

1. Einleitung

Die objektive Bewegungsanalyse bei Pferden hat sowohl für wissenschaftliche als auch für klinische Zwecke seit den 1970er Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Nicht nur aufgrund der Einschränkungen des menschlichen Auges, das geringgradige Bewegungsasymmetrien nicht wahrnehmen kann (Holcombe, 2009; Parkes et al., 2009), sondern auch im Hinblick auf die Objektivierung von Asymmetrien spielen technische Hilfsmittel eine große Rolle. So können die Variabilität in der Beurteilung zwischen Beobachterinnen und Beobachtern in der Lahmheitsdiagnostik verringert und Therapieverläufe und -erfolge objektiv beurteilt werden. Objektive Systeme bieten potenziell die Möglichkeit, Bewegungsmuster bestimmten Krankheitsbildern zuzuordnen und damit einen wichtigen Beitrag zur Prävention und Früherkennung im Sinne des Tierwohls zu leisten.

Objektive Methoden umfassen kinematische und kinetische Verfahren. Ein kinematisches Verfahren ist die optische Bewegungserfassung (optical motion capture, OMC) von Markern mithilfe von Hochgeschwindigkeitskameras (Boye et al., 2014) mit nachfolgender Analyse der erfassten Bildsequenzen. Mithilfe künstlicher Intelligenz ist die Auswertung von Videos im Hinblick auf Asymmetrien zunehmend präziser auch ohne Marker möglich (Lawin et al., 2023; Pfau et al., 2023; Kallerud et al., 2025). Ein weiteres Untersuchungsverfahren basiert auf der Nutzung inertialer Messeinheiten (inertial measurement units, IMUs) (Crecan und Peştean, 2023), die aus Lage- und Beschleunigungssensoren bestehen. Diese können an verschiedenen Lokalisationen am Pferd angebracht werden (Keegan et al., 2011; Serra Bragança et al., 2017; Hagen et al., 2021c), um Bewegungen und Asymmetrien zu erfassen und zu bewerten.

Als Goldstandard für die quantitative kinetische Bewertung von Stützbeinlahmheiten bei Pferden gelten hingegen Bodenreaktionskräfte (ground reaction forces, GRFs) (Merkens et al., 1986; Merckens et al., 1993), welche mithilfe von stationären Kraftmessplatten (KMPs) erhoben werden. Ihre Anschaffung ist jedoch kostspielig, die Installation komplex und die Datenerfassung zeitaufwendig, da KMPs eine begrenzte Größe haben. Derart instrumentierte Vorführbahnen können aus den genannten Gründen nur selten vollflächig ausgestattet werden. Um eine bessere Zugänglichkeit zu schaffen,

wurden z. B. mit Druckmessgeräten ausgestattete Vorführestrecken, wie das „KAEGI Equine Gait Analysis System“ (Auer und Butler, 1986) oder ein mit einem Kraftmesssystem ausgestattetes Hochgeschwindigkeitslaufband entwickelt (Weishaupt et al., 2002). Außerdem wurden stationäre Druckmessplatten, die eine größere Messfläche aufwiesen, als kostengünstige Alternative zu Kraftmessplatten getestet und genutzt (Oosterlinck et al., 2010a; Oosterlinck et al., 2010b). Trotzdem sind die genannten Methoden meist auf experimentelle Bedingungen beschränkt und nicht für den alltäglichen klinischen Gebrauch geeignet.

Um die Datenerfassung unabhängig von stationären Geräten zu ermöglichen, wurden insbesondere in den letzten 70 Jahren wiederholt Prototypen von instrumentierten Hufeisen (Björck, 1958; Frederick und Henderson, 1970; Ratzlaff et al., 1990; Roepstorff und Drevemo, 1993; Hjertén und Drevemo, 1994; Kai et al., 2000; Roland et al., 2005; Chateau et al., 2009) oder Hufschuhen (Barrey, 1990; Dohne, 1991; Devolin et al., 2023) für Messungen der GRFs entwickelt. Zusätzlich wurden auch Druckmessfolien getestet, welche unter den Hufen befestigt werden konnten und so eine ortsunabhängige Datenerfassung einer großen Anzahl an Tritten ermöglichten (Judy et al., 2001; Perino et al., 2007; Hoffmann et al., 2022). Die meisten beschriebenen Systeme waren aufgrund früherer technologischer Standards hinsichtlich ihrer Handhabung herausfordernd und wegen des hohen Eigengewichts von bis zu 2,3 kg (Hjertén und Drevemo, 1994) nur für Messungen unter Laborbedingungen geeignet.

Kürzlich wurde ein kommerziell erhältlicher instrumentierter Hufschuh („consteed – the smart horse sneaker™“, ContiTech GmbH, Deutschland) entwickelt. Als Grundlage des Systems dient ein herkömmlicher Hufschuh, der sowohl über eine inertielle Messeinheit (inertial measurement unit, IMU), als auch über leichte, robuste Drucksensoren verfügt. Mithilfe einer drahtlosen Verbindung werden Daten in Echtzeit auf Endgeräte übertragen. Dieser instrumentierte Hufschuh (IHS) ermöglicht so kinetische und kinematische Untersuchungen am Huf und ist dazu vorgesehen, objektive Informationen über das Gangbild des Pferdes in allen Gangarten unabhängig von Ort, Wetter oder Bodenbeschaffenheit zu liefern.

Das erste Ziel der vorliegenden Arbeit war es, diesen IHS erstmals hinsichtlich Funktionalität und Genauigkeit anhand kinetischer Gangparameter zu

validieren, indem Parameter aus Messungen des IHS mit simultanen Messungen auf KMPs verglichen wurden. Das zweite Ziel war es, die Zuverlässigkeit der objektiven Lahmheitserkennung und -überwachung vor und nach diagnostischen Anästhesien zu überprüfen.

2. Literaturübersicht

2.1 Historie der equinen Bewegungsanalyse

Die Bewegungsanalyse besteht aus den Teilgebieten der Kinematik und der Kinetik (Bewegung = griech. Kinesis, κίνησις). Bereits Aristoteles (384–322 v. Chr.) beschäftigte sich unter anderem mit der Bewegung von Pferden, und im Verlauf der nachfolgenden Jahrhunderte wurden immer wieder Bewegungen des Pferdes, hauptsächlich theoretisch, analysiert (Van Weeren und Álvarez, 2019). Erste forschungsbasierte Ergebnisse, mit einem Anspruch, der bereits dem heutigen Feld der Bewegungsanalyse ähnelt, lieferten Eadweard Muybridge und Etienne-Jules Marey Ende des 19. Jahrhundert. Als erste kinematische Untersuchung konnte Muybridge mithilfe einer Chronophotographie – heutzutage auch Hochgeschwindigkeitsfotografie genannt – den Bewegungsablauf eines Pferdes im Galopp festhalten (Muybridge, 1902). Er konnte somit nicht nur die genaue Position und Platzierung der Gliedmaßen von Pferden beschreiben, sondern dadurch auch belegen, dass es im Galopp zu einer Schwebephase kommt. Die ersten kinetischen Untersuchungen führte Etienne-Jules Marey unter anderem mit einem pneumatischen System durch (Marey, 1878). Es bestand aus einem mit Rosshaar gefüllten Gummibalg, der im Sohlengewölbe des Hufes fixiert wurde und durch ein Schlauchsystem mit einem rotierenden Schreiber verbunden war, sodass die während des Bewegungsablaufes undulierenden Drücke des Hufes auf den (weichen) Untergrund erfasst werden konnten. Gemeinsam mit einem weiteren Schreiber, der die Beugung des Fesselgelenkes aufzeichnete, konnte so zwischen Hangbein- und Stützbeinphase in der Bewegung unterschieden werden. Die Arbeiten von Muybridge und Marey läuteten das „erste goldene Zeitalter“ der Bewegungsanalyse bei Pferden ein, in welchem vor allem Grundlagenforschung zur Entwicklung biomechanischer Konzepte betrieben wurde (van Weeren, 2012). Das „zweite goldene Zeitalter“ der Bewegungsanalyse begann in den 1970er Jahren und hält bis heute an (van Weeren, 2012; Egan et al., 2019). Der technologische Fortschritt ermöglicht die Entwicklung immer neuer Analysemethoden. So wurden mithilfe von Kinematographie die Änderungen von Gelenkwinkeln beschrieben und selbstentwickelte Apparate dienten z. B. dazu, die Verformung der Hufwand (Thomason et al., 1992) oder die auftretende Spannung der Sehnen am