass der Eindruck entsteht, dass der Fuß auf dem Boden aufschlägt und nicht kontrolliert abgesetzt wird. Die Anzeichen sind beim Gehen am deutlichsten. Bei Stringhalt, einer neuromuskulären Störung, ist die betroffene Gliedmaße während der Schwungphase hyperflexibel, während die allmähliche kaudale Ruckbewegung vor dem Fußkontakt nicht auftritt. Eine der hinteren Gliedmaßen vollführt sozusagen eine plötzliche Beugung und wird ruckartig zum Abdomen des Pferdes gezogen. Jedoch zeigen viele Lahmheitsursachen keine charakteristische Ganganomalie, was die Diagnose erschwert.

Schmerzbedingte Lahmheiten können als gewichtstragende (Stützbein) oder nicht gewichtstragende (Schwungbein) Lahmheiten klassifiziert werden, sie können sich jedoch auch aus beiden zusammensetzen. Eine Stützbeinlähmung tritt auf, wenn das Pferd die Zeit oder die Kraft, die auf die gewichtstragende Gliedmaße einwirkt, reduziert. Das beständigste und am leichtesten erkennbare klinische Anzeichen einer Lahmheit ist das Kopfnicken, das mit einer Lahmheit der Vordergliedmaßen einhergeht.

Kopf und Hals des Pferdes heben sich, wenn die lahmdende Vordergliedmaße den Boden berührt und belastet wird, und fallen, wenn die gesunde Gliedmaße den Boden berührt. Das Anheben des Kreuzbeins (Beckens) ist das konsequenteste und am leichtesten zu beobachtende Anzeichen einer Lahmheit der Hintergliedmaßen. Das gesamte Becken und das Kreuzbein heben sich, wenn die lahme Gliedmaße auf dem Boden aufkommt und Gewicht trägt, und fallen, wenn die gesunde Gliedmaße auf dem Boden aufschlägt. Sowohl das Kopfnicken als auch das Anheben des Kreuzbeins dienen dazu, die Erschütterung der lahmen Gliedmaße zu verringern.

Bei vielen Pferden wird die Lahmheit der Hinter- und Vordergliedmaßen verstärkt, wenn das Pferd im Kreis geführt wird und die betroffene Gliedmaße auf der Innenseite liegt und stärker belastet wird.

Das Erkennen von Lahmheiten ist eine Schlüsselqualifikation für eine erfolgreiche Diagnose und mögliche Genesung des Pferdes. Zu den Faktoren, die Pferde für Lahmheiten anfällig machen, gehören unter anderem ein unsachgemäßer Hufbeschlag, unzureichende Konditionierung von Leistungspferden, monotone, sich wiederholende Belastungen von Knochen, Sehnen, Bändern und Gelenken bei Leistungspferden, harte, rutschige oder felsige Untergründe, auf denen die Pferde arbeiten, sowie extreme sportliche Aktivitäten.

Lahmheit in einem Teil einer Gliedmaße führt häufig auch zu sekundären Schmerzen in einem anderen Bereich derselben Gliedmaße. Aufgrund von Überbeanspruchung durch Kompensationsbewegungen kann es aber auch zu Lahmheit in der gegenüberliegenden Vorder- oder Hintergliedmaße führen. Sekundäre Lahmheiten sind bei Leistungspferden sehr häufig, können aber bei allen Pferdetyten auftreten. Ein dramatisches Beispiel für eine sekundäre Lahmheit ist die biomechanische Hufrehe (siehe Kapitel Hufrehe) die sich an der normalen kontralateralen Gliedmaße eines Pferdes entwickelt, das aufgrund eines schweren orthopädischen Problems

nur eingeschränkt belastet werden kann [22].

Lahmheit ist das häufigste tierärztliche Problem bei Sportpferden. Heutzutage wird die biomechanische Analyse eingesetzt, um Lahmheit zu erkennen und zu quantifizieren und die Reaktion auf die Behandlung zu überwachen. Es ist zu erwarten, dass die biomechanische Analyse von Pferden und Pferdesportarten in den nächsten Jahren stark zunehmen wird und dass die Ergebnisse zu einem besseren Verständnis der Faktoren führen werden, die die Leistung von Pferden verbessern oder einschränken können [21].

2.5.2 Hufrehe

Hufrehe ist eine der schmerzhaftesten Krankheiten bei Pferden. Es handelt sich dabei um eine Entzündung der Lederhaut des Hufs, welche anschwillt. Durch die Lage der Haut zwischen Hufbein und Hufkapsel gibt es jedoch keinen Platz und es kommt zu einem Blutstau im venösen Abflusssystem des Hufs. Der Blutstrom wird umgeleitet was zu einem minderdurchblutetem Kapillarbett führt. Spezielle Enzyme führen dann dazu, dass sich die verzahnte Verbindungsschicht auflöst und sich der Hufbeinträger lockert. Infolgedessen kann es zu einer Hufbeinsenkung kommen aufgrund des Gewichts und Drucks des Pferdes. Durch den Zug der tiefen Beugesehne kann es im fortgeschrittenen Krankheitsbild dazu kommen, dass die Hufbeinspitze zur Sohle hin rotiert. Es kommt zur Hufbeinrotation und ein Spalt entsteht. Dieser wird mit Ersatzhorn oder Luft angefüllt, was wiederum keinen Schutz vor Bakterien darstellt. An Hufrehe erkrankte Pferde leiden deshalb öfters auch an Hufgeschwüren.

Die Krankheit kann aus mehreren Gründen ausgelöst werden, durch falsche Fütterung, als Begleiterscheinung von Stoffwechselstörungen oder durch Überbelastung.

Einhergehend mit der Hufbeinsenkung bei fortgeschrittener Krankheit kann es zudem zum Verlust der Sohlenwölbung führen, sodass der Huf keinerlei Möglichkeit hat auftretende Stöße abzufangen. Die Funktion des Hufmechanismus ist gestört und die Dämpfung durch das nachgeben der Hufwand ist nicht mehr möglich. Dementsprechend wird die ausreichende Durchblutung des Hufes nicht mehr gewährleistet und die Belastung des Gewebes nimmt zu [23].

Mithilfe von Hufschuhen oder speziellen Beschlägen können die betroffenen Stellen des Hufes entlastet und die Schmerzen des Pferdes verringert werden.

2.5.3 Arthrose

Arthrosen sind heutzutage das Hauptproblem im Hochleistungssport [15]. Sie kann bei jedem Pferd, egal welche Altersklasse und Nutzungsart auftreten. Besonders, wenn die Gelenke von Jungpferde zu früh, zu stark belastet werden und sich dadurch die Gelenke abnutzen oder als Alterserscheinung. Auch eine angeborene Fehlstellungen der Beine oder Hufe fördert das



Abbildung 9: Schematische Darstellung der Folgen einer fortgeschrittenen Hufreheerkrankung [24]

Auftreten der chronischen Gelenkskrankheit. Arthrose ist eine irreversible Gelenkserkrankung, welche die Zerstörung der Gelenksknorpel zur Folge hat. Da die Krankheit im Anfangsstadium schmerzlos verläuft wird sie oft erst spät erkannt. Frühzeitige Hinweise sind unauffällig, wie verlängerte Aufwärmphasen, Stolpern oder Steifheit.

Die Gelenksknorpel fungieren bei einem gesunden Tier als Stoßdämpfer für die Gelenke. Wenn mit dem Fortschreiten der Krankheit zunehmend zerstört werden kommt es dazu, dass sich die Gelenke entzünden und der Knochen angegriffen wird. Um dem entgegenzuwirken bildet der Körper Knochenzubildungen auf der Gelenksfläche und am Rande des Gelenks, welche das Gelenk zunehmend versteifen lassen. Beginnt das Pferd nun eine Schonhaltung einzunehmen, um den Scherzen zu entgehen, werden Muskeln, Sehnen und Bänder zusätzlich belastet. Die Fehlhaltung kann auch zu einer Überbelastung anderer Gelenke führen und das betroffene Gelenk wird durch die geringe Belastung nicht mehr mit ausreichend Nährstoffen versorgt [25].

2.6 Technische Grundlagen

Das weitere Kapitel gibt einen kurzen Einblick zu den technischen Grundlagen.

2.6.1 Schwingungsanalyse

Die Schwingungsanalyse ist ein Verfahren zur Überwachung von Schwingungspegeln und zur Untersuchung von Muster in Schwingungssignalen. Sie wird in der Regel sowohl an den zeitlichen Wellenformen des Schwingungssignals direkt als auch am Frequenzspektrum durchgeführt, das durch Anwendung der Fourier-Transformation auf die zeitliche Wellenform erhalten wird.

Bei einer Zeitbereichsanalyse werden beispielsweise Messungen von chronologisch aufgezeichneten Schwingungssignalen untersucht, wodurch Aufschluss geben wird, wann und wie stark anormale Schwingungsereignisse auftreten. Extrahiert und untersucht werden hierbei unter anderem Parameter wie der Effektivwert, die Standardabweichung, die Spitzenamplitude,

die Kurtosis, der Scheitelfaktor, die Schiefe. Die Zeitbereichsanalyse ist in der Lage, den Gesamtzustand der zu überwachenden Ziele kostengünstig und zeiteffektiv zu bewerten.

In realen Anwendungen, insbesondere bei rotierenden Maschinen, ist es sehr wünschenswert, neben der Zeitbereichsanalyse auch die Frequenzspektralanalyse einzubeziehen. Eine komplexe Maschine besteht aus vielen Komponenten, gleichermassen wie auch ein Pferdehuf aus vielen unterschiedlichen Komponenten besteht (siehe Kapitel Anatomie Pferdehuf). Hier entsteht immer eine Mischung an Schwingungen, die sich aus den Schwingungen der einzelnen rotierenden Komponenten zusammensetzt. Die Frequenzanalyse analysiert Zeitsignale hinsichtlich Wiederholungen von Ereignissen im Schwingungsmuster, dadurch können die einzelnen Frequenzkomponenten untersucht werden. Zusätzlich kann durch eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) und digitale Rauschfilter eine zeiteffektive und erfolgreiche Frequenzanalyse durchgeführt werden. Mit der Schwingungsanalyse im Zeitbereich lässt sich also der Schwingungspegel überwachen [26].

2.6.2 Funktionsweise Beschleunigungssensor

Ein Beschleunigungssensor misst Vibrationen bzw. Beschleunigungen eines Objekts. Dies geschieht, indem die Vibrationen das zum Beispiel piezoelektrische Material im Inneren verschiebt und somit eine „Stauchung“ verursacht. Ein piezoelektronischer Beschleunigungssensor besteht aus einer Auswerteelektronik und einer mikromechanischen Kammstruktur. Die Kämme bilden dabei einen Kondensator, wobei die Abstände zwischen den Zähnen des Kamms die Kapazität bestimmen. Die Masse, also der Kamm, ist an einer Feder aufgehängt, sodass sich je nach Beschleunigung die Lage verändern kann. Die daraus resultierende Kapazitätsänderung wird von der Auswerteelektronik erfasst, in einen Messwert umgewandelt und als Spannungssignal ausgegeben [27].

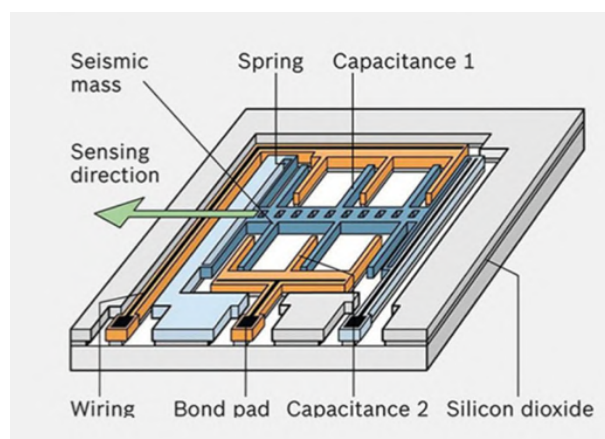


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Beschleunigungssensors [27]

Der verwendete Beschleunigungssensor ADXL-001-250 (Analog Devices, Wilmington,

Massachusetts, Vereinigte Staaten) verfügt über eine vollständig differenzielle Sensorstruktur und einen Schaltkreis, der eine Beständigkeit gegen elektromagnetische Störungen bietet. Der verwendete Sensorprozessor nutzt die Vorteile von mechanisch gekoppelten, aber elektrisch isolierten differentiellen Sensorzellen. Dadurch verbessert sich die Sensorleistung und -größe, da eine einzige Prüfmasse das vollständig differentielle Signal erzeugt. Die Sensorsignalaufbereitung verwendet außerdem eine elektrische Rückkopplung mit Null-Kraft Rückmeldung für eine verbesserte Genauigkeit und Stabilität. Durch die Kraft-Rückkopplung werden die elektrostatischen Kräfte aufgehoben, welche von den Sensorschaltungen verursacht werden.

In Abbildung 11 ist eine vereinfachte Ansicht eines der differentiellen Sensorzellenblöcke zu sehen. Jeder Sensorblock umfasst mehrere Differentialkondensator-Einheitszellen, wobei jede Zelle dabei aus festen Platten besteht, welche an der Geräteschicht befestigt sind, und beweglichen Platten, die am Sensorrahmen angebracht sind, sowie den Zähnen des Kamms. Durch die Verschiebung des Sensorrahmens ändert sich die Lage der Platten, bzw. der Kammzähne, zueinander und damit auch die Differenzkapazität. Die Schaltung auf dem Chip misst dann die kapazitive Änderung. Um die differentiellen Sensorelemente elektrisch zu isolieren, aber mechanisch zu koppeln wird eine Grabenisolierung verwendet. Die Struktur selber hängt an einkristalline Siliziumfedern über dem Griff wafer und bietet einen Widerstand gegen die Beschleunigungskräfte [28].

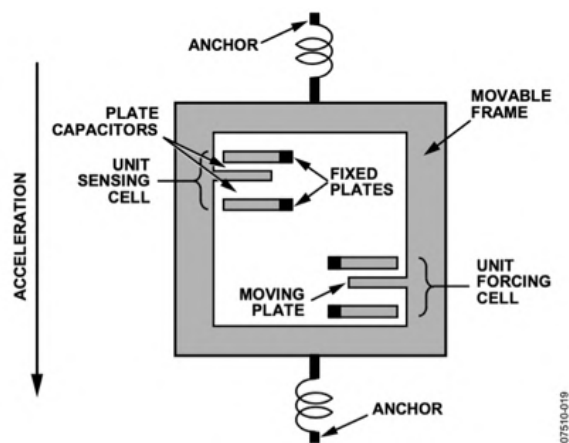


Abbildung 11: Vereinfachte Darstellung des ADXL Sensors bei Beschleunigung [28]

3 Stand der Technik

In den letzten Jahren wurden bereits mehrere Studien im Hinblick auf Vibrationen am Körper oder speziell am Pferdehuf und zu den Dämpfungen synthetischer Hufbeschläge veröffentlicht. Ein kurzer Einblick dazu folgt in diesem Kapitel, sowie zu den Auswirkungen der Verwendung von gefroren gelagerter Pferdehufe.

3.1 Vibrationen im Körper

In den letzten Jahren wurde die Möglichkeit durch Vibrationen den Körper zu trainieren immer prominenter. Es wurden neue vibrierende Trainingsgeräte entwickelt, durch welche man unter wenig Anstrengung aus seinem Training einen großen Nutzen ziehen kann. Doch Vibrationen am Körper können sowohl nützliche als auch gefährliche Reaktionen hervorrufen [29]. Ist ein Körper Vibrationen ausgesetzt so reagieren alle seine Systeme darauf, einschließlich des neuromuskulären Systems und auch des Herz-Kreislauf-Systems. Die Reaktionen sind somit nicht nur biomechanischer, sondern auch physiologischer Natur [30].

Grundsätzlich lassen sich Vibrationen am Körper in Ganzkörper- und Teilkörpervibrationen unterscheiden, wobei der Anteil des beteiligten Körpergewichts entscheidend ist. Wo Ganzkörperschwingungen einen Großteil des Körpers betreffen, bringen Teilkörperschwingungen nur lokalisierte Bereiche des Körpers in Schwingung [31].

Die Auswirkungen von Ganzkörpervibrationen sind in der Humanmedizin eingehend untersucht worden. Hier zeigte sich, dass bei chronischer Einwirkung unter anderem eine Degeneration der Wirbelsäule folgen kann. Die inneren Organe, Muskeln und Knochen werden alle den Vibrationen ausgesetzt, was zu unerwünschten Nebeneffekten führt. Eine der Hauptursachen bei unter 50-jährigen weswegen der Beruf nicht weiter ausgeführt werden kann sind Rückenschmerzen. Die Ursachen dieser Schmerzen wurden mit der Einwirkung von Ganzkörpervibrationen im Arbeitsumfeld in Verbindung gebracht, da Schmerzen des unteren Rückens mit pathologischen Veränderungen interferieren und diese beispielsweise durch das Fahren von Erdbewegungsgeräten auftreten können [29].

Studien belegen, dass erhöhte, verlangsamte und in ihrer Intensität geringe Vibrationsrhythmen in der Skelettmuskulatur, unmittelbar mit Schmerzen, Verspannungen und diversen Krankheitszuständen korrelieren. Wenn also Muskulatur verhärtet ist oder erkrankt, verlangsamen sich die Schwingungen in diesem Bereich oder kommen gar ganz zum Erliegen [31]. Bei langsa-

men Oszillationen im Mikromodell des Gewebes erhöht sich das Elastizitätsmodul, es verhärtet sich also. Regt man jedoch das Gewebe durch eine äußere Schwingung an, so verringert sich das Elastizitätsmodul, was ein weiches und gesünderes Gewebe zur Folge hat.

Ist also der Körper Vibrationen ausgesetzt, welche auf eine verhärtete oder erkrankte Muskulatur wirken, kann es im besten Fall dazu führen, dass sich die Muskulatur lockert. Im schlechtesten Fall jedoch wirken sich die Vibrationen auf Strukturen des Körpers aus, welche sonst von der Muskulatur geschützt werden und schädigen diese. Vibrationen stellen einen starken Reiz für die Strukturen des Bewegungsapparats des Menschen dar, welcher im Normalfall durch die Anpassungsfähigkeit der Muskulatur in ihrer Steifigkeit abgefangen wird [32]. Vor allem langanhaltende Vibrationen können irgendwann nicht mehr von der Muskulatur abgefangen werden und es entstehen beispielsweise Mikroläsionen am Knochengewebe. [31]

Ganzkörpervibrationen können aber auch als Trainingsmaßnahme oder zur Rehabilitation verwendet werden, wie es in der Humanmedizin bereits seit den neunziger Jahren der Fall ist, aufgrund ihrer Wirksamkeit bei der Steigerung der Kraft der unteren Gliedmaßen und des unteren Rückens. Ist der Körper für eine relativ kurze Zeit Ganzkörpervibrationen ausgesetzt erhöht sich dessen Testosteronspiegel und die Anzahl Wachstumshormone. Ein Studie hat ebenfalls gezeigt, dass Schafe, welche 1 Jahr lang (20 Minuten pro Tag, 5 Tage/Woche) mechanischen Vibrationen, mit hoher Frequenz (30 Hz) und kleiner Amplitude (0,3 g), ausgesetzt waren, eine um 34 % gesteigerte Knochendichte des proximalen Oberschenkelknochens vorweisen konnten. Auch gibt es mehrere klinische Studien, welche ergeben haben, dass Vibrationen nicht nur osteogen (= Knochen bildend) wirken, sondern auch die Muskelleistung und das Körpergleichgewicht verbessern können [33]. Andere Studien und Arbeiten bestätigen ebenfalls, dass Vibrationstraining eine effektive Trainingsmethode zur Verbesserung der Maximalkraft und Flexibilität sowie verschiedener anderer Faktoren ist, wenn das Training richtig konzipiert ist [30]. Die Funktion gesunder Vibrationsreize beim Menschen ist die Stimulation von Druckrezeptoren und Propriozeptoren, das Auslösen von Reflexen und die Stimulation der Muskelaktivität (EffekteSchwingungsreizeMensch.pdf). Durch von Vibrationsplatten ausgelöste Muskelkontraktionen können also auch vernachlässigte Muskelgruppen trainiert werden. Dabei ist vor allem die Intensität der Vibrationen ausschlaggebend für die Belastung, welche durch die Amplitude, die Frequenz und die Größenordnung der Schwingungen bestimmt werden [32].

Das genaue Analysieren der Auswirkungen von Schwingungen im Körper ist jedoch nur bei sinusförmigen Schwingungen möglich, aufgrund der deterministischen Eigenschaften. Aufgrund der Gefahr einer langfristigen Exposition gegenüber Ganzkörpervibrationen ist es jedoch wichtig, sichere Übungsprotokolle zu befolgen und den Körper nur eine beschränkte Zeit den Vibrationen auszusetzen [29]. Auch die Zunahme der Knochendichte bei Schafen nach Vibrations-training war nur möglich, da die Tiere nur einer Zeit den Vibrationen ausgesetzt waren. Dadurch war es ihren Körpern möglich in den Pausen zwischen den Belastungen die aufgetretenen Mi-

kroläsionen zu heilen.

Vibrationstraining ist also eine wirksame Trainingsmethode zur Verbesserung der Maximalkraft und der Flexibilität sowie verschiedener anderer Faktoren, wenn es richtig konzipiert ist, wobei die Anwendungsdauer für jedes Vibrationstraining sehr kurz sein sollte, beim Menschen beispielsweise 20-60 s, insbesondere wenn mit hohen Zusatzbelastungen gearbeitet wird. Zusätzlich gilt, je cranialer die Schwingungen übertragen werden, umso mehr nehmen die Frequenz und die Amplitude ab [30].

Zu erkennen ist dass Vibrationen, welche durch die Hufe auf ein Pferd wirken sehr starke Auswirkungen haben. Sie beeinflussen nicht nur die nahegelegenen Strukturen, sondern können Auswirkungen auf den gesamten Pferdekörper haben.

3.2 Vibrationen im Huf

Wenn sich ein Pferd fortbewegt wirken große Belastungen auf die Strukturen der Gliedmaßen. Der Pferdehuf schlägt stark und häufig auf den Boden auf, wobei die maximale Belastung leicht das Gewicht des Pferdes übersteigt. Befindet sich dazu noch ein Sattel und ein Reiter auf dem Pferderücken werden die Strukturen der unteren Gliedmaßen nochmal zusätzlich bei jedem Schritt belastet. Die Schwingungen, welche dabei entstehen werden vom Pferdehuf aufgenommen und größtenteils absorbiert, aufgrund dessen viskoelastischer Eigenschaften (siehe Kapitel Hufmechanismus).

Durch das Weiten des Hufes wird die Aufprallzeit verlängert, die Spitzenbelastungen abgeschwächt und der Gliedmaßen der Pferde geschützt. Jedoch besteht die Hufwand aus Horn und ist deshalb sehr anfällig auf Abnutzung.

Bereits vor Jahrhunderten gingen die Menschen dazu über den Huf zu schützen, erst mit den sogenannten Hipposandalen und später dann mit Hufeisen. Die Eisen waren so effektiv, dass ihre Anwendung bis in die heutige Zeit überdauert hat.

Mittlerweile ist aber durch mehrere Studien bekannt geworden, dass der Hufbeschlag die normale Bewegung der Hufwand stört und so deren Funktion beeinträchtigt. Der Huf kann sich während der Gewichtsbelastung nicht ausdehnen, was die Blutzirkulation im Huf beeinträchtigt und damit die Gesundheit des Horns. Bereits 1994 wurde eine Studie durchgeführt, bei welcher die Dämpfungsfunktionen des Hufes mit Beschleunigungssensoren am Fesselbein des Vorderbeins gemessen wurde. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf dem Vergleich von Hufen mit und ohne Beschlag. Damals war noch nicht klar, durch welche Funktion der Huf einen Aufprall abdämpft, jedoch konnte festgestellt werden, dass diese bei Belastungen auf einen beschlagenen Huf gestört ist. Es gab verschiedene Theorien, wie die Funktion der Dämpfung des Hufes abläuft, welche wiederum dazu führten, dass es weltweit unterschiedliche Methoden gab wie ein Huf am besten geschnitten werden sollte.

In Ländern, in denen die Theorie vorherrscht (Schweden), dass die Belastung durch Druck auf den Strahl und die Kompression des Ballenpolsters gedämpft wird, wurden die Hufwand und die Leisten eng geschnitten und der Strahl und die Sohle so getrimmt, dass der Strahl den Boden berühren konnte. In Ländern (Großbritannien und Deutschland), in denen der Strahl nicht als tragender Teil des Hufes angesehen wird, war die Beschneidung weniger ausgeprägt. Um Klarheit und ein besseres Verständnis für die Huffunktion zu schaffen wurde eine Studie durchgeführt, welche mithilfe eines Miniaturdruckmessgeräts den Druck im Ballenpolster misst, sowie die durch die Hufstrukturen übertragenen Beschleunigungen.

Zum einschätzen des Einflusses eines Eisenbeschlags wurden die mechanischen Funktionen mit und ohne Beschlag gemessen, indem die Dämpfung mithilfe eines Beschleunigungssensors am Fesselbein des Vorderbeins erfasst wurde, während das Pferd frei über einen Asphaltboden trabte. Unter sterilen Bedingungen wurde ein kleiner Aluminium Block, welcher Beschleunigungssensoren für drei orthogonale Richtungen beinhaltet, direkt in den Knochen der Pferde geschraubt. Die Position war jeweils lateral am Fesselbein des linken Vorderbeins, in der Mitte zwischen dem proximalen Interphalangeal - und dem Metacarpophalangealgelenk. Der Miniatur Druckaufnehmer war ein Dehnmessstreifen-Druckaufnehmer in Zylinderform mit einer Länge von 6,25 mm und einem Durchmesser von 2 mm. Er wurde mithilfe einer Kanüle in der Mittellinie des Ballenpolster, 5 mm distal entfernt vom Strahlbein, eingeführt. Die genaue Position wurde anschließend mithilfe eines Röntgenbildes kontrolliert.

Bei den Messungen wurden die Pferde fünfmal auf einer geraden Linie mit einer Geschwindigkeit von 2,2 m/s geführt, bevor man die Hufeisen abnahm und das Ganze wiederholte. Die Aufnahmefrequenz des Beschleunigungssensors betrug dabei 10 kHz. Mithilfe der Kumulativen der drei aufgezeichneten Beschleunigungen wurde die Amplitude berechnet und durch die Fourier Transformation wurde das Spektrum des Signals ermittelt.

In den Ergebnissen konnte man erkennen, dass die Schwingungen bei den Messungen mit beschlagenen Hufen in einem höheren Frequenzbereich lagen als bei den unbeschlagenen Hufen. Auch die durchschnittlichen maximalen Beschleunigungen waren deutlich höher, wenn die Pferde Hufeisen trugen.

Für die Druckmessungen im Ballenpolster wurden im Vorfeld Nullungsmessungen durchgeführt indem der Huf angehoben wurde, um den bereits vorhandenen Druck im Ballenpolster ohne eine Belastung von den Messergebnissen abziehen zu können. Die Aufnahmefrequenz des Systems war 1 kHz. Das Ballenpolster ist innerhalb des Hufes eingeschlossen, hat aber eine flexible hintere Oberfläche, die nur von Hautgewebe bedeckt ist. Die Ausdehnung der Hufwand während der Belastung dehnt auch das Ballenpolster aus und vermindert den Druck innerhalb des Polsters. Es dient als Stoßdämpfer, wobei es deutlich stärker belastet wird, wenn das Pferd mit Hufeisen beschlagen ist.

Man konnte bei der Visualisierung der Ergebnisse also klar erkennen, dass der Druck im Ballen-

polster erst deutlich abnimmt. Der niedrige Druck bleibt bei, bis der Huf über die Zehe abgerollt ist für die Abdruckphase. Dies geschieht aufgrund des Hufmechanismus (siehe Kapitel Hufmechanismus), bei welchem sich der Huf unter Belastung weitet, um die inneren Strukturen zu schützen. Dies war sowohl bei den Messungen mit Hufeisen als auch bei den Messungen ohne zu beobachten. Wobei das Fallen des Druckes bei den beschlagenen Messungen deutlich später und ebenfalls steiler auftritt. Ebenfalls dauerte der Unterdruck kürzer an als bei den Messungen mit unbeschlagenen Pferden, was vermutlich daran liegt, dass das Abrollen über den Zehen mit einem Eisenbeschlag früher eingeleitet wird.

Bei beschlagenen Hufen hat sich der Zeitpunkt des Druckabfalls im Ballenpolster von 30 ms auf 50 ms nach Auftritt des Hufes nach hinten verschoben. Dies kann zum einen an der Einschränkung des Hufes durch die Nagelung des Eisens liegen, als auch an der Adhäsion zwischen Eisen und dem belasteten Huf. Wenn diese bei der Belastung überwunden wurde konnte sich der Huf rasch ausdehnen.

Aus der Studie geht hervor, dass ein Großteil der auftretenden Schwingungen gedämpft werden bevor sie am Fesselbein ankommen. Sowohl Amplitude als auch die Frequenz der Beschleunigungen waren deutlich geringer am Fesselbein, als bei anderen Studien, bei welchen ein Sensor an der Hufwand befestigt wurde. Der Eisenbeschlag jedoch verringerte die viskose Dämpfung und erhöhte die mittlere Leistungsfrequenz und die maximale Amplitude der auf den Knochen übertragenen Schwingungen. Die viskose Dämpfungsfunktion des Hufes wird beeinträchtigt, jedoch nicht das Gangbild.

Der Druck innerhalb des digitalen Polsters des Vorderbeins nahm während der Standphase ab, was auf eine Ausdehnung des Hufs hinweist. Die Ausdehnung des Hufes wurde nicht durch die Belastung des Strahls oder der Sohle verursacht, da dies den Druck im digitalen Kissen erhöht hätte, die Drucktheorie der Huffunktion, wie sie in Schweden geläufig war, wurde daher widerlegt. Feststellen konnte man aber, dass das Beschlagen der Pferde den intra-digitalen Kissendruckabfall erhöht und die Bewegungen der Hufwand beeinträchtigt [3].

3.3 Vergleich von frischem und gefrorenem Gewebe eines Pferdehufes

Die mechanischen Eigenschaften von weichem biologischem Gewebe, einschließlich der corioepidermalen Verbindung des Pferdehufs, sind durch eine nichtlineare Reaktion gekennzeichnet, wenn sie einer einachsigen Zugbelastung ausgesetzt werden. In der Praxis ist dies der Fall, wenn der Huf sich unter Belastung weitet. Die Nichtlinearität der Spannungs-Dehnungskurve ist auf die sehr komplexe Struktur des Gewebes selbst zurückzuführen.

Die Mehrzahl der biologischen Gewebe besteht aus Zellen, die die extrazelluläre Matrix einschließlich Kollagen und Elastin bilden. Im unbelasteten Zustand sind die Kollagenfasern stark gekräuselt und werden bei großen Verformungen des Hufes aufgerichtet. Bei kleinen Verfor-

mungen bleiben die Kollagenfasern gekräuselt, und die mechanische Reaktion des Gewebes erfolgt nur durch die weichen Elastinfasern. Dies entspricht dem linearen Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung, dem so genannten "SZehenbereich", der durch seine geringe Steifigkeit gekennzeichnet ist. Unter größeren Belastungen, wenn sich die gekräuselten Kollagenfasern sich aufrichten, geht die Spannungs-Dehnungs-Kurve in den so genannten "Fersenbereich" über. Dieser kennzeichnet sich durch eine Versteifung des Gewebes, sowie einer teilweisen Beteiligung der Kollagenfasern an der Gewebereaktion. Erst bei höherer Belastung werden die Kollagenfasern völlig geradegerichtet und die Gewebereaktion liegt vollständig in der Zuständigkeit der steifen Kollagenfasern. Unter diesen hohen Belastungen weist auch das Gewebe eine deutlich höhere Steifigkeit auf. Bei weiterer Belastung beginnen die Gewebekomponenten zu versagen, und das Überschreiten der Endfestigkeit führt zum vollständigen Bruch des Gewebes.

Da es schwierig ist für Messungen stets frische Gewebeproben zu erhalten wurde ein Verfahren entwickelt, um die mechanischen Eigenschaften von frischen und gefrorenen Proben eines Tieres zu vergleichen.

Die mechanischen Eigenschaften wurden dabei mit einem einachsigen Zugversuch bestimmt, bei welchem Gewebeproben von der Zehe, den Seiten und der Ferse des Vorderbeins eines Fohlens entnommen wurden. Einzelne Proben aus Knochen und Hufwandgewebe wurden dabei in die pneumatischen Griffe einer Zugmaschine eingespannt und eine Spannungs-Dehnungs-Kurve wurde aufgezeichnet. Die angewandte Dehnungsgeschwindigkeit entsprach dabei der Geschwindigkeit, die beim Galoppieren von Pferden erzeugt wird. Das gefrorene und frische Gewebe, das einer einachsigen, linear wachsenden Belastung ausgesetzt war, zeigte in beiden Fällen eine nicht lineare Reaktion, die für weiche biologische Gewebe charakteristisch ist. Die mechanischen Ergebnisse zeigten außerdem deutliche Unterschiede zwischen den Geweben von Zehen-, Fersen- und den seitlichen Bereichen der Hufwand.

Die gefrorenen Proben können also für weitere Untersuchungen verwendet werden, da keine signifikanten Unterschiede zwischen den mechanischen Eigenschaften von gefrorenen und frischen Proben der corio-epidermalen Junctionszone festgestellt werden konnte [34].

3.4 Untersuchung der Dämpfungseigenschaften von Synthetischen Beschlügen

Bereits bei einer vorangegangenen Studie aus dem Jahre 2007 wurden, anhand der Beschleunigungen an der Hufwand, Pferde mit Hufeisen, PU-Beschlag (Polyurethan-Beschlag) und ohne Beschlag verglichen. Wobei der PU-Beschlag nicht geklebt, sondern durch Nägel in der Hufwand befestigt wurde. Die Messungen wurden an zwölf klinisch gesunden Warmblutpferden durchgeführt, welche darauf trainiert worden waren, auf einer Asphaltbahn mit konstanter Geschwindigkeit zu traben. Die Asphaltbahn galt dabei als steife Referenzfläche, um keinen

Einfluss von stoßdämpfenden Untergründen wie beispielsweise einem Sandboden zu haben. Die Ausrüstung für die Datenerfassung wurde dabei in einem Gurt transportiert, welcher den Pferden umgeschnallt wurde. Die drei Beschlagsbedingungen wurden in einem lateinischen Viereck durchgeführt, wodurch die Reihenfolge der zu testenden Beschlagsbedingungen variiert, um einen Einfluss der Reihenfolge zu vermeiden. Es wurden die Ergebnisse von mindestens sechs erfolgreichen Versuchen jedes Pferdes unter jeder Beschlagsbedingung erfasst, wobei die Kriterien für einen erfolgreichen Versuch waren, dass das Pferd auf einer geraden Linie mit einer gleichmäßigen Kadenz und einer mittleren Geschwindigkeit über den Asphaltboden trabte.

Mithilfe eines PZT Sensor, welcher durch eine speziell angefertigten Aluminiumhalterung an der lateralen Hufwand des linken Vorderbeins befestigt war, wurden die Beschleunigungen aufgezeichnet. Der Sensor war durch ein langes Kable an einen Verstärker angeschlossen, welcher wiederum das Signal durch einen A/D-Wandler in elektrischer Form an einen Computer weiterleitete. Das Kabel wurde von einer Person getragen, welche neben dem Pferd herlief. Die Ergebnisse zeigen bei den Schwingungsmuster in aufeinanderfolgenden Läufen und Schritten desselben Pferdes eine auffallende Ähnlichkeit. Dennoch konnten unterschiedliche Beschläge bei einzelnen Pferden auch Unterschiede in der Anzahl der Hochpunkte bewirken.

Obwohl nur 12 Pferde und sechs Versuche pro Pferd verwendet wurden, war es dennoch möglich, einen signifikanten Unterschied zwischen den Beschlägen aufzuzeigen. Wo die maximale Beschleunigung bei Hufeisen bei $688g \pm 293g$ liegt, treten beim PU-Beschlag nur maximale Beschleunigungen von $343g \pm 251g$ auf. Die Weichteile im Huf wirken wie ein Tiefpassfilter und dämpfen dadurch höhere Abbremsfrequenzen. Die Schwingungen von Pferden mit Hufeisen zeichnen sich durch schmalere Spitzen aus und weisen eine 15% höhere Amplitude an der Hufwand auf als bei Pferden ohne einen Beschlag (Barhuf).

Die Studie zeigte, dass die Pferde die maximale Amplitude beim Aufprall beeinflussen können, indem sie ihre Landetechnik vor dem Aufprall ändern. Von lahmen Pferden mit Strahlbein ist bereits bekannt, dass Kraft und Spannung bei diesen Pferden zu Beginn der Standphase etwa doppelt so hoch sind wie bei den gesunden Pferden. Dies ist auf eine höhere Kraft in der tiefen digitalen Beugesehne zurückzuführen, die auf eine Kontraktion des Muskels vor dem Aufprall und in der frühen Standphase zurückgeführt wird, um die Fersen zu entlasten und so den Fersenschmerz zu verringern, ein ähnlicher Mechanismus wie beim Menschen [2].

4 Problemstellung

Die biomechanische Analyse des trainierenden Pferdes ist ein dynamischer Bereich der Pferdeforschung, welcher immer weiter wächst. Die technologische Revolution hat es möglich gemacht, Analysen durchzuführen, die früher praktisch unmöglich waren. Mehrere Forschungsgruppen führten bereits grundlegende und angewandte biomechanische Studien an Pferdesportlern durch.

Die Ergebnisse werden eingesetzt, um die Aussichten von Sportpferden zu bewerten, die Leistung eines einzelnen Pferdes und die Auswirkungen verschiedener Trainingsmethoden zu analysieren, Hufschmiedetechniken und Reitböden zu verbessern und Reitern bei der Auswahl geeigneter Ausrüstung zu helfen [21]. Zur Zeit gibt es nur wenige Experimente, welche die Auswirkungen synthetischer Beschlagsmaterialien auf die Schwingungen bei gesunden Pferden objektiv bewerten [2].

4.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Prüfverfahren zu entwickeln, um die Absorptionseigenschaften von Pferdehufe mit Eisenbeschlägen, Hufschuhen, Klebebeschlägen oder Barhuf reproduzierbar zu vergleichen, um deren Auswirkung auf die Vibrationen an der Hufwand beurteilen zu können. Nach mehreren Vorversuchen und einer Literaturrecherche über die Schwingungen im Huf, wurde ein Konzept ausgearbeitet, mit welchem Pendelschlagversuche reproduzierbar durchgeführt und die Ergebnisse verglichen werden können. Dadurch ist es möglich auch in späterer Folge Messungen unter gleichen Bedingungen durchzuführen und andere Hufpräparationen zu testen.

Die Messungen durch den Prüfstand sollen einen Vergleich verschiedener Beschläge möglich machen, um ihre Vor- bzw. Nachteile zu dokumentieren, und mögliche Nutzungsempfehlungen oder Verbesserungsvorschläge geben zu können.

4.2 Forschungsfrage und Hypothese

Forschungsfrage Q1: Inwieweit können durch einen Pendelschlagversuch die Absorptionseigenschaften von Eisenbeschlägen, Klebebeschlägen, Hufschuhen und Barhuf mit Messungen an der Hufwand verglichen werden und können in weiterer Folge Rückschlüsse auf deren Verhalten am lebenden Pferd gezogen werden?

Hypothese H1: Mithilfe eines Pendelschlagversuchs können bei unterschiedlichem Beschlag signifikant unterschiedliche Schwingungen an der Hufwand gemessen werden und es können Rückschlüsse auf das Verhalten des Beschlag am lebenden Pferd gezogen werden.

Nullhypothese H0: Mithilfe eines Pendelschlagversuchs können bei unterschiedlichem Beschlag keine signifikant unterschiedlichen Schwingungen an der Hufwand gemessen werden und es können keine Rückschlüsse auf das Verhalten des Beschlag am lebenden Pferd gezogen werden.

5 Methoden

Die Daten für den Vergleich der Beschläge wurden aus Schwingungsmessungen mit einem Beschleunigungssensor an der Hufwand gewonnen, wobei die Schwingungen durch einen Pendelschlagversuch ausgelöst wurden. Die Messdaten wurden anschließend mit MatLab(R2022a, MathWorks Inc, Natick, USA) hinsichtlich der auftretenden Beschleunigungen und Frequenzen ausgewertet und gegenübergestellt.

5.1 Aufbau

Der gebaute Prüfstand besteht aus einem Pendel, welches eine Kraft auf den toten Pferdehuf überträgt, sowie der Sensorik, welche die auftretenden Schwingungen in der Hufwand aufzeichnet. Das zu prüfende Objekt, der tote Huf, wird vor den Messungen präpariert um den Sensor zu befestigen und in einer speziellen Vorrichtung der veterinärmedizinischen Universität Wien (Vetmed Uni) fixiert.

5.1.1 Pendel

Für das Pendel wurde ein Stahlrohr von 800 mm Länge verwendet, auf welches ein Kugellager (TARROX, Hornbach Eigenmarke), mit einem Innendurchmesser von 12 mm und einem Außendurchmesser von 32 mm, geschoben wurde. Danach wurden die Enden des Rohrs zusammen verpresst und mit einem Bohrer Löcher hineingebohrt mit einem Durchmesser von 6,35 mm.

Die Stange konnte so auf den Aufsätzen zweier Kamerastative 'THE PROFESSIONAL 4 NS' (SLIK CORPORATION, Saitama, Japan) mithilfe einer 3/8 Zoll Mutter festgeschraubt werden. Um den Außenring des Kugellagers wurde ein etwas größeres Stück Stahlrohr mit einer Wandstärke von 5 mm befestigt, welches mit einer 1 m langen Stange verschweißt wurde. Die Stange bildet dabei die Verlängerung der Zentrale des Rohrs.

Auf das Ende der Stange wurde ein M8 Gewinde geschnitten, worauf eine Vollkugel aus Edelstahl (edestahlonline24, Goch, Deutschland) mit passendem Innengewinde geschraubt wurde. Alle aufgeführten Materialien, welche nicht anders gekennzeichnet sind, stammen aus dem Baumarkt Hornbach (HORNBACK Baumarkt AG, Bornheim, Deutschland).

Um bei allen Messungen die gleiche Auslenkung des Pendels zu gewährleisten, wurde knapp unterhalb des Kugellagers ein Winkelmesser (Veterinärmedizinische Universität Wien) angebracht. Dieser misst mithilfe eines Gyroskops die Winkeländerung und zeigt sie auf einem kleinen Bildschirm direkt an, sodass man bei jeder Messung die richtige Stellung findet.

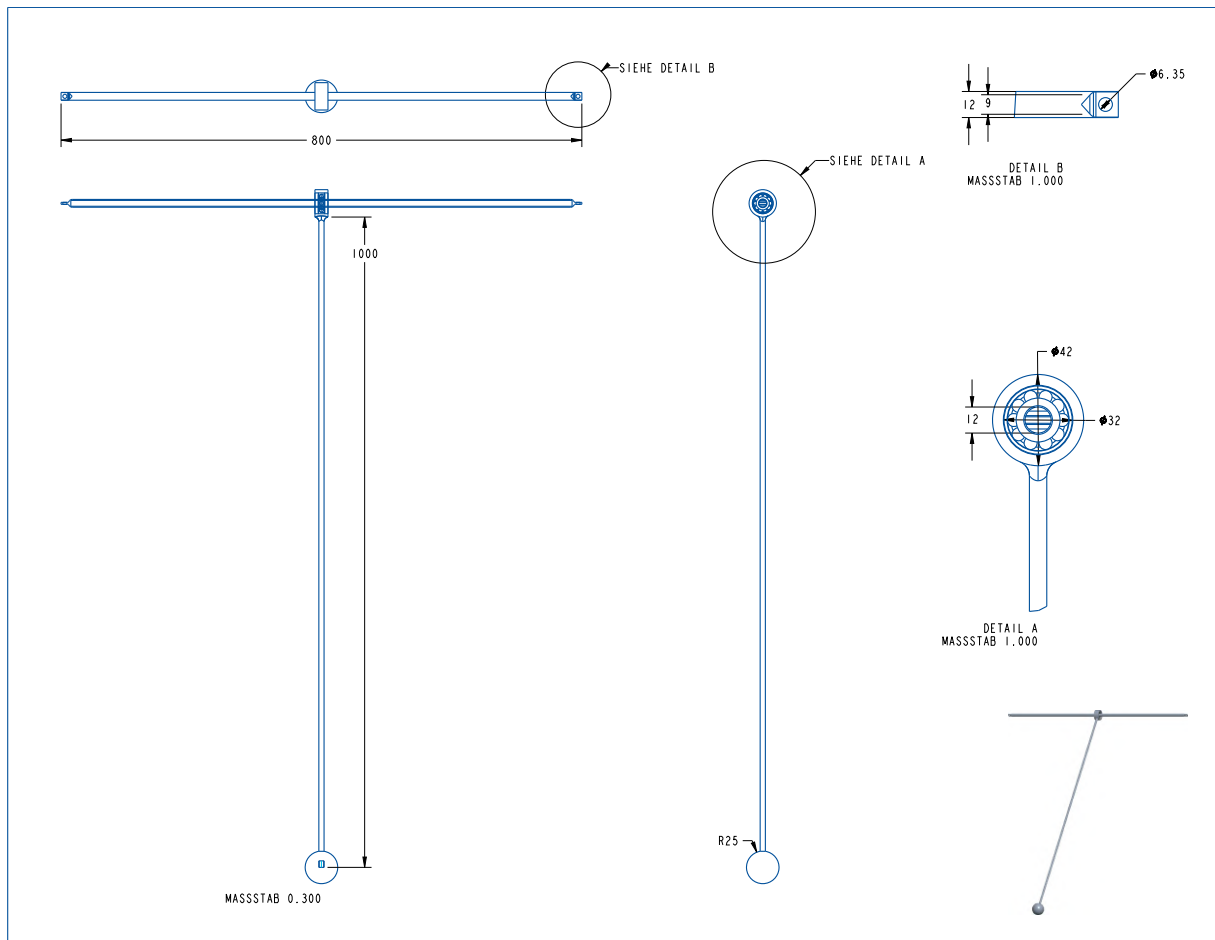


Abbildung 12: Technische Zeichnung des Pendels ohne die Kamerastative

5.1.2 Messvorrichtung

Für die Messungen wurden mehrerer tote Pferdehufe verwendet, welche am Röhrbein abgetrennt wurden und für Forschungszwecke an der veterinärmedizinischen Universität im Kühlraum gelagert werden. Die Hufe wurden jeweils nach dem Auftauen an speziellen schraubstockartigen Vorrichtungen der Vetmed Uni auf Höhe des Fesselgelenks am Tisch befestigt. Durch diese Positionierung ist der Huf noch beweglich und wird durch die Beugesehne und Strecksehne gehalten.

Für den Sensor wurde weiters eine Hülse mit Gewinde im Zehenbereich der Hufwand, mittig zwischen dem Tragrand und dem Kronrand, durch zwei Schrauben befestigt. Da die Ergebnisse zum momentanen Stand der Forschung keinen Rückschluss auf die Beschleunigungen innerhalb der Gelenke gibt, wurde ein einachsiger Beschleunigungssensor (ADXL-001-250) verwendet, um lediglich die Beschleunigungen in der Hufwand aufzuzeichnen. Der Sensor ist dabei in einem Stück Metallrohr mit passendem Außengewinde verklebt und wurde nach Applikation der Hülse auf dem Huf in dieser verschraubt und mit einer Mutter festgezogen.



Abbildung 13: Positioniertes Pendel auf den Fotostativen

Der Sensor hat eine Empfindlichkeit von ± 250 g und ist mit dem Vienna Surface Tester (Vetmed Uni Wien)(siehe Anhang A) verbunden, welcher diesen mit einer Spannung von 3,3 V versorgt. Die Spannungsänderungen bei Beschleunigung werden dann vom Vienna Surface Tester an ein digitales Oszilloskop DOS1102 übertragen, welches die Messungen aufzeichnet. Das empfangene Signal wird dabei vom Oszilloskop um den Wert 10 verstärkt, sodass die Skalierung des Sensors am Oszilloskop mit 44 mV/g angezeigt wird.

5.2 Einstellungen des Oszilloskops

Bevor die Hauptmessungen durchgeführt wurden musste das Oszilloskop eingestellt werden, um vergleichbare Messungen zu gewährleisten. Der Beschleunigungssensor war am Channel



Abbildung 14: Befestigung des toten Hufs in der Vorrichtung

1 des Oszilloskops angesteckt, bei welchem eine maximale Abtastfrequenz von 1 MHz möglich ist. Alle Messungen wurden dabei mit einer Abtastfrequenz von 500 kHz aufgezeichnet, welche sich durch die eingestellte Fenstergröße ergeben hat. Das Signal des Sensors wurde dabei mit einem Verstärkungsfaktor von 10 aufgezeichnet, sodass sich die Empfindlichkeit des Sensors von $4,4 \frac{mV}{g}$ auf $44 \frac{mV}{g}$ verändert hat.

Die Triggerung wurde durch eine steigende Flanke ausgelöst, um die Einzelsignale der Messungen festzuhalten. Das Trigger Level wurde dabei knapp über Grundspannung des Signals gelegt. Wurde eine Kraft auf den Huf ausgeübt, so hat der Beschleunigungssensor aufgrund der Bewegung eine erhöhte Spannung an das Oszilloskop weitergegeben, welche das Trigger Level überschritt, wodurch das Signal festgehalten wurde. Die Triggerkopplung wurde auf DC (Direct Current = Gleichspannung) eingestellt und die Totzeit auf 100 ns, wodurch gewährleistet wird, dass die Messungen rasch nacheinander durchgeführt werden können.

5.3 Probemessungen

Vor den tatsächlichen Messungen wurden mehrere Probemessungen durchgeführt. Diese dienten zum einen dazu, die Einspannung des Hufes und die Position des Sensors festzulegen, als auch sich ein Bild zu machen welche Schwingungen in der Hufwand auftreten bzw. welche Energie aufgebracht werden muss. Ebenfalls wurden verschiedene Positionen getestet, an welchen der Huf zum Schwingen gebracht wurde und einige Fehlerquellen eliminiert.

Die möglichen Aufprallpunkte für die Kraftübertragung auf dem Pferdehuf wurden zum einen aufgrund ihrer Lage zum Sensor gewählt, aber auch durch die anatomischen Eigenschaften. Wie in der Abbildung 15 zu sehen wurde einmal eine Stelle auf der Hufsohle gewählt, da diese weicher ist als der Tragrand des Hufes. Der Schlag auf die Hufsohle wurde jedoch stärker

ausgeführt, um eine deutliche Messung zu gewährleisten. Die Stelle am Zehenbereich des Tragrandes, an welchem das Hufeisen liegt, hat den größten Einfluss auf die Messung, da sie sehr nah an der Sensorvorrichtung liegt. Dagegen hat die Stelle am Hufeisenende eine recht große Distanz bis zum Sensor. Des Weiteren wurden ebenfalls Messungen zwischen dem Aufprallpunkt am Zehenbereich des Eisens und dem am Hufeisenende durchgeführt.



Abbildung 15: Verschiedene Kontaktpunkte der Kraftübertragung auf den Huf

Bei den ersten Messungen wurde der Schlag mit einem Hammer ausgelöst, weswegen sich der aufgetaute Pferdehuf nicht in der perfekten Position (Auftrittsfläche der Kraft auf dem Huf im rechten Winkel zum Boden) befinden musste. Ebenfalls wurde bei den ersten Messungen das Oszilloskop 54602B (Hewlett Packard, Kalifornien, USA) verwendet. Da dieses Oszilloskop keine Möglichkeit hatte die Daten elektronisch zu speichern wurde für weitere Messungen das neuere digitale Oszilloskop DOS1102 (Hanmatek, Shenzhen, China) besorgt.

5.4 Hauptmessungen

Für die finalen Messungen wurden fünf verschiedene Hufe aufgetaut. Alle sollten die gleiche Größe haben und waren vorneweg von einem Hufschmied mit Eisen ausgestattet worden. Da jedoch die Hufe 4 und 5 etwas größer ausfielen und deshalb zu groß waren für den Hufschuh und den Klebebeschlag, wurden das Horn des Hufes von einem Hufschmied zugeschnitten (siehe Kapitel Herausforderungen).

Nachdem der Sensor über die applizierte Hülse auf dem Huf befestigt wurde, wurde er in der Vorrichtung am Tisch eingespannt. Es wurde dabei darauf geachtet, dass die Aufttrittsfläche, am Aufprallpunkt des Pendels, am Huf möglichst im rechten Winkel und die Ausrichtung des Sensors parallel zum Boden steht.



Abbildung 16: Versuchsaufbau der ersten Probemessungen

Anschließend wurde das Pendel positioniert, sodass der Totpunkt 1 cm von der Auftrittsfläche auf dem Huf entfernt ist, was in Abbildung 17 zu sehen ist. Dadurch wird gewährleistet, dass das Pendel nach dem ersten Kontakt nicht an der Auftrittsfläche zum Stehen kommen würde bzw. es aufgefangen werden kann und keine weiteren Schwingungen auslöst. Aufgrund der unterschiedlichen Dicke von Hufeisen, Hufschuh und Klebebeschlag, variiert der Abstand von Pendel und Auftrittsfläche jedoch bei jeder Messung ein wenig.



Abbildung 17: Nahaufnahme des Pferdehufs, ausgestattet für die Messung mit einem Klebebeschlag

Auch die fünf verschiedenen Hufe variieren in ihrer Anatomie, weshalb das Pendel für jeden Huf einzeln ausgerichtet wurde. Dabei wurde pro Huf einmal bei der ersten Messung mit dem Eisenbeschlag der Abstand des Prüfstands eingerichtet und dann für die weiteren Messungen nicht mehr verändert. Für den Pferdehuf mit Eisenbeschlag wurden also 10 Messungen durchgeführt, anschließend wurde das Eisen entfernt, ohne jedoch den Huf aus der Vorrichtung zu nehmen oder das Gerüst des Pendels zu bewegen.

Nach 10 Messungen ohne einen Hufschutz, also Barhuf, wurde der Hufschuh von Swiss Galop-

pers an den Fuß befestigt. Die vordere Lasche des Hufschuhs wurde, damit die Sensorposition beibehalten werden konnte, bei den Messungen mit dem Hufschuh umgeklappt. Dadurch wurde sichergestellt, dass der Sensor ausschließlich mit der Hufwand in Kontakt ist.

Nach den 10 Messungen mit dem Hufschuh wurde der Klebebeschlag verwendet. Um eine optimale Passform für den Huf zu garantieren wurde das Material des Klebebeschlags unter heißem Wasser geschmeidiger gemacht. Durch die Geometrie der Laschen war es ebenfalls möglich den Klebebeschlag ohne weitere Präparation auf den Huf zu geben, da die Stelle am Huf, an welcher der Sensor verschraubt wurde frei blieb.

Die 10 Messungen konnten aufgezeichnet werden und das gesamte Verfahren wurde am nächsten Huf durchgeführt. Da es einige Male vor der Speicherung der Messung zu einer kleinen Erschütterung kam und die Messung überschrieben wurde, hat man jeweils nach den 10 Messungen einer Beschlagsvariante diese kontrolliert und gegebenenfalls wiederholt. Insgesamt wurden also 200 Messungen aufgezeichnet (5 Hufe x 4 Beschlagsvarianten x 10 Messungen) und mit Matlab weiterverarbeitet.

In weiterer Folge wird die Messung mit Hufeisen der Klarheit wegen als Hufeisen bezeichnet, die Messungen ohne Beschlag als Barhuf, die Messungen mit den Swiss Hufschuhen als Hufschuh und die Messungen mit den Klebebeschlägen als Klebebeschlag.

5.5 Berechnung des Pendels

Die Kraft, welche von dem Pendel auf den Huf ausgeübt wird, gibt Aufschluss darüber wie stark der Huf durch das Pendel, belastet wird, im Gegensatz zu den Belastungen, welche am lebenden Pferd auf den Huf wirken. Das durchschnittliche Gewicht eines Pferdes beträgt 400 kg, wobei bis zu 58 % davon von den vorderen Extremitäten getragen werden (siehe Kapitel Gangbild des Pferdebeins).

Die durchschnittliche Kraft wurde mit dem Energieerhaltungssatz berechnet, wobei vernachlässigt wird dass das Pendel nach Aufprall wieder ein Stück zurück schwingt und nicht die gesamte Energie an den Huf weitergibt.

Der Energieerhaltungssatz (1, 2) sagt aus, dass in einem reibungsfreien, mechanischen System die Gesamtenergie zu jeder Zeit dieselbe ist, wenn es von außen nicht beeinflusst wird. Das bedeutet, dass Energie nicht verloren gehen kann, sodass man von der aufgebrachten Energie, um das Pendel auszulenken, auf die Energie schließen kann, welche das Pendel wieder abgibt. Da es an einem Kugellager aufgehängt ist bewegt es sich in einem reibungsfreien Rahmen, welcher bei der Berechnung außen vorgelassen wird. Zudem wurde vernachlässigt, dass die Kugel eine Einlassung mit Gewinde hat, sodass der Schwerpunkt der Kugel sich nicht in deren Mitte befindet.

Die Formel für den Energieerhaltungssatz ist:

$$E_{pot} = E_{kin} = konstant \quad (1)$$

$$E_{pot} = m * g * h \quad E_{kin} = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (2)$$

Um die potenzielle Energie des Pendels zu errechnen, muss die potenzielle Energie der Stange und die potenzielle Energie der Kugel berechnet werden, wobei die potenzielle Energie des Lagers vernachlässigt wird. Die Masse der Stange von 890 g errechnet sich aus der Dichte von Stahl ($7,85 \frac{g}{cm^3}$) und den Maßen der Stange (1000 mm x 12 mm). Die Masse der Kugel wurde mit 510 g vom Hersteller bereitgestellt [35].

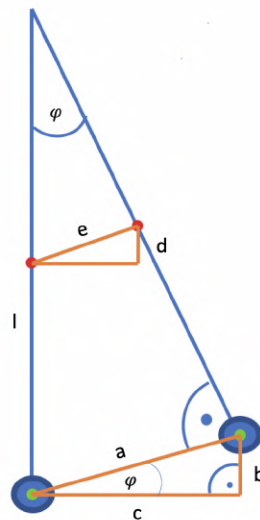


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Pendels (blau) zur Berechnung der aufgetragenen Kraft

Der Schwerpunkt der Stange und der Kugel befindet sich jeweils genau in deren Mitte, so dass mit dem Auslenkwinkel von 10° die Strecke der Auslenkung des Schwerpunkts errechnet werden kann. Die Strecke l vom Schwerpunkt der Kugel errechnet sich aus der Länge des Stabs (1000 mm), abzüglich des Gewindes, welches in der Kugel verschraubt wurde (15 mm), addiert mit dem Radius der Kugel (25 mm) und dem Radius des Gewindes (21 mm).

Mithilfe des Auslenkwinkels, der Trigonometrischen Funktionen und dem Satz des Pythagoras lassen sich die Strecken a , b , c , e und d aus Abbildung 18 berechnen. Die Rechnung (7) zeigt genaue Berechnung der Strecken. Durch das Errechnen der Strecken b und d ist nun die Strecke der Veränderung des Schwerpunktes des Stabes und der Kugel bekannt. Damit lässt sich die potenzielle Energie der beiden bestimmen und schlussendlich die Energie des gesamten Pendels. Die Berechnung der Strecke s , welche der gemeinsame Schwerpunkt des Pendels zurücklegt ist in (6) zu sehen. Die Variablen f und i stehen dabei für die Längen des Stabes oberhalb und unterhalb des Schwerpunktes des Pendels. Es wird angenommen, dass die Variable l_{Stab} der Länge des Stabes von 1 m entspricht, addiert mit dem Radius der Kugel r_{Kugel} , abzüglich der Gewindelänge von 0,015 m. Das Kugellager wurde bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Daraus ergibt sich, dass der tatsächliche Schwerpunkt des Pendels 0,32 m vom Schwerpunkt der Kugel entfernt ist. Mit dem Verhältnis der Strecke c zur Länge des Pen-

dels l , kann auf das Verhältnis des zurückgelegten Weges der Schwerpunktes s zur Lage des Schwerpunktes f geschlossen werde.

$$F = m * a \quad (3)$$

$$s = \frac{v^2}{2 * a} \quad (4)$$

$$W = F * s \quad (5)$$

$$m_{Stab} * \frac{f}{2 * l_{Stab}} * l_{Stab} = m_{Stab} * \frac{i}{2 * l_{Stab}} * l_{Stab} + m_{Kugel} * \frac{i}{2 * l_{Stab}} * l_{Stab}$$

$$m_{Stab} * \frac{a}{2} = m_{Stab} * \frac{i}{2} + m_{Kugel} * \frac{i}{2}$$

$$i = \frac{\frac{m_{Stab} * l_{Stab}}{2}}{m_{Stab} + m_{Kugel}} = \frac{\frac{0,89 \text{ kg} * 1,01 \text{ m}}{2}}{0,89 \text{ kg} + 0,51 \text{ kg}}$$

$$i = \frac{0,44945 \text{ kgm}}{1,4 \text{ kg}} = 0,32 \text{ m}$$

$$f = l_{Stab} - i = 1,01 \text{ m} - 0,32 \text{ m} = 0,71 \text{ m}$$

(6)

Durch das Umformen der Formel 3 für die Kraft (F) und für die kinetische Energie (E_{kin}) 2 und das Einsetzen der Formel 4 erhält man Formel 5, wobei davon ausgegangen wird, dass der Energiezufuhr (E) der verrichteten Arbeit (W) entspricht. Dadurch ist es möglich die durchschnittlich aufgebrauchte Kraft des Pendels bis zum Totpunkt durch die verrichtete Arbeit zu berechnen. Wie in der Rechnung (7) zu sehen kommt man auf eine durchschnittliche Kraft von 2,368 N.

$$r_{Kugel} = 25 \text{ mm}; \text{ Gewinde} = 15 \text{ mm}; \text{ Stab} = 1000 \text{ mm}; r_{Lager} = 21 \text{ mm}; \varphi = 10^\circ$$

$$l = 25 \text{ mm} + 1000 \text{ mm} - 15 \text{ mm} + 21 \text{ mm} = 1031 \text{ mm}$$

$$a = \sin(\varphi) * l = \sin(10^\circ) * 1031 \text{ mm} = 179,031 \text{ mm} = 0,179 \text{ m}$$

$$b = \sin(\varphi) * a = \sin(10^\circ) * 179,031 \text{ mm} = 31,088 \text{ mm} = 0,033 \text{ m}$$

$$e = \sin(\varphi) * \left(\frac{l - r_{Kugel}}{2} \right) = \sin 10^\circ * 503 \text{ mm} = 87,345 \text{ mm} = 0,087 \text{ m}$$

$$d = \sin(\varphi) * e = \sin(10^\circ) * 87,345 \text{ mm} = 15,167 \text{ mm} = 0,015 \text{ m}$$

$$m_{Kugel} = 510 \text{ g} = 0,51 \text{ kg}; m_{Stab} = 890 \text{ g} = 0,89 \text{ kg}$$

(7)

$$E_{potStab} = m * g * h = 0,89 \text{ kg} * 9,81 * 0,015 \text{ m} = 0,131 \text{ Nm}$$

$$E_{potKugel} = m * g * h = 0,51 \text{ kg} * 9,81 * 0,033 \text{ m} = 0,165 \text{ Nm}$$

$$E_{kin} = E_{potStab} + E_{potKugel} = 0,131 \text{ Nm} + 0,165 \text{ Nm} = 0,296 \text{ Nm}$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{(0,179 \text{ m})^2 + (0,033 \text{ m})^2} = 0,182 \text{ m}$$

$$s = \left(\frac{c}{l} * f \right) = \left(\frac{0,182 \text{ m}}{1,031 \text{ m}} \right) * 0,71 \text{ m} = 0,125 \text{ m}$$

$$F = \frac{W}{s} = \frac{0,296 \text{ Nm}}{0,125 \text{ m}} = 2,368 \text{ N}$$

5.6 Datenauswertung

Für die Datenauswertung der aufgezeichneten Messdaten wurden zunächst alle Textdateien in Matlab eingelesen und in einer Zelle gespeichert. Dadurch, dass das Oszilloskop eine maximale Aufnahmezeit von 10 000 Werten hat und die Abtastfrequenz bei 500 KS/s beziehungsweise

500 kHz lag, dauern alle aufgezeichneten Messungen 20 ms.

Anschließend wurde aus jedem Datensatz möglichst genau die aufgezeichnete Schwingung extrahiert, um mögliche Störgrößen für die Analyse zu eliminieren. Dabei wurde die erste Schnittstelle für jede Beschlagsvariante von Hand ausgewählt, da die Schwingungen selbst zu unterschiedlich waren, um einen einheitlichen Schnittpunkt zu finden. Von dort wurden je nach Messung unterschiedlich viele Datenpunkte genommen (Hufeisen = 2000 Datenpunkte; Barhuf = 4000 Datenpunkte; Hufschuh = 5000 Datenpunkte; Klebebeschlag = 5000 Datenpunkte), da die Schwingungen bei jeder Beschlagsvariante unterschiedlich lang schwingen.

Die genaue Anzahl der Datenpunkte wurde visuell nach dem Schwingungsverlauf gewählt. Durch die Sample Rate von 500 KS/s ergibt sich für die Schwingung der Hufen mit Hufeisen eine Schwingungsdauer von 4 ms, für die Barhuf Messungen 8 ms und für die Hufschuh und Klebebeschlag Messungen 10 ms. Da durch die Fenstereinstellungen des Oszilloskops die Grundspannung nicht immer bei 0 Volt liegt wurde bei jeder Schwingung die Eigenschwingung ermittelt und vom Signal abgezogen, sodass der Datenursprung sich möglichst auf null fällt. Mithilfe der App Signal Analyzer von Matlab wurde dann der passendste Filter für die Signale gesucht, indem das Frequenzspektrum und die Schwingung, des Rohsignals und des gefilterten Signals verglichen wurden. Die Zeit-Variable in der App wurde dafür mit einer Aufnahme Frequenz von 500 kHz und einer Startzeit bei 0 s festgelegt.

Wie in Abbildung 19 zu sehen ist, wurde das Rohsignal einer beliebigen Messung (in dem Fall wurde eine Messung von Huf 1 mit Hufeisen in der Variable Daten2 gespeichert und verwendet) importiert und anschließend dupliziert, um das gefilterte Signal mit dem Rohsignal vergleichen zu können. Dabei wurden sowohl der Verlauf des gefilterten Signals als auch das Bild des Spektrogramms und die Hauptfrequenz des Signals verglichen, um den Filter zu finden, bei welchem diese bei dem Rohsignal und dem gefiltertem Signal am ähnlichsten sind.

Zu erkennen ist, dass sich durch die Filterung mit dem Gauß-Filter die Hauptfrequenz ein wenig verändert, zwischen 24,2 Hz und 24,8 Hz auf 24,3 Hz. Das Spektrogramm zeigt zudem nur leichte Veränderungen in der Signalstärke über die gesamte Zeit des Signals. Der Gauß-Filter hat seinen Namen von der gaußschen Glockenkurve und funktioniert als Tiefpassfilter, bei welchem die hohen Frequenzen herausgefiltert werden [36]. Das Rohsignal wird mit einer Gaussverteilung gefaltet, bis eine Glättung erzielt wurde, das bedeutet, dass die Kanten im Signal abgeflacht werden. Zu sehen ist dies daran, dass die Steigung zu Beginn der gefilterten Schwingung zum Signalursprung hin abgeflacht wurde.

Nachdem der passendste Filter ausgewählt wurde, konnte die Filterung in den Code eingearbeitet werden, sodass sie automatisch für alle Messungen angewendet wird.

Um die Frequenz zu ermitteln, mit welcher der Huf anfangs schwingt wurde die Dauer der ersten halben Periode gemessen. Mit dem Wert wurde die Periodendauer T berechnet, wobei außen vor gelassen wurde dass es sich um eine gedämpfte Schwingungen handelte. Mithilfe der Periodendauer konnte dann die Frequenz f mit der Formel 8 berechnet werden. Die ge-

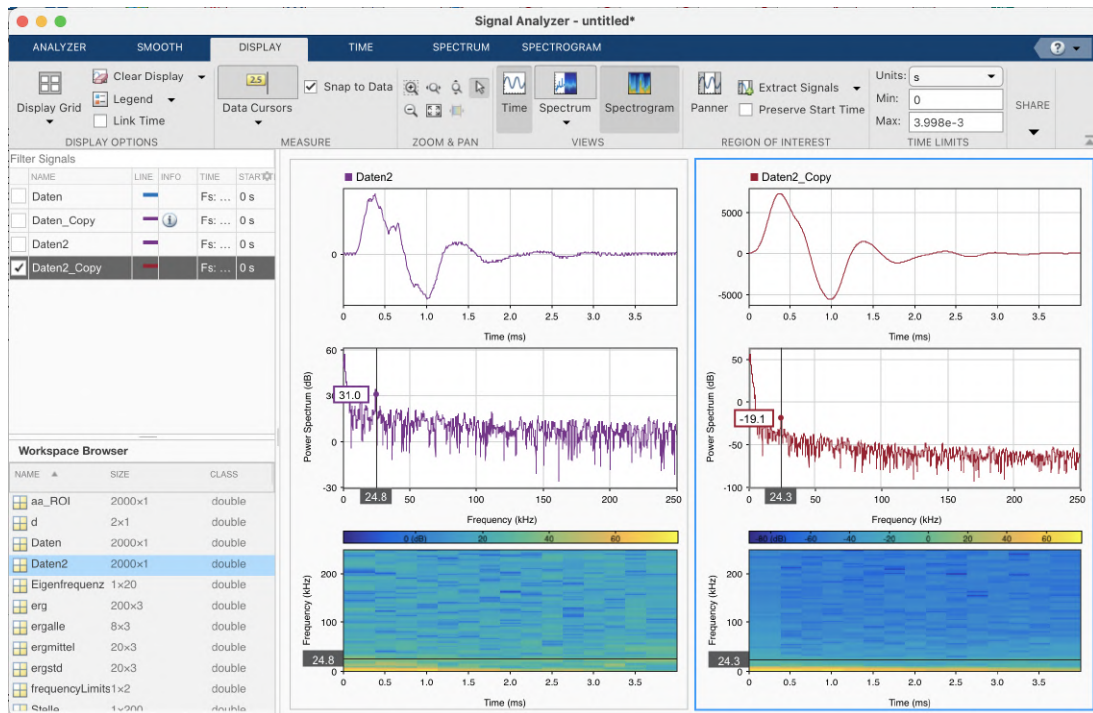


Abbildung 19: Filtern des Rohsignals mit der Matlab App Signal Analyzer

neuen Werte wurden für alle zehn Messungen eines Setups an jedem Huf gemittelt und die Standardabweichung berechnet.

$$f = 1/T \quad (8)$$

Anschließend wurde für jede Messung die maximale Beschleunigung ausgerechnet und gespeichert, da diese die größte Aussagekraft bietet für die Absorptionseigenschaften der Beschlagsvarianten, durch welche die Belastungen gedämpft an die Hufwand übertragen werden. Anders als bei den Probemessungen wurde der Zeitpunkt, bei welchem 90 % der Schwingung gedämpft wurde, nicht berechnet, da dieser keine Aussagekraft über die Absorptionseigenschaften der Beschlagsvarianten hat. Zusätzlich waren die aufgezeichneten Beschleunigungen bei den Messungen mit Hufschuhen so gering, dass diese bereits nach einer Schwingungsperiode auf 0 g fielen.

Zusammen mit den Signalverläufen wurden die Ergebnisse von alle 10 Messungen der verschiedenen Beschlagsvarianten der fünf Hufe gemittelt und die Standardabweichung bestimmt. Die Ergebnisse wurden anschließend in verschiedenen Graphen und Tabellen dargestellt und interpretiert.

5.7 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde mit 'Microsoft Excel für Mac' (Microsoft, Washington, Vereinigte Staaten) durchgeführt. Zum Nachweis, ob eine Normalverteilung der Messungen der einzelnen Beschlagsvarianten gegeben ist wurde der Shapiro-Wilk-Test angewandt, ein statistischer Signifikanztest, der für kleine Stichproben geeignet ist. Dabei wird überprüft, ob die der Stichprobe zugrunde liegende Grundgesamtheit normalverteilt ist. Die Nullhypothese H_0 nimmt dabei an, dass eine Normalverteilung der Grundgesamtheit vorliegt und die Hypothese H_1 nimmt an dass die Grundgesamtheit nicht normalverteilt ist [37].

Für den Test wurden maximalen Beschleunigungen und die errechneten Frequenz als Parameter verwendet. Es wurde zum einen die jeweiligen Ergebnisse der Beschlagsvarianten von allen fünf Hufen zusammengefasst und zum anderen die Ergebnisse der zehn Messungen von einem Huf auf die Normalverteilung derer Grundgesamtheit getestet. Für die statistische Auswertung der Ergebnisse wurde der Wert der maximalen Beschleunigung und die Frequenz herangezogen, da diese die größte Aussagekraft über den Vergleich der Absorptionseigenschaften der Beschläge zeigt.

H_0	die Grundgesamtheit ist normalverteilt
H_1	die Grundgesamtheit ist nicht normalverteilt

Tabelle 1: Nullhypothese und Gegenhypothese

Das Signifikanzniveau wurde für den Shapiro-Wilk-Test wurde wie folgt festgelegt:

$\alpha > 0,05$	nicht signifikant
$\alpha < 0,05$	signifikant

Tabelle 2: Festgelegtes Signifikanzniveau

Des weiteren wurde kein t-Test durchgeführt, da es keine Messdaten eines validierten Systems gibt gegen welche getestet werden kann. Auch gibt es keinen Mittelwert der Grundgesamtheit gegen welchen man die Signifikanz der Stichprobe testen kann.

6 Ergebnisse

Die aufgezeichneten Daten wurden mit Matlab weiterverarbeitet und dargestellt, sodass die Frequenz und die maximale Amplitude der Messungen verglichen werden können.

6.1 Probemessungen

Um einen Überblick zu bekommen, welche Auswirkungen verschiedene Kontaktstellen auf die Kraftübertragung haben wurden die vier verschiedenen Stellen ausgewählt, welche in der Abbildung 15 zu sehen sind. Alle Daten wurden dabei mit einer Sampling-Frequenz von 500 kHz aufgezeichnet.

In Abbildung 20 a sieht man die Messung, bei welcher mit dem Hammer auf den Zehenbereich des Hufeisens geklopft wurde. Es gibt einen steilen Anstieg der Schwingung, wobei die maximale Beschleunigung bei 102,299 g liegt. Die Schwingungsperiode hat eine Dauer von 1,39 ms. Die daraus resultierende Frequenz der Schwingung liegt bei 719,42 Hz. Der Anstieg der Schwingung in Abbildung 20 b, als mit dem Hammer auf die Sohle des Hufs geklopft wurde, deutlich flacher. Die Dauer der ersten Periode der Schwingung liegt bei 3,8 ms, die maximale Beschleunigung liegt bei 94,49 g und die Frequenz ist 263,16 Hz.

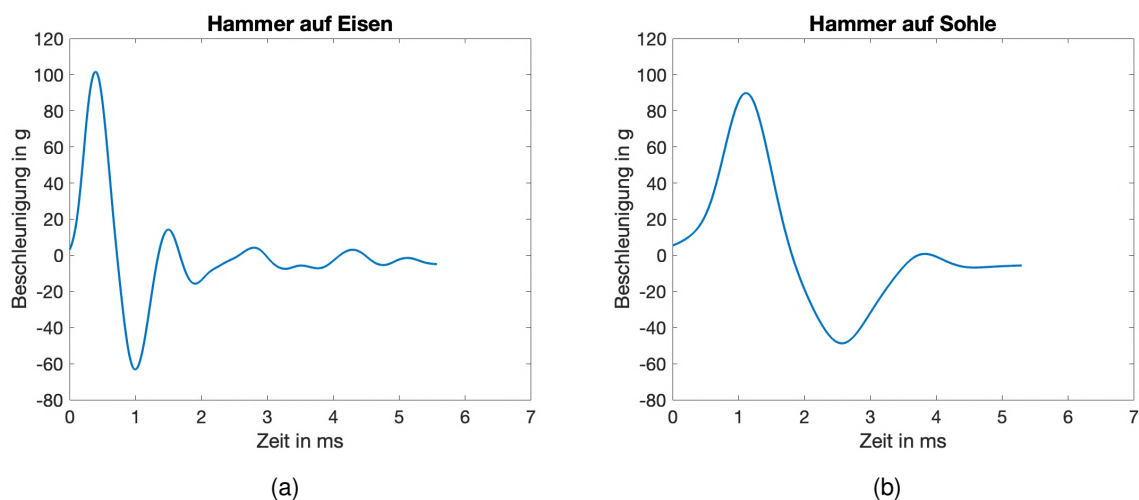


Abbildung 20: Zu vergleichende Probemessungen 1

Für die Ergebnisse der Schwingungen, welche in Abbildung 21 zu sehen sind, wurde einmal nur ein leichter Schlag mit dem Hammer auf das Eisen ausgeübt und einmal ein starker. Im Graphen a sieht man eine Schwingung, deren maximale Beschleunigung bei 50,87 g liegt, die Periodendauer der ersten Periode bei 1,25 ms und die daraus resultierende Frequenz beträgt 800 Hz. Bei der Schwingung im Graphen b liegt die maximale Beschleunigung bei 210,01 g. Die Schwingung hat eine große Amplitude und ist erst nach 4,5 ms abgeklungen. Ihre anfängliche Periodendauer liegt bei 2,09 ms und ihre Frequenz bei 478,47 Hz.

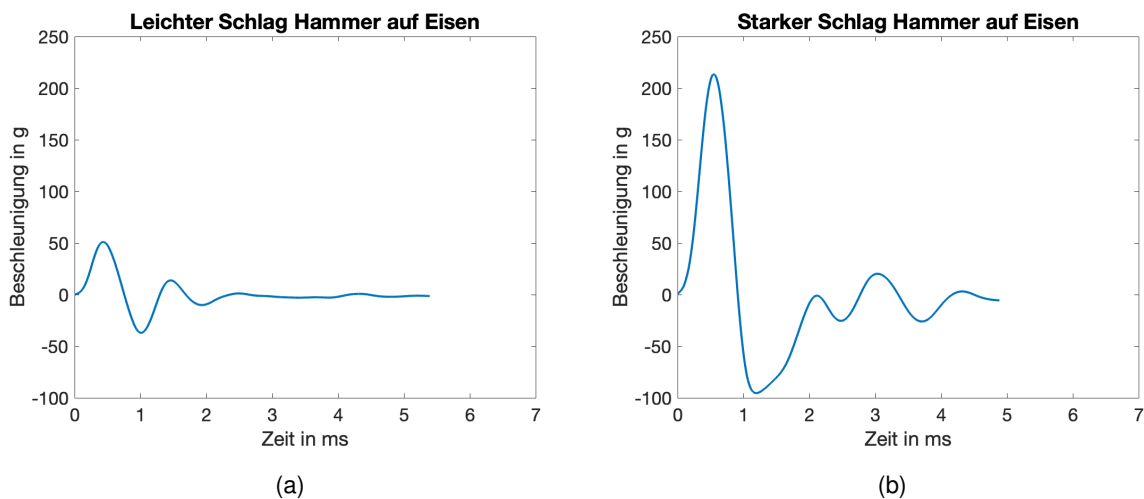
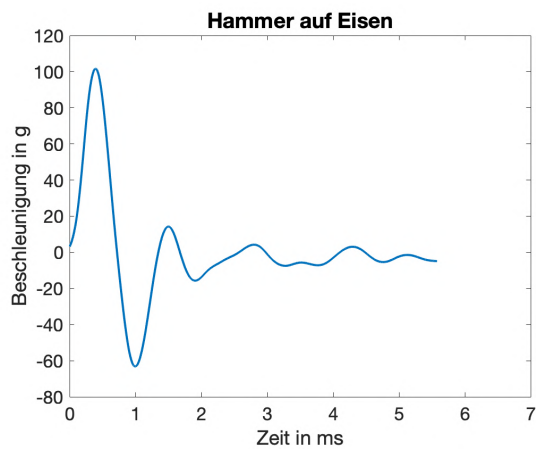


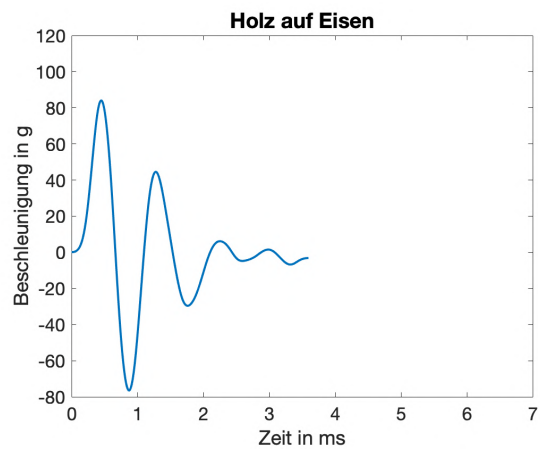
Abbildung 21: Zu vergleichende Probemessungen 2

Für die Schwingungen in Abbildung 22 a wurde einmal mit dem Hammerkopf auf das Hufeisen im Zehenbereich geklopft und einmal mit dem Holzstiel des Hammers. Am ersten Hochpunkt hat die Schwingung des linken Graphen nach einem raschen Anstieg eine Beschleunigung von 102,30 g. Nach 6 ms ist die Schwingung dann abgeklungen, wobei die erste Periodendauer bei 1,39 ms liegt. Im Graphen b liegt die maximale Beschleunigung bei 84,37 g, die Periodendauer der ersten Periode bei 1,06 ms und ihre Frequenz bei 943,40 Hz.

Die Abbildung 23 zeigt im Graphen a nochmals die aufgezeichnete Schwingung als mit dem Holzstiel des Hammers auf das Hufeisen im Zehenbereich des Hufes geklopft wurde. Im Graphen b ist die Schwingung zu sehen, welche aufgezeichnet wurde als mit dem Holzstiel auf ein Ende des Hufeisens geklopft wurde. Die Beschleunigung geht dabei zuerst in den negativen Bereich, sodass die maximale positive Beschleunigung von 15,33 g erst bei 1 ms auftritt. Die Periodendauer liegt bei 0,65 ms und die daraus resultierende Frequenz der Schwingung liegt bei 1538,46 Hz.

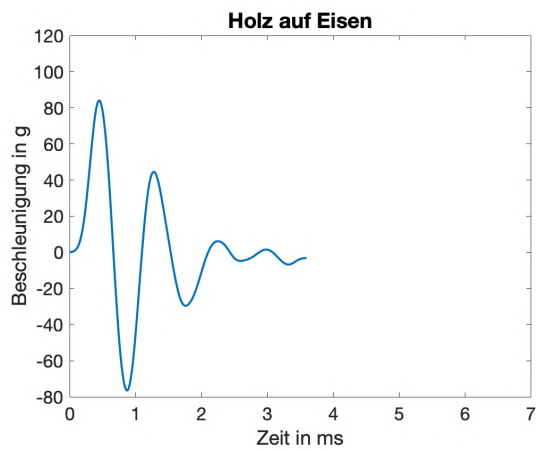


(a)

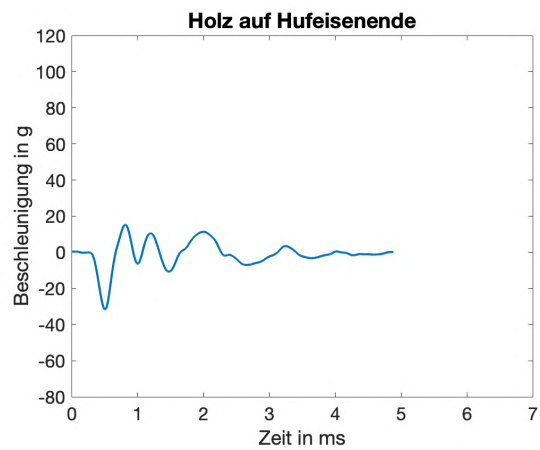


(b)

Abbildung 22: Zu vergleichende Probemessungen 3



(a)



(b)

Abbildung 23: Zu vergleichende Probemessungen 4

Die Frequenzen der Probemessungen liegen zwischen 263,16 Hz und 1538,46 Hz. Die niedrigste Frequenz zeigt die Messung, bei welcher mit dem Hammer auf die Sohle des Hufes anstelle des Eisens geschlagen wurde. Dagegen tritt die höchste Frequenz auf als mit dem Hammer auf das Hufeisenende geschlagen wurde. Die Periodendauer der Messungen schwanken zwischen 0,65 ms und 3,8 ms. Wobei der Schlag mit dem Hammer auf die Sohle des Hufes die Schwingung mit der deutlich längsten Periodendauer ausgelöst hat.

Tabelle 3: Frequenz, Maximale Beschleunigung und Periodendauer der zu vergleichenden Probemessungen

	Hammer auf Eisen	Hammer auf Sohle	Leichter Schlag Hammer auf Eisen	Starker Schlag Hammer auf Eisen	Holz auf Eisen	Holz auf Hufeisende
Frequenz [Hz]	719,42	263,16	800	478,47	943,40	1538,46
Max. Beschleunigung [g]	102,30	94,49	50,87	210,01	84,37	15,33
Periodendauer [ms]	1,39	3,8	1,25	2,09	1,06	0,65

6.2 Hauptmessungen

Die Ergebnisse der Hauptmessungen der fünf vermessenen Hufe wurden je nach Messung in einem eigenen Graphen dargestellt. Für einen Überblick wurde zusätzlich noch alle Messungen von Huf 1 in einem Graphen dargestellt.

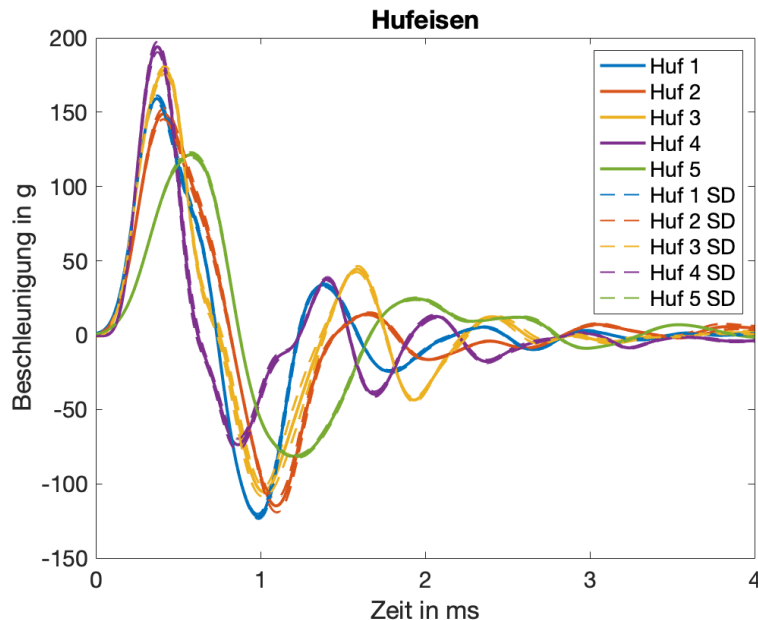


Abbildung 24: Gemittelte Verläufe mit der Standardabweichung der 10 Wiederholungen der Hufeisen Messungen

In Abbildung 24 sind die aufgezeichneten und gemittelten Schwingungen der fünf verschiedenen Hufe mit einem Eisenbeschlag zu sehen. Alle fünf Schwingungen zeigen dabei anfangs eine sehr hohe positive Beschleunigung auf, wobei Huf 4 mit 194,32 g die höchste positive Beschleunigung hat. Auch zeigen alle Hufe bis auf Huf 5 einen ähnlich steilen Anstieg der Beschleunigung, bevor sie in unterschiedlichen positiven Maxima enden. Huf 5 zeigt einen geringeren Anstieg und ebenfalls ein geringeres Maximum.

Nach dem Auftreten der maximalen Beschleunigungen zeigen die Schwingungen einen ähnlichen Abfall an, wobei auffällt, dass Huf 4 mit der höchsten positiven Beschleunigung die niedrigste negative Beschleunigung anzeigt. Auch tritt die maximale negative Beschleunigung deutlich früher auf. Im Gegensatz dazu lässt sich erkennen, dass Huf 5 langsamer schwingt, sowohl das positive als auch das negative Maximum treten später als die restlichen Maxima auf. Huf 1 mit einer mittleren positiven Beschleunigung zeigt die höchste negative Beschleunigung auf.

In Abbildung 25 sind die auftretenden, gemittelten Beschleunigungen der fünf vermessenen Hufe ohne Beschlag zu sehen. Während Huf 1, 2 und 5 ein ähnliches positives Maximum von 42,66 g, 40,70 g und 39,88 g haben, zeigt Huf 4 ein deutlich höheres und Huf 3 ein deutlich niedrigeres Maximum von 60,39 g und 27,54 g an. Auch startet die Schwingung von Huf 3 nicht bei 0 g und zeigt kein negatives Maximum auf, die Schwingung zeigt nach einem Ausschlag keine

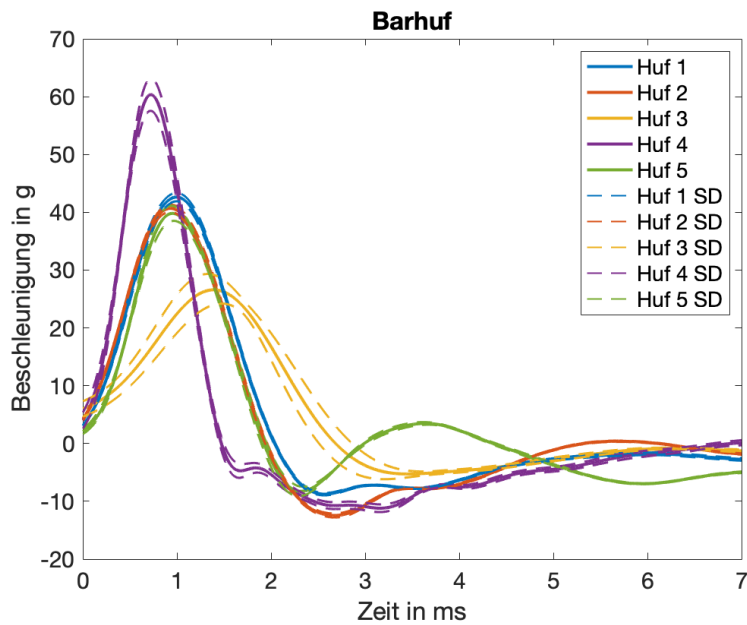


Abbildung 25: Gemittelte Verläufe mit der Standardabweichung der 10 Wiederholungen der Barhuf Messungen

nennenswerten Beschleunigungen mehr an. Einzig Huf 5 lässt noch ein deutliches negatives Maximum und eine weitere Schwingungsperiode erkennen.

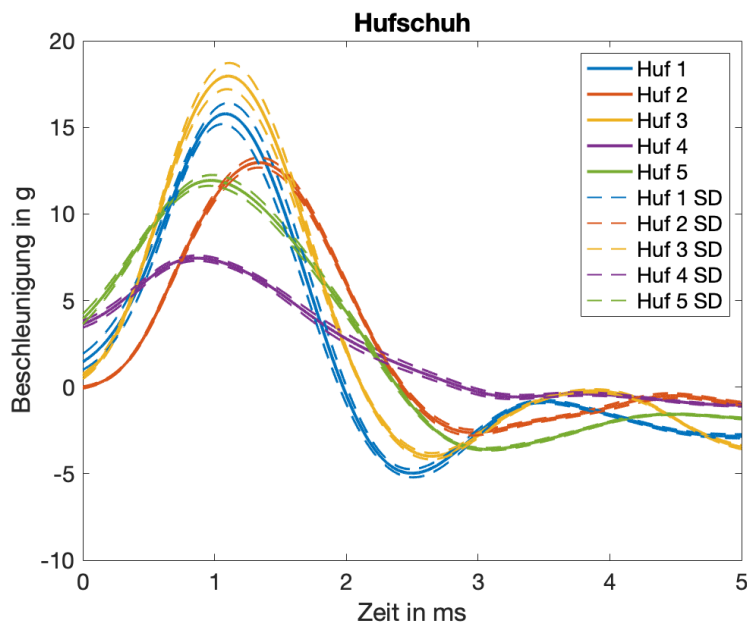


Abbildung 26: Gemittelte Verläufe mit der Standardabweichung der 10 Wiederholungen von der Hufschuh Messung

In der Abbildung 26 sind die gemittelten Ergebnisse der 10 Messungen der fünf, mit Hufschu-

hen ausgestatteten, Hufe zu sehen. Ausschließlich die Schwingung von Huf 2 beginnt bei 0 g, während die vier anderen gemittelten Messungen irgendwo zwischen 0 und 5 g starten. Bei Huf 4 wurden die geringsten positiven Beschleunigungen gemessen, mit ebenfalls nur einem Ausschlag bevor die Kurve auf 0 g fällt.

Die größte positive Beschleunigung, mit 17,97 g, zeigt die Schwingung in Huf 3, wobei die Schwingung von Huf 1 die größte negative Beschleunigung aufzeigt. Allgemein treten die positiven Maxima der Schwingungen 2 ms nach Beginn der Kurve auf, die negativen Maxima treten zwischen 3 und 5 ms danach auf. Die Schwingungen von Huf 2 und Huf 5 zeigen ähnliche Verläufe mit nicht zu erkennenden negativen Maxima.

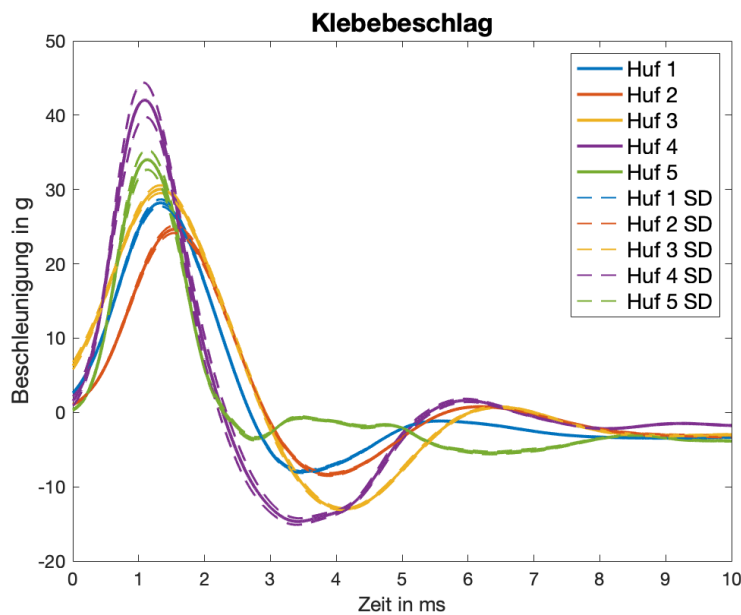


Abbildung 27: Gemittelte Verläufe mit der Standardabweichung der 10 Wiederholungen von der Klebebeschlag Messung

In Abbildung 27 sind die gemittelten Schwingungen der 10 Messungen der fünf Hufe mit appliziertem Klebebeschlag abgebildet. Die Kurven starten zwischen 0 g und 5 g, bis auf die Schwingung von Huf 3, welche mit einer höheren Beschleunigung als 5 g startet. Die größte positive als auch negative Beschleunigung zeigt die Kurve von Huf 4 mit 42,24 g. Die positiven Maxima aller Kurven treten 1 bis 2 ms nach Beginn der Kurven auf, wogegen die negativen Maxima nach 3 bis 4 ms auftreten. Während die Kurven von Huf 1, 2, 3 und 4 einen weiteren Hochpunkt aufzeigen, bevor sie sich bei 0 g einpendeln, lässt die Kurve von Huf 5 keine regelmäßige Schwingung erkennen. Bei dem auftretenden negativen Maximum nach dem positiven Maximum handelt es sich lediglich um ein lokales negatives Maximum. Erst bei 6 ms lässt sich das globale negative Maximum erkennen, während zu diesem Zeitpunkt die anderen Kurven einen weiteren Hochpunkt erreicht haben. Anschließend pendelt sich die Schwingung wie bei den anderen Kurven bei 0 g ein.

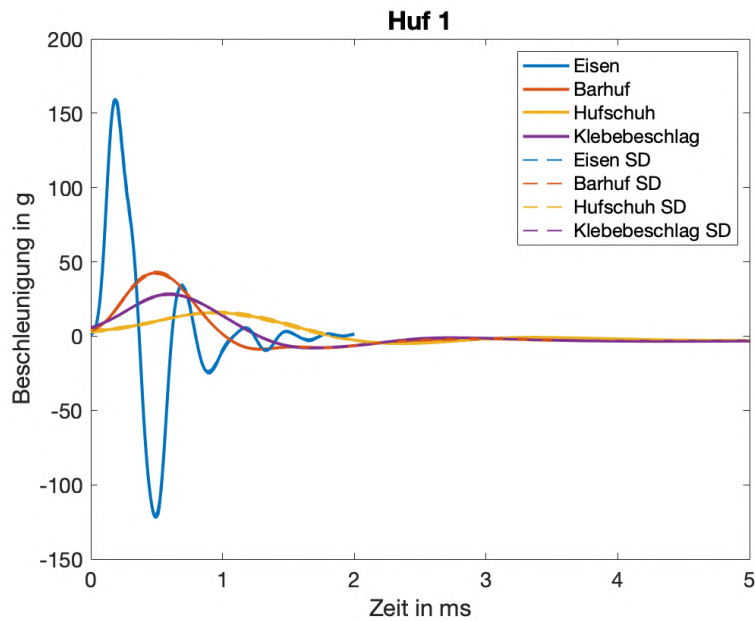


Abbildung 28: Gemittelte Verläufe mit der Standardabweichung der 10 Messungen eines Hufes für alle Beschlagsvarianten

Um die Kurven der verschiedenen Beschläge unter dem gleichen Maßstab vergleichen zu können, wurden in Abbildung 28 alle gemittelten Messungen für Huf 1 abgebildet.

Zu erkennen ist, dass das auftretende Maximum beim Hufeisen dreimal so hoch ist wie bei den Kurven von Barhuf oder Hufschuh, und bereits sehr früh auftritt. Die Messungen von Barhuf und Klebebeschlag haben dagegen beide einen ähnlichen Verlauf mit ähnlichen positiven und negativen Maxima. Auch ist die Periodendauer vergleichbar, da das positive Maximum beide bei etwa 1 ms auftreten und das negative Maximum zwischen 2 und 4 ms. Der Hufschuh zeigt die längste Periodendauer, sein positives Maximum tritt erst nach 2 ms auf und ein negatives Maximum ist nicht erkennbar bevor die Beschleunigungen auf 0 g fallen. Die errechnete Periodendauer aus der halben Periode liegt bei 6,8 ms. Einzig die Kurve des Eisenbeschlags zeigt mehrere Schwingungsperioden auf, welche innerhalb von 4 ms auf 0 g fallen. Die gemittelte Periodendauer liegt dabei bei 1,4 ms.

Tabelle 4: Gemittelte maximale Beschleunigungen der Hauptmessungen

Max Beschl. [g]	Huf 1	Huf 2	Huf 3	Huf 4	Huf 5
Hufeisen	159,13 ± 4,36	148,97 ± 7,25	178,37 ± 5,41	194,32 ± 7,18	121,32 ± 3,30
Barhuf	42,66 ± 1,46	40,70 ± 1,26	27,54 ± 5,24	60,39 ± 5,63	39,88 ± 2,61
Hufschuh	15,90 ± 1,20	12,97 ± 0,58	17,97 ± 1,51	7,47 ± 0,30	11,95 ± 0,64
Klebebeschlag	28,21 ± 0,92	24,65 ± 0,99	30,04 ± 1,058	42,24 ± 4,67	34,02 ± 2,69

Die Tabelle 4 zeigt die gemittelten Ergebnisse mit der Standardabweichung für die maximale Beschleunigung. Bei der maximalen Beschleunigung kann man deutliche Unterschiede zwischen dem Hufeisen und den anderen Beschlagsvarianten erkennen. Alle Werte liegen dabei über 100 g, wogegen die alle anderen Werte zum Teil weit unter 60 g liegen. Die maximalen Beschleunigungen beim Hufschuh liegen bei allen 5 Hufen zwischen 15,90 g und 7,47 g.

Die Ergebnisse von Barhuf und Klebebeschlag ähneln sich am stärksten. Jedoch sind, mit Ausnahmen von Huf 3, die Ergebnisse vom Klebebeschlag immer etwas niedriger als die der Barhuf Messung.

Vergleicht man jetzt die Ergebnisse von Huf 1 und Huf 2 sieht man, dass Huf 1 bei allen Beschlagsvarianten einen höheren Wert aufweist. Huf 4 dagegen weist bei Hufeisen, Barhuf und Klebebeschlag die höchsten Werte auf, beim Hufschuh jedoch den mit Abstand niedrigsten Wert von 7,47 g.

Tabelle 5: Gemittelte Periodendauer der Hauptmessungen

Periodendauer [ms]	Huf 1	Huf 2	Huf 3	Huf 4	Huf 5
Hufeisen	1,4 ± 0,02	1,6 ± 0,03	1,5 ± 0,06	1,1 ± 0,06	1,7 ± 0,03
Barhuf	3,8 ± 0,05	3,8 ± 0,02	5,3 ± 0,64	2,9 ± 0,11	3,8 ± 1,22
Hufschuh	6,8 ± 0,42	9,1 ± 0,18	7,6 ± 0,70	10,6 ± 1,2	8,9 ± 1,52
Klebebeschlag	4,8 ± 0,07	5,5 ± 0,04	5,7 ± 0,46	4,2 ± 1,91	4,2 ± 1,05

Die gemittelte Periodendauer der Schwingungen ist in der Tabelle 5 zu sehen. Es lässt sich klar erkennen dass die Periodendauer beim Hufeisen bei allen vier Hufen am kürzesten ist. Sie schwankt zwischen 1,1 ms und 1,7 ms. Die längste Periodendauer zeigen dagegen Hufschuhe von Swiss Galoppers (siehe Kapitel Hufschuh). Die Periodendauer schwankt dabei zwischen 6,8 ms und 10,6 ms.

Auffallend ist ebenfalls, dass die Standardabweichungen bei einzelnen Messungen mit Huf 4 und Huf 5 deutlich höher sind als bei den anderen Hufen. So zeigen Huf 1, 2 und 3 die höchsten Standardabweichungen bei den Hufschuhen, mit 0,42, 0,18 und 0,70. Die größte Standardabweichung bei Huf 5 zeigt sich ebenfalls beim Hufschuh, liegt aber mit 1,52 deutlich über dem Wert der anderen Messungen. Bei Huf 4 tritt die größte Standardabweichung beim Klebebeschlag auf mit einem Wert von 1,91.

Tabelle 6: Gemittelte Frequenzen der Hauptmessungen

Frequenz [Hz]	Huf 1	Huf 2	Huf 3	Huf 4	Huf 5
Hufeisen	690,71 ± 11,70	627,38 ± 12,16	706,25 ± 31,07	893,12 ± 49,49	596,15 ± 10,74
Barhuf	260,76 ± 3,32	259,33 ± 2,18	190,57 ± 23,15	341,46 ± 15,80	270,57 ± 8,66
Hufschuh	150,64 ± 8,85	106,83 ± 2,18	132,98 ± 15,80	95,80 ± 12,78	111,21 ± 1,91
Klebebeschlag	210,65 ± 3,12	182,85 ± 1,33	174,86 ± 11,85	242,04 ± 11,23	237,29 ± 5,85

Die gemittelten Frequenzen der Messungen sind in der Abbildung 29 zu sehen. Die genauen Werte sind dabei in der Tabelle 6 einzusehen. Sie unterscheiden sich je nach Hufbeschlag. Auch sind die gemittelten Frequenzen einer Hufbeschlagsvariante bei jedem vermessenen Huf unterschiedlich. So treten die höchsten Frequenzen bei allen Hufen beim Hufeisen auf. Sie liegen dabei zwischen 596,15 Hz und 893,12 Hz. Der Bereich, in welchem sich die Frequenzen bei Barhuf und den Klebebeschlag befinden, überschneidet sich leicht wobei die Frequenzen beim Klebebeschlag niedriger sind. Die höchste Frequenz beim Klebebeschlag liegt mit 242,04 Hz bei Huf 4 vor und die niedrigste Frequenz der Barhuf Messung liegt bei Huf 3 vor, mit 190,57 Hz.

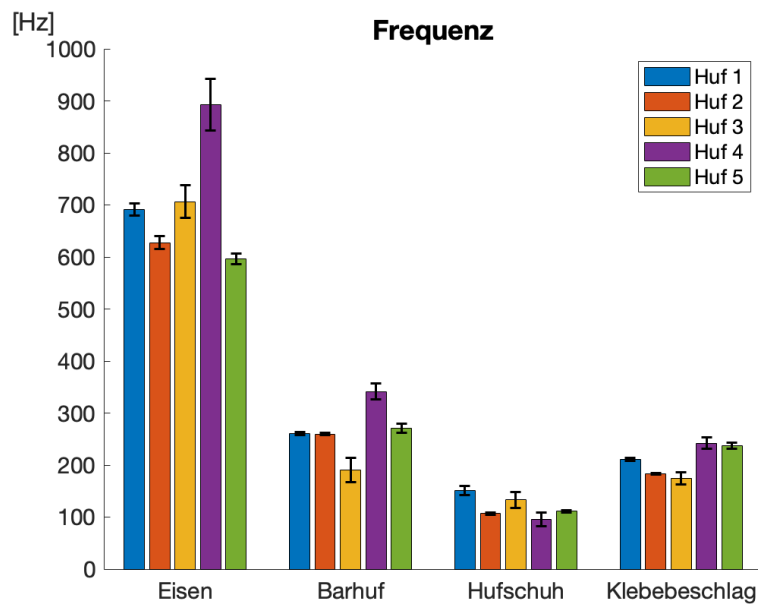


Abbildung 29: Gemittelte Frequenzen mit der Standardabweichung der Hauptmessungen

6.3 Statistische Ergebnisse

Mithilfe des Shapiro-Wilk-Test wurden alle Messungen der fünf Hufe von einer Beschlagsvariante auf die Normalverteilung der zugrundeliegenden Grundgesamtheit geprüft, mithilfe der Parameter der maximalen Beschleunigung und der Frequenz. Für den ersten Test wurden die Ergebnisse von jeder Beschlagsvariante von allen fünf Hufen auf die Normalverteilung ihrer Grundgesamtheit überprüft. Die Nullhypothese H_0 und Gegenhypothese H_1 sind in 1 nachzulesen. Wie in der Tabelle 7 zu sehen, liegt der P-Wert für Hufeisen für die Parameter der maximalen Beschleunigung bei 0,53 %, der P-Wert für Barhuf bei 0,09 %, der P-Wert für Hufschuh bei 0,42 % und der P-Wert für Klebebeschlag bei 0,01 %.

Hufeisen	P-Wert = 0,53 %	H_0 wird verworfen
Barhuf	P-Wert = 0,09 %	H_0 wird verworfen
Hufschuh	P-Wert = 0,42 %	H_0 wird verworfen
Klebebeschlag	P-Wert = 0,01 %	H_0 wird verworfen

Tabelle 7: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test für die gemessenen Beschlagsvarianten an den fünf Hufen

Für die Ergebnisse in der Tabelle 8 wurden dagegen jeweils die zehn Messungen einer Beschlagsvariante an einem Huf auf die Normalverteilung der Grundgesamtheit für die Parameter der maximalen Beschleunigung geprüft. Bei Hufeisen kam dafür ein P-Wert von 49,7 % heraus, der P-Wert für Barhuf liegt bei 50,36 %, der P-Wert für Hufschuh bei 48,80 % und der P-Wert für Klebebeschlag bei 64,01 %.

Hufeisen	P-Wert = 49,70 %	H_0 wird angenommen
Barhuf	P-Wert = 50,36 %	H_0 wird angenommen
Hufschuh	P-Wert = 48,80 %	H_0 wird angenommen
Klebebeschlag	P-Wert = 64,01 %	H_0 wird angenommen

Tabelle 8: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test des Parameters der maximalen Beschleunigung für die gemessenen Beschlagsvarianten an Huf 1

Die errechneten Frequenzen der einzelnen Messungen wurden ebenfalls mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests auf die Normalverteilung ihrer Grundgesamtheit hin untersucht. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 9 zu sehen. Es wurden ebenfalls wieder jeweils die zehn Messungen einer Beschlagsvariante an einem Huf auf die Normalverteilung der Grundgesamtheit für die Frequenzen geprüft. Bei Hufeisen kam dafür ein P-Wert von 43,45 % heraus, der P-Wert für Barhuf liegt bei 30,05 %, der P-Wert für Hufschuh bei 50,97 % und der P-Wert für Klebebeschlag bei 27,22 %.

Hufeisen	P-Wert = 43,45 %	H ₀ wird angenommen
Barhuf	P-Wert = 30,05 %	H ₀ wird angenommen
Hufschuh	P-Wert = 50,97 %	H ₀ wird angenommen
Klebebeschlag	P-Wert = 27,22 %	H ₀ wird angenommen

Tabelle 9: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test des Parameters der Frequenz für die gemessenen Beschlagsvarianten an Huf 1

7 Diskussion

Die mit Matlab ausgewerteten Ergebnisse und Schwingungsverläufe werden im folgenden Kapitel analysiert und interpretiert.

7.1 Probemessungen

Da es sich um Probemessungen handelt, sind die genauen Werte der Ergebnisse nicht zu vergleichen. Lediglich die Form der Signale kann für eine Interpretation herangezogen werden. Die aufgebrachte Kraft, welche den Huf in Schwingung versetzt hat, wurde durch keinen genau reproduzierbaren Mechanismus aufgebracht und schwankt in einem gewissen nicht einzuschätzenden Maß.

Wenn man die Messungen vergleicht, bei welchen einmal mit dem Hammer auf die Sohle des Hufes geklopft wurde und einmal auf das Hufeisen im Zehenbereich, kann man deutliche Unterschiede erkennen (siehe Abbildung 20). Diese Unterschiede zeigen sich jedoch nicht in den genauen Werten der maximalen Beschleunigung (siehe Tabelle 3), da der Schlag mit dem Hammer auf die Sohle des Hufes deutlich stärker ausgeführt wurde, damit der Sensor eine erkennbare Schwingung aufzeichnet. Trotz des stärkeren Schlags wurde an der Hufwand nur eine Schwingungsperiode aufgezeichnet, was daran liegt, dass der Schlag durch die verschiedenen Strukturen des Hufes gedämpft an den Sensor weiter gegeben wird. Ebenfalls führt die veränderte Position dazu, dass die der größte Teil der Kraft nicht auf die harte Hufwand und somit indirekt auf den Sensor wirkt, sondern auf die inneren Strukturen des Hufes. Das Hufbein wird leicht gestreckt und durch die tiefe Beugesehne sofort wieder neu positioniert. Dadurch wurde auch keine weitere Schwingung an die Hufwand und somit an den Sensor weitergeleitet.

Im linken Graphen der Abbildung 20 kann man dagegen erkennen, wie die Schwingung langsam abklingt. Auch schwingt der Huf dabei in einer höheren Frequenz, von 719,42 Hz, als im rechten Graphen, was daran liegt, dass die auf den Huf wirkende Kraft direkt durch das harte Material des Eisens an die Hufwand und damit den Sensor weitergegeben wurde. Man kann also mit dem Messaufbau die Schwingungsunterschiede von einem beschlagenen und einem unbeschlagenen Huf erkennen, jedoch ist es für den Hintergrund der Messung nicht hilfreich die Kraftübertragung des Pendels auf den Sohlebereich des Hufes zu legen. Zum einen muss eine sehr hohe Kraft aufgebracht werden um verwertbare Ergebnisse zu erzielen, wobei diese durch die vielen Störfaktoren der inneren Strukturen des Hufes schwer zu interpretieren wären. Zum anderen liegen das Hufeisen und der Klebebeschlag nur am Tragrand des Hufes auf dem

Huf auf.

Für die Ergebnisse der Graphen in Abbildung 21 wurde einmal ein leichter Schlag mit dem Hammer auf das Hufeisen ausgeübt und einmal ein starker. Im linken Graph ist deshalb nur eine leichte Schwingung zu sehen, welche nach zwei Perioden komplett gedämpft wurde. Da bei den Messungen mit Hufeisen die größten Schwingungen erwartet werden, ist es nicht sinnvoll eine so kleine Kraft zu nutzen, da zum Beispiel der Hufschuh diese komplett abdämpfen könnte, ohne dass der Sensor verwertbare Daten aufzeichnet. Im rechten Graph wurde dagegen eine sehr viel größere Schwingung ausgelöst, welche erst nach drei Schwingungsperioden vollständig gedämpft wurde. Auch ist die Schwingung sehr ungleichmäßig im Gegensatz zur linken Schwingung, was daran liegen könnte, dass mit dem starken Schlag nicht nur die Hufwand in Schwingung versetzt wurde, sondern auch das Hufgelenk belastet wurde und dessen Bewegung in die aufgezeichneten Daten mit hineinspielt. Dementsprechend wurde bei der Dimensionierung des Pendels für die Hauptmessungen darauf geachtet, dass ebenfalls keine zu großen Kräfte auf den Huf wirken, damit man sich bei diesen Messungen auf die Vibrationen in der Hufwand konzentrieren kann. Für kommende Studien können in weiterer Folge auch größere Kräfte gewählt werden.

In der Abbildung 22 kann man die Schwingung sehen, welche einmal von einem Hammer ausgelöst wurde und einmal von dem Holzstiel des Hammers. Dabei fällt auf, dass die durch den Holzstiel ausgelöste Schwingung im rechten Graphen sehr viel gleichmäßiger schwingt, als die Schwingung im linken Graphen. Obwohl im linken Graphen eine hohe Spitzenbeschleunigung von 102,30 g auftritt, wird die Schwingung bereits nach dem ersten Hochpunkt deutlich gedämpft. Wogegen die Schwingung vom Holzstiel sowohl eine geringere maximale Beschleunigung von 84,37 g hat, als auch in einer geringeren Frequenz schwingt. Sie wird erst nach der zweiten Periode deutlich gedämpft. Das lässt darauf schließen, dass der Mechanismus des Hufes Schwingungen mit hohen Spitzenbeschleunigungen besser dämpfen kann als Schwingungen mit geringeren Spitzenbeschleunigungen. Es wurde also für das Pendel ein sehr steifes Material gewählt, damit ähnliche Schwingungen simuliert werden, die auftreten wenn das Pferd auf einem harten Boden wie Asphalt läuft. Die hohen Beschleunigungen, die dabei in der Hufwand auftreten, sowie deren Dämpfung sollen mit der Simulation erfasst werden [2].

In der Abbildung 23 kann man deutliche Unterschiede zwischen den Graphen erkennen. Besonders sticht heraus, dass beim rechten Graph die Schwingung erst in die negative Beschleunigung geht. Das liegt daran, dass die Kraftübertragung am Hufeisenende stattgefunden hat und durch die Beweglichkeit des Hufgelenks wurde dieses nach hinten bewegt. Die Spitze des Hufeisens, welche nah am Sensor liegt, wurde dabei nach vorne bewegt, was die negative Richtung ist in welche der Sensor misst. Dementsprechend wurden zu Anfang eine negative Beschleunigung aufgezeichnet. Durch die Beweglichkeit des Hufgelenks tritt keine hohe Beschleunigung auf, jedoch schwingt der Huf in einer höheren Frequenz als bei anderen Messungen. Eine Periode dauert lediglich 0,65 ms, wohingegen die Schwingungsperiode

bei einem Schlag mit dem Holzstiel auf das Hufeisen 1,06 ms dauert. Wenn man die Schwingungsverläufe vergleicht fällt ebenfalls auf, dass die Schwingung im rechten Graphen sehr viel ungleichmäßiger ausfällt. Besonders nach der zweiten Schwingungsperiode verläuft die Kurve trotz filtern sehr un stetig. Darum ist es sinnvoller, bei den finalen Messungen den Schlag möglichst an der Spitze des Hufeisens zu setzen, da der Sensor auch in unmittelbaren Nähe platziert ist, obwohl ein gesundes Pferd im Normalfall mit der Ferse zuerst auf den Boden auftritt (Gangbild des Pferdebeins).

7.2 Hauptmessungen

Bei den Hauptmessungen konnte man deutlich erkennen, dass bei allen Beschlagsvarianten die Ergebnisse der fünf verschiedenen Hufe sehr unterschiedlich ausfallen, was auch durch die Statistik bestätigt wird (siehe Kapitel Statistische Auswertung). Das liegt daran, dass jedes Pferd anatomisch etwas unterschiedlich ist und dementsprechend auch anders auf Belastungen reagiert. Gut zu sehen ist das beim Hufeisen, bei welcher Huf 4 die höchste Beschleunigung von 194,318 g aufzeigt, wohingegen Huf 5 in einem viel geringeren Ausmaß auf die gleiche Belastung reagiert. Dies ist auch bei den anderen Messungen zu sehen, wobei es beim Hufschuh interessanterweise genau umgekehrt ist. Dort zeigt Huf 4 die geringste maximale Beschleunigung auf, was dafür spricht, dass Hufschuhe den Huf vor Belastungsspitzen schont.

Für ein klareres Messergebnis sollte für die Hufschuhe jedoch eine größere Verstärkung gewählt werden, da die Spannungsdifferenz der Sensordaten zwischen Belastung und Ruhe nicht sehr groß ist und es schwierig ist den genauen Zeitpunkt zu finden, an welchem der Huf Beschleunigung erfährt.

Der Hufmechanismus des Pferdes dämpft vor allem Spitzenbeschleunigungen rasch ab, was im Falle der Hufeisen Messung von Huf 4 geschieht. Die aufgezeichnete Schwingung zeigt zwar die höchste positive Beschleunigung, aber auch dementsprechend die geringste negative Beschleunigung. Auch schwingt jeder Huf bei der Messung mit einer deutlich höheren Frequenz, wobei die Dämpfung des Signals nicht beachtet wird. Der Eisenbeschlag, welcher für die Hufeisen verwendet wurde erhöht nicht nur die Amplitude der Schwingung sondern auch die Frequenz [2]. Da bei Barhuf, Hufschuh und Klebebeschlag keine so hohen Spitzenbelastungen auftreten schwingt der Huf in einer niedrigeren Frequenz und meistens nur für eine Periode, bevor die Beschleunigungen komplett gedämpft werden. Diese Erkenntnis deckt sich ebenfalls mit den Ergebnissen der Studie über die Dämpfungseigenschaften synthetischer Beschläge (siehe Kapitel Untersuchung der Dämpfungseigenschaften von Synthetischen Beschlägen), welche feststellte, dass die Schwingungen unterschiedlicher Beschläge Unterschiede in der Anzahl der Hochpunkte zeigen [2].

Bei den Barhuf Messungen zeigen Huf 1, Huf 2 und Huf 5 anfangs ähnliche Schwingungsverläufe. Es ist also möglich reproduzierbare Schwingungsmessungen durch den Aufbau der Messungen durchzuführen. Das Ergebnis führt aber auch zu der Annahme, dass nicht nur die

anatomischen Eigenschaften der Pferdehufe zu starken Unterschieden bei der Stoßdämpfung führen, sondern auch die Passgenauigkeit der verschiedenen Beschläge einen großen Einfluss hat. Dadurch dass es so schwierig war den Beginn der auftretenden Beschleunigungen beim Hufschuh zu bestimmen und die maximalen Beschleunigungen sehr gering sind, sehen Schwingungen der 5 vermessenen Hufe in der Abbildung 26 sehr unterschiedlich aus.

Man kann aber erkennen, dass trotz der geringen maximalen Beschleunigungen alle Schwingungen eine Periode lang schwingen, bevor sie 8 ms nach der Belastung die Beschleunigungen gedämpft haben und zur Ruhe gekommen sind. Der Wert mit der größten maximalen Beschleunigung wurde beim Hufschuh bei Huf 3 gemessen, mit 17,97 g. Dieser Wert liegt trotzdem noch weit unter dem niedrigsten Wert der Messungen der anderen Beschlagsvarianten, welcher mit 24,65 g beim Klebebeschlag von Huf 2 gemessen wurde. Auch schwingen die Hufe wenn sie mit einem Hufschuh geschützt sind mit einer deutlich geringerer Frequenz. Die Werte liegen alle zwischen 95,80 Hz und 150,64 Hz. Dementsprechend kann man sagen, dass der Hufschuh die Belastungen am stärksten abdämpft bevor sie an der Hufwand ankommen. Dies ist vor allem hilfreich, wenn die Gelenke regelmäßig durch Hochleistungstraining eine Überbelastung erfahren oder bereits durch Erkrankungen vorbelastet sind. Zusätzlich kann der Huf außerhalb des Trainings, auf der Koppel oder im Stall, in seiner natürlichen Form, also Barhuf, belastet werden, was die Gesundheit und die Qualität der Hufe stark verbessert.

Die aufgezeichneten Daten der Klebebeschlag Messung ähneln von den Werten her der Barhuf Messung am meisten. Wenn man den Ausreißer der maximalen Beschleunigung der Barhuf Messung von Huf 4 mit 60,39 g außen vor lässt, liegen alle Werte der Klebebeschlag Messung zwischen den 27,54 g von Huf 3 und den 42,66 g von Huf 1. Auch ist zu erkennen, dass die Werte vom Klebebeschlag immer ein wenig niedriger sind, als bei der Barhuf Messung. Auch die Frequenzen in welchen die Hufe schwingen sind bei allen Hufen beim Klebebeschlag niedriger als bei Barhuf. Man kann also sagen, dass der Klebebeschlag von den mechanischen Eigenschaften der natürlichen Haltung der Pferde entspricht, wobei er zusätzlich natürlich einen Schutz vor Abrieb bildet. Die natürliche Funktion des Hufmechanismus ist, zumindest bei den geringen Belastungen, welche in dieser Studie angewandt wurden, nicht gestört. In der Praxis kann das bedeuten, dass der Klebebeschlag vor allem für Freizeitreiter eine gute Alternative zu den Hufeisen bildet. Bereits in der Studie zu den Dämpfungseigenschaften von synthetischen Beschlägen kam heraus, dass die auftretenden Beschleunigungen bei PU-Schuhen nur halb so groß sind wie bei den Hufeisen [2]. Der Huf wird vor allem auf Asphaltboden vor übermäßigem Abrieb geschützt, da das Material der Klebebeschläge sehr viel abriebresistenter ist wie das weiche Horn des Pferdehufes. Durch seine Elastizität und der Applizierung, ohne eine Nagelung in den Huf, kann der Huf sich ungestört unter Belastung weiten und ist zusätzlich in einem gewissen Maß vor auftretenden Spitzenbeschleunigungen geschützt.

7.3 Statistische Auswertung

Aufgrund der Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests in Tabelle 7 wurden die Nullhypothesen, dass die Grundgesamtheit der Stichproben von allen fünf Hufen normalverteilt ist, widerlegt. Man kann sagen, dass die Ergebnisse der fünf vermessenen Hufe nicht gleich beurteilt werden dürfen, ihnen liegt keine normalverteilte Grundgesamtheit zugrunde. Deshalb sollten sowohl die Ergebnisse, als auch die Schwingungsverläufe für jeden Huf getrennt betrachtet werden.

Nimmt man aber nur die Ergebnisse eines Hufes bekommt man P-Werte, von rund $\pm 50\%$ für den Parameter der maximalen Beschleunigung und P-Werte von etwas weniger als $\pm 50\%$ für die Frequenzen der Stichprobe. Die Grundgesamtheit für jede Beschlagsvariante der Stichproben eines einzelnen Hufes ist also normalverteilt. Betrachtet man jeden Huf für sich ist die Anzahl an Messungen groß genug um ein verwertbares Ergebnis zu erzielen. Die Mittelwerte und gemittelten Verläufe, welche zur Interpretation der Messungen verwendet wurden sind aussagekräftig und können Aufschluss über das Verhalten der Hufe unter Belastung geben. Die Hypothese H_1 kann also angenommen werden

8 Fazit

Das Zehenorgan Huf ist ein sehr komplexes Gebilde. Es besteht aus verschiedenen Strukturen, welche in harmonischem Zusammenspiel großen Belastungen standhalten können. Doch durch die veränderten Beanspruchungen durch den Menschen wird nicht nur der Huf, sondern der ganze Körper des Pferde überbeansprucht. Durch diese Überbeanspruchung kommt es bei vielen Pferden zu Erkrankungen, wie Hufrehe oder Arthrose, sodass die Gelenke nicht mehr stark belastet werden können.

Die Notwendigkeit eines Hufschutzes ist in der Regel unerlässlich. Den meisten Pferden haben deshalb Hufeisen auf ihre Hufe genagelt, die besonders gegen einen übermäßigen Abrieb des Hornmaterials schützen. Jedoch schützt ein Hufeisen nicht die Gelenke der Pferde und die Qualität des Hufes nimmt durch das Einschränken des Hufmechanismus stark ab. Auch erhöhen hochfrequente Schwingungen, welche bei Eisenbeschlügen auftreten, das Risiko einer Schädigung des subchondralen Knochens und des Gelenkgewebes [2]. Aus diesen Gründen steigen immer mehr Pferdebesitzer auf Hufschuhe oder Klebebeschlüge um oder lassen ihr Pferd unbeschlagen, also Barhuf.

Bisher gibt es nur wenige wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit Beschlagsvarianten zur Vorbeugung von Gelenkserkrankungen beschäftigt. Das Ziel dieser Studie ist es gewesen, einen reproduzierbaren Vergleich der Absorptionseigenschaften der verschiedenen Beschlagsvarianten mithilfe eines Prüfstandes zu gewährleisten und Rückschlüsse auf deren Verhalten am lebenden Pferd zu ziehen.

Die Studie hat gezeigt, dass, mithilfe von Hufschuhen und Klebebeschlügen, Spitzenbeschleunigungen an der Hufwand abgefangen werden können. Im Gegensatz dazu zeigen die Messungen mit Hufeisen besonders hohe Spitzenbeschleunigungen. Die Beschleunigungen, welche bei einem Huf ohne Beschlag (Barhuf) auftritt werden also durch Hufeisen verstärkt und durch einen Klebebeschlag oder Hufschuh gedämpft.

Die Ergebnisse der Messungen mit Hufschuhen zeigen dabei die geringsten Spitzenbeschleunigungen. Die aufgebrachte Kraft wird großteils von dem Hufschuh absorbiert. Diese Beschlagsvariante wird aber nur in speziellen Situationen, wie dem Training, auf den Huf gezogen. Der Großteil des Tages verbringt das Pferd Barhuf und der Huf erfährt Vibrationen, welche die natürlichen Funktionen des Hufes ankurbeln, ohne die Strukturen zu überlasten. Der Klebebeschlag absorbiert dagegen nur einen geringen Teil der auf den Huf wirkende Kraft. Da dieser Beschlag aber permanent auf dem Huf befestigt wird ist es wichtig, dass nur ein Teil der Belastungen absorbiert werden, damit die natürliche Huf Funktion erhalten bleibt.

Durch die statistische Auswertung kann angenommen werden, dass sich die aufgezeichneten Messungen dazu eignen Rückschlüsse auf das Verhalten der einzelnen Hufe mit der jeweiligen Beschlagsvariante geben. Die Daten zeigen, dass bei den Hufeisen stärkere maximalen Beschleunigungen auftreten, als bei Messungen ohne einen Hufschutz. Die Schwingungen, die vor allem beim Aufprall des Hufes auf den Boden auftreten können nicht abgefangen werden, da durch die Nagelung des Eisens der Hufmechanismus gestört ist.

Das harmonische Zusammenspiel der Hufstrukturen muss aber Belastungen ausgesetzt sein um zu funktionieren. Durch das Weiten und Zusammenziehen des Hufes unter Belastung wird die Blutzirkulation der unteren Extremitäten der Pferde angeregt. In einer Studie von S. Torvini, et al. [33] über das Vibrationstraining beim Menschen kam es zu einer signifikanten Steigerung der Sprunghöhe, obwohl keine neurogene Steigerung oder Veränderungen in der morphologischen Struktur der Muskeln nachgewiesen werden konnten. Der mechanische Reiz mit niedriger Amplitude und hoher Frequenz wird derzeit als potenziell effiziente Trainingsmethode für die Skelettmuskulatur angesehen, da klinische Studien darauf hindeuten, dass Ganzkörpervibrationen beim Menschen auch die Muskelleistung verbessern können. Auch konnte durch regelmäßig applizierte Vibrationstimulationen die Knochendichte von Schafen innerhalb eines Jahres um 35 % gesteigert werden [31]. Dabei ist zu beachten, dass die Vibrationen durch die harten Hufe der Schafe direkt an die Knochen weiter gegeben werden, während sie bei Pferde eine Dämpfung erfahren bevor sie weiter gegeben werden.

Der wesentliche Unterschied ist aber, dass die Vibrationsstimuli immer nur eine begrenzte Zeit angewandt wurden. Vibrationstraining sollte nur eine sehr kurze Expositionsdauer haben, insbesondere wenn mit Zusatzbelastungen gearbeitet werden, so eine Studie über die Vorteile und Risiken von Vibrationstraining [30]. Die Extremitäten der Pferde sind ständig Vibrationen ausgesetzt und während dem Training wirken zusätzliche Belastungen durch den Reiter auf die Hufe. Verletzungen wie Mikroläsionen am Knochen [31], welche bestenfalls in der Zeit zwischen den Belastungen verheilen, treten auf und strapazieren die Strukturen im Pferdebein.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Absorptionseigenschaften von Hufschuhen am besten dafür geeignet sind die hohen Belastungen im Hochleistungssport abzufedern um die Strukturen des Hufs zu schützen. Auch bereits geschädigte Strukturen können durch die Verwendung von Hufschuhen geschont werden und heilen. Hufeisen zeigen dagegen eine Verstärkung der Schwingungen, die die Gelenke der Pferde strapazieren. Die Absorptionseigenschaften des Klebebeschlags zeigten ähnliche Ergebnisse wie die Ergebnisse der Messungen ohne Beschlag. Er ist deshalb gut dafür ausgelegt als permanenter Hufschutz auf den Pferdehuf geklebt zu werden.

8.1 Ausblick

Die Studie hat aufgezeigt wie es möglich ist, reproduzierbare Vergleiche von Beschlagsvarianten aufzustellen. Für weiter Messungen sollte das Hufeisen als Beschlagsvariation weggelassen und die Belastung erhöht werden, um genauere Ergebnisse der anderen Beschlagsvarianten zu erlangen. Dadurch können auch weitere Vergleiche aufgestellt werden und Hufeisen oder Klebebeschläge von unterschiedlichen Herstellern getestet und bezüglich ihrer Absorptionseigenschaften verglichen werden.

8.2 Herausforderungen

Bei der Durchführung der Studie sind immer wieder Herausforderungen aufgetaucht, welche behoben werden mussten. Eine der Anfangsschwierigkeiten war, dass das Stahlrohr mit Außengewinde, in welchem der Beschleunigungssensor verklebt ist, eine zusätzliche Mutter hat, um ihn in der vorgesehenen Hülse zu fixieren. Ist diese jedoch nicht fest angezogen kommt es zu Störsignalen und die aufgezeichnete Schwingung sieht aus wie in Abbildung 30. Da die Ursache anfangs nicht klar war, wurden viele Probemessungen durchgeführt, bis die Quelle des Störsignals gefunden wurde.

Auch musste darauf geachtet werden, dass der Vienna Surface Tester angeschaltet ist. Das Gerät verbraucht sehr viel Strom, weshalb für Ersatzbatterien gesorgt werden musste, und schaltet sich stets nach wenigen Minuten von selbst ab.

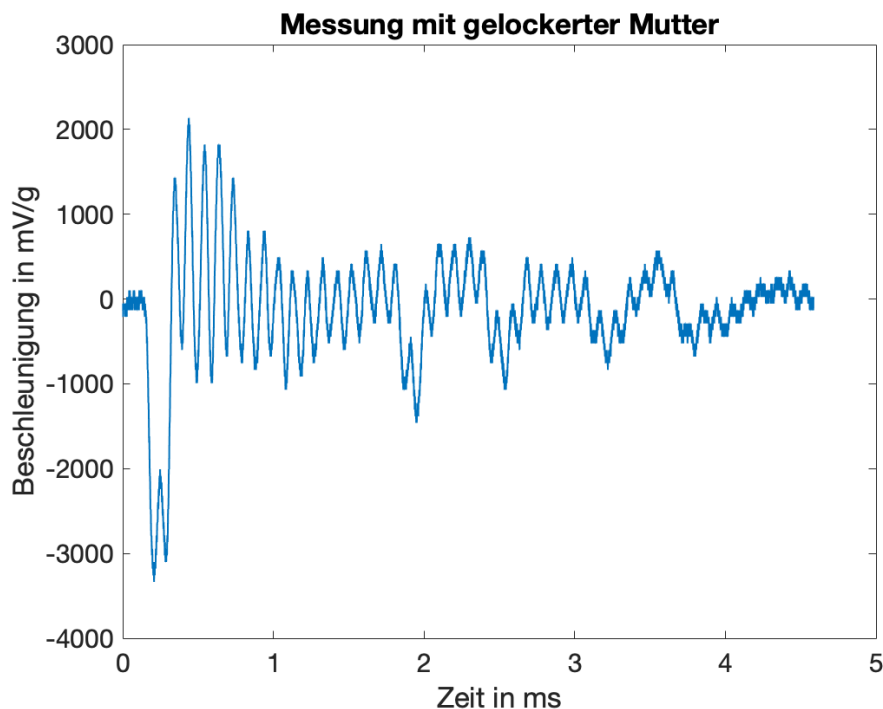


Abbildung 30: Aufnahme einer Messung mit gelockerter Mutter an der Sensorfixierung

Am Anfang des Projekts war der Plan der Messdurchführung jener, dass der tote Huf am abgetrennten Ende des Röhrbeins in Schnellbeton einbetoniert werden sollte, um eine Fixierung mit wenig Störfaktoren zu gewährleisten. Schlussendlich wurde aber die schraubstockartige Vorrichtung der Vetmed Uni verwendet, wodurch die Pferdehufe für spätere Untersuchungen wiederverwendbar geblieben sind und es einfacher war sie auf das Pendel auszurichten. Durch die großen Kamerastative war es dann auch möglich, trotz der erhöhten Fixierung des Hufes, das Pendel zu positionieren.

Durch die Fixierung des Hufes an dem Metalltisch (siehe Abbildung 12) kam es vor, dass die aufgezeichnete Schwingung von kleinen Erschütterungen, welche aufgetreten sind wenn jemand an den Tisch gestoßen ist, überschrieben wurde. Dadurch wurden immer vor dem Wechsel der Beschlagsvariante die aufgezeichneten Daten überprüft, damit 10 verwertbare Datensätze für die Analyse zur Verfügung standen.

Die größte Herausforderung war, dass zwei der aufgetauten Pferdehufe etwas größer waren als die anderen. Dementsprechend waren größere Hufeisen aufgenagelt, wie in Abbildung 31 zu sehen ist, und der vorhandene Hufschuh, bzw. Klebebeschlag war zu klein für den Huf. Da es bei der Studie um den Vergleich der Absorptionseigenschaften der verschiedenen Beschlagsvariationen geht wurde die Hufe von einem Hufschmied so zugeschnitten, dass ein passendes Hufeisen, der Hufschuh und der Klebebeschlag auf den Huf gepasst haben.



Abbildung 31: Die Hufeisen eines passenden Pferdehufes und eines zu großen Pferdehufes

Literatur

- [1] ADM Protexin Ltd. *Cosequin Equine and Horses Inside Out Video*. 2022. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=H7C3uqTI98w> (besucht am 13. 08. 2022).
- [2] Maaikje HM van Schie Willem Back und Jessica N Pol. „Synthetic shoes attenuate hoof impact in the trotting warmblood horse“. In: *Equine and Comparative Exercise Physiology* 3.3 (2006), S. 143–151.
- [3] J. ROEDT P. DYHRE-POULSEN H. H. SMEDEGAARD und E. KORSGAARD. „Equine hoof function investigated by pressure transducers inside the hoof and accelerometers mounted on the first phalanx“. In: *EQUINE VETERINARY JOURNAL* 5.26 (1994), S. 362–366.
- [4] Pierce SE McHorse BK Biewener AA. „Mechanics of evolutionary digit reduction in fossil horses (Equidae)“. In: *Proceedings of the Royal Society B* (2017). URL: <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2017.1174> (besucht am 30. 05. 2022).
- [5] VICTORIA ALLEN. „How the horse lost its toes: Creature evolved hooves 5 million years ago to gallop faster after moving from protected forests to open grassland“. In: *SCIENCE MAIL* 2007 (2007). URL: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4815392/How-horse-lost-toes-evolved-hooves.html> (besucht am 02. 07. 2022).
- [6] W. Huang; N. A. Yaraghi; W. Yang; A. Velazquez-Olivera; Z. Li; R. O. Ritchie; D. Kisailus; S. M. Stover; J. McKittrick. „A natural energy absorbent polymer composite: The equine hoof wall“. In: *Acta Biomaterialia* 90 (2019), S. 267–277.
- [7] Robert C. McClure. „Functional Anatomy of the Horse foot“. In: *Department of Veterinary Anatomy* (1999).
- [8] DocCheck Medical Services GmbH. *Huf (Veterinärmedizin)*. 2022. URL: [https://flexikon.doccheck.com/de/Huf_\(Veterinärmedizin\)](https://flexikon.doccheck.com/de/Huf_(Veterinärmedizin)) (besucht am 06. 08. 2022).
- [9] Dirk Fischer Hufbeschlag + Orthopädie. *Hufsohle*. 2022. URL: https://www.hufbeschlag-fischer.de/cms/front_content.php?idart=4 (besucht am 15. 07. 2022).
- [10] Dr. Christina Fritz. *Die Anatomie des Pferdes*. München: Cadmos Verlag, 2015.
- [11] Helen M.S. Davies Carla M. Lusi. *Fascial Anatomy of the Equine Forelimb*. London: Taylor & Francis, 2005.
- [12] Vanessa Stroux. *Röntgenologische Untersuchung der Auswirkung von seitlichen Aufzügen an Hufeisen der Vorderextremität auf das Hufbein*. Veterinärmedizinische Universität Wien, 2016.

- [13] Alois Fritsch. *Bewegungsmuster*. 2016. URL: <https://rollinghoof.de/bewegungsmuster.html> (besucht am 03.09.2022).
- [14] EquiMoves. *Modifiziertes Bild der Protraktion und Retraktion*. 2022. URL: <https://equimoves.nl/system-overview/system-specifications> (besucht am 15.08.2022).
- [15] Ludwig Prokop. „Das Problem des Leistungsforcing im Hochleistungssport“. In: *Orthopädie bei Huf- und Klautentieren* (1995), S. 293–299.
- [16] Gerd Heuschmann. Trafalgar Square Books, 2012.
- [17] LPBB. *FN-Tierschutztag 2018: im Blickpunkt Tierschutz im Pferdesport, gesellschaftlicher Wandel und Umsetzung der Regelwerke*. 2018. URL: <https://www.lpbb.de/nachrichten/fn-tierschutztag-2018-im-blickpunkt-tierschutz-im-pferdesport-gesellschaftlicher-wandel-und-umsetzung-der-regelwerke.html> (besucht am 04.09.2022).
- [18] LUMITOS AG. *Hufeisen*. 2022. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Hufeisen.html> (besucht am 06.08.2022).
- [19] Martina Wimmer. *HUFSCHUHPROFI*. 2016. URL: <https://www.hufschuhprofi.at/hufschuhe/> (besucht am 13.08.2022).
- [20] SWISS GALOPPERS. *SWISS-GALOPPERS*. 2022. URL: <https://swiss-galoppers.com/blogs/hufothek/klebebeschlag-und-klebeschuhe-vorteile-und-risiken#:~:text=was%20sind%20Klebeschuhe%3F-,Klebebeschlag%20bzw.,oder%20Polyurethankleber%20am%20Huf%20befestigt.> (besucht am 20.07.2022).
- [21] Hilary M. Clayton. „HORSE SPECIES SYMPOSIUM: Biomechanics of the exercising horse“. In: *Journal of Animal Science* (2016).
- [22] Stephen B. Adams. *Overview of Lameness in Horses*. 2022. URL: <https://www.msdevetmanual.com/musculoskeletal-system/lameness-in-horses/overview-of-lameness-in-horses#:~:text=Lameness%20is%20the%20most%20common,se%20but%20a%20clinical%20sign.> (besucht am 20.07.2022).
- [23] Pferdeklinik Aschheim. *Hufehe*. URL: <https://www.pferdeklinik-aschheim.de/hufrehe-beim-pferd/#:~:text=Die%5C%20Hufrehe%5C%20geh%5C%3%5C%B6rt%5C%20zu%5C%20einer,wird%5C%20im%5C%20Huf%5C%20zus%5C%3%5C%A4tzlich%5C%20gest%5C%3%5C%B6rt.> (besucht am 03.08.2022).
- [24] enpevet GmbH. *Hufbeinsenkung und Hufbeinrotation*. 2022. URL: <http://www.enpevet.de/Lexicon/ShowArticle/41790/Hufrehe> (besucht am 12.07.2022).
- [25] Biologische Heilmittel Heel GmbH. *Arthrose beim Pferd*. 2022. URL: <https://www.vetepedia.de/gesundheitsthemen/pferd/bewegungsapparat/arthrose#:~:text=Die%5C%20degenerativen%5C%20Gelenksver%5C%3%5C%A4nderungen%5C%20gehen%5C%20mit,lahmen%5C%20sie%5C%20anfangs%5C%20recht%5C%20stark.> (besucht am 06.09.2022).

- [26] TWI Ltd. *WHAT IS VIBRATION ANALYSIS AND WHAT IS IT USED FOR?* 2022. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/vibration-analysis> (besucht am 22.08.2022).
- [27] Robert Bosch GmbH. *Peripheral acceleration sensor*. 2022. URL: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/sensors/peripheral-acceleration-sensor/>.
- [28] Analog Devices. *High Performance, Wide Bandwidth Accelerometer, ADXL001*. Wilmington, USA, 2010. URL: www.analog.com.
- [29] MH Pope M Cardinale. „The effects of whole body vibration on humans: Dangerous or advantageous?“ In: *Acta Physiologica Hungarica* 90.11 (2003), S. 195–206.
- [30] Z. Yue J. Mester H. Kleinöder. „Vibration training: benefits and risks“. In: *Journal of Biomechanics* 39 (2006), S. 1056–1065.
- [31] Armin Kirchdorfer. *Ganz-Körper-Vibrationen bei Pferden: Bewertung eines neuartigen Bewegungs- und Untersuchungsstandes für Pferde*. Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München, 2009.
- [32] Marco Cardinale¹ und Carmelo Bosco. „The Use of Vibration as an Exercise Intervention“. In: *Exercise and Sport Sciences Reviews* 31.1 (2003), S. 3–7.
- [33] HARRI SIEVÄNEN SAILA TORVINEN PEKKA KANNUS. „Effect of 8-Month Vertical Whole Body Vibration on Bone, Muscle Performance, and Body Balance: A Randomized Controlled Study“. In: *JOURNAL OF BONE AND MINERAL RESEARCH* 18.5 (2003), S. 876–884.
- [34] Petra Kočov; Robert Cimrman; Zbyněk Tonar; Jana Mezerov. „Comparison between Mechanical Properties of Fresh and Frozen Specimens of Corio-Epidermal Junction of Equine Hoof“. In: (2010). URL: https://www.researchgate.net/publication/287840104_Comparison_between_mechanical_properties_of_fresh_and_frozen_specimens_of_corio-epidermal_junction_of_equine_hoof (besucht am 15.07.2022).
- [35] edelstahlonline24. *Edelstahlkugel massiv ø 50mm, mit M8 Gewinde*. 2022. URL: <https://www.edelstahlonline24.de/Gelaender-Systeme/Kugeln-und-Zierteile/Edelstahl-Kugeln/Edelstahl-Vollkugeln-mit-Innengewinde/Edelstahlkugel-massiv-o-50mm-mit-M8-Gewinde::9819.html> (besucht am 20.06.2022).
- [36] Klaus Stein. *Filterung: Gauß-Filter*. 2020. URL: <https://stein-sw.de/filterung-gauss-filter/> (besucht am 06.09.2022).
- [37] Statistics How To. *Shapiro-Wilk Test: Definition, How to Run it in SPSS*. 2022. URL: <https://www.statisticshowto.com/shapiro-wilk-test/> (besucht am 07.09.2022).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Die drei Bereiche der Hufwand; 1: Zehenwand, 2: Seitenwand, 3: Trachtenwand [8]	5
Abbildung 2	Hufsohle eines Pferdes [9]	6
Abbildung 3	Innerer Aufbau eines Pferdehufs [10]	7
Abbildung 4	Beugesehnen der distalen Vordergliedmaße; Links: Tiefe Beugesehne, Rechts: Oberflächliche Beugesehne [11]	9
Abbildung 5	Schematische Abbildung des Hufmechanismus [12]	10
Abbildung 6	Gangablauf bei einem Pferdebein [14]	12
Abbildung 7	Klebebeschlag von N & U Sport Horse Shoes GmbH	15
Abbildung 8	Hufschuh von Swiss Galoppers	16
Abbildung 9	Schematische Darstellung der Folgen einer fortgeschrittenen Hufreheerkrankung [24]	20
Abbildung 10	Schematische Darstellung eines Beschleunigungssensors	21
Abbildung 11	Vereinfachte Darstellung des ADXL Sensors bei Beschleunigung	22
Abbildung 12	Technische Zeichnung des Pendels ohne die Kamerastative	33
Abbildung 13	Positioniertes Pendel auf den Fotostativen	34
Abbildung 14	Befestigung des toten Hufs in der Vorrichtung	35
Abbildung 15	Verschiedene Kontaktpunkte der Kraftübertragung auf den Huf	36
Abbildung 16	Versuchsaufbau der ersten Probemessungen	37
Abbildung 17	Nahaufnahme des Pferdehufs, ausgestattet für die Messung mit einem Klebebeschlag	37
Abbildung 18	Schematische Darstellung des Pendels (blau) zur Berechnung der aufgebracht Kraft	39
Abbildung 19	Filtern des Rohsignals mit der Matlab App Signal Analyzer	43
Abbildung 20	Zu vergleichende Probemessungen 1	45
Abbildung 21	Zu vergleichende Probemessungen 2	46
Abbildung 22	Zu vergleichende Probemessungen 3	47
Abbildung 23	Zu vergleichende Probemessungen 4	47
Abbildung 24	Gemittelte Verläufe mit der Standardabweichung der 10 Wiederholungen der Hufeisen Messungen	49
Abbildung 25	Gemittelte Verläufe mit der Standardabweichung der 10 Wiederholungen der Barhuf Messungen	50
Abbildung 26	Gemittelte Verläufe mit der Standardabweichung der 10 Wiederholungen von der Hufschuh Messung	50

Abbildung 27	Gemittelte Verläufe mit der Standardabweichung der 10 Wiederholungen von der Klebebeschlag Messung	51
Abbildung 28	Gemittelte Verläufe mit der Standardabweichung der 10 Messungen eines Hufes für alle Beschlagsvarianten	52
Abbildung 29	Gemittelte Frequenzen mit der Standardabweichung der Hauptmessungen	54
Abbildung 30	Aufnahme einer Messung mit gelockerter Mutter an der Sensorfixierung . .	64
Abbildung 31	Die Hufeisen eines passenden Pferdehufes und eines zu großen Pferdehufes	65
Abbildung 32	Vienna Surface Tester Innenausstattung	73
Abbildung 33	Vienna Surface Tester Schaltplan	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Nullhypothese und Gegenhypothese	44
Tabelle 2	Festgelegtes Signifikanzniveau	44
Tabelle 3	Frequenz, Maximale Beschleunigung und Periodendauer der zu vergleichenden Probemessungen	48
Tabelle 4	Gemittelte maximale Beschleunigungen der Hauptmessungen	52
Tabelle 5	Gemittelte Periodendauer der Hauptmessungen	53
Tabelle 6	Gemittelte Frequenzen der Hauptmessungen	54
Tabelle 7	Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test für die gemessenen Beschlagsvarianten an den fünf Hufen	55
Tabelle 8	Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test des Parameters der maximalen Beschleunigung für die gemessenen Beschlagsvarianten an Huf 1	55
Tabelle 9	Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test des Parameters der Frequenz für die gemessenen Beschlagsvarianten an Huf 1	56

Abkürzungsverzeichnis

PZT Sensor Piezoelektrischer Sensor

FFT Fast-Fourier-Transformation

Vetmed Uni Veterinärmedizinische Universität

TPU Thermoplastische Polyurethane

PU Polyurethan

DC Gleichspannung

A Anhang A

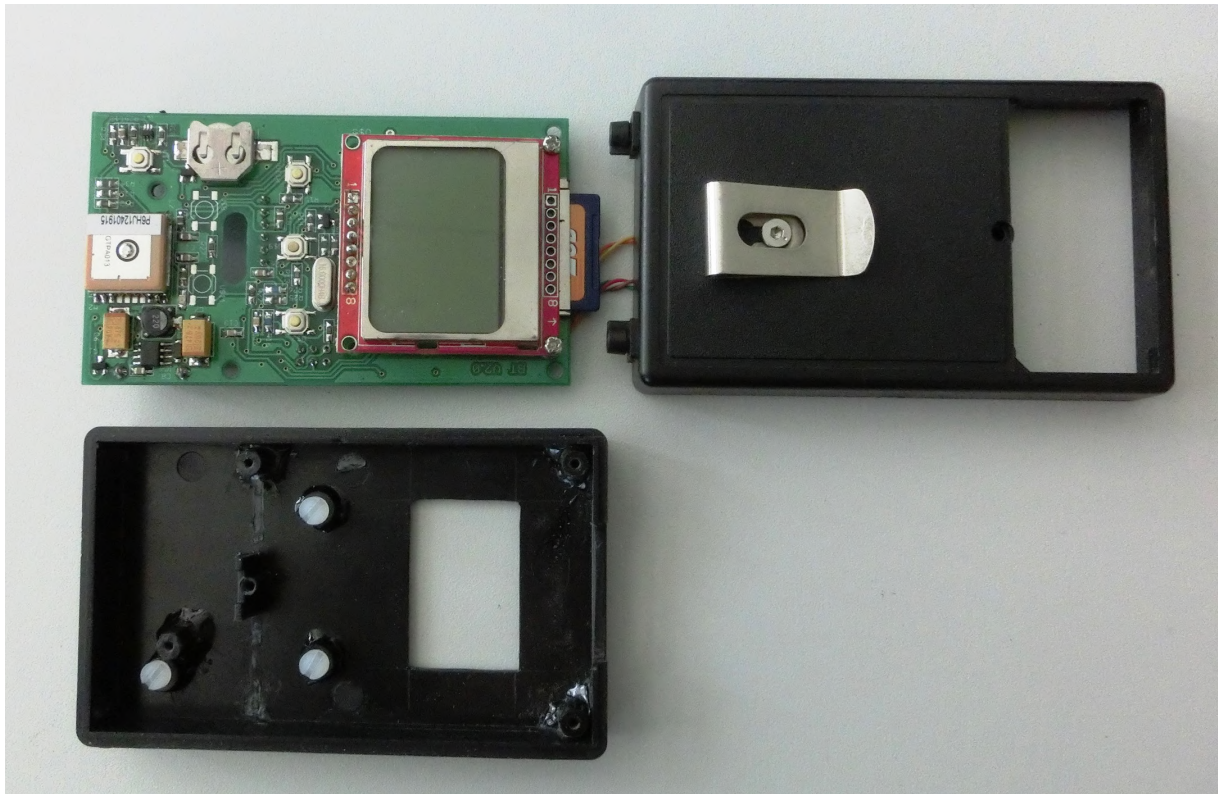


Abbildung 32: Vienna Surface Tester Innenausstattung

