

Analyse explosionsartiger Impulsübertragung mittels Highspeedkamera

Daniel Hägele, Niels Johannes Kirpal, Bernd Jödicke

HTWG Konstanz, University of Applied Sciences, Alfred-Wachtel-Straße 8, 78462 Konstanz, Germany

(Dated: 24. Februar 2022)

I. EINLEITUNG

Mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera soll durch den Bewegungsablauf beim Sprung einer Heuschrecke, insbesondere die Startsequenz aufgezeichnet, ausgewertet und interpretiert werden. Hierbei ist das Augenmerk besonders auf die Kinematik der Heuschrecke gelegt. Über diese sollen Rückschlüsse auf die physikalischen Größen [1] gezogen werden.

II. VERSUCHSAUFBAU

Für den Versuch wird ein Tisch als Versuchsfläche verwendet. Der nichtbenötigte Hintergrund wird mithilfe eines schwarzen nicht reflektierbaren Stofftuchs abgehängt. Für die Belichtung der Versuchsfläche werden zwei LED-Strahler verwendet. Diese werden mittels Stativen so ausgerichtet, dass die Versuchsebene optimal beleuchtet werden kann. In der Abbildung 1 wird der Versuchsaufbau exemplarisch dargestellt. Die Hochgeschwindigkeitskame-

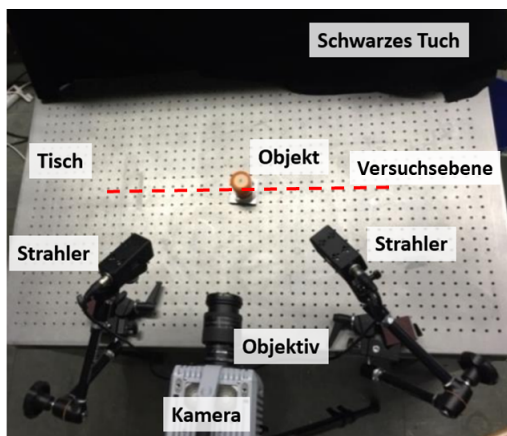


Abbildung 1. Skizze des Versuchsaufbaus

ra ist auf die Versuchsfläche ausgerichtet und fokussiert. Dazu wird das Livebild der Kamera als Referenz herangezogen. Bei der verwendeten Hochgeschwindigkeitskamera handelt es sich um das Modell FASTCAM SA X2 des Herstellers Photon. Als Objektiv wird das 100 mm F2.8 MACRO Objektiv des Herstellers Tokina verwendet. Die Versuche sind bei einer Frame Rate von 12500 fps (Frames per Second) aufgezeichnet. Bei einer so hohen Frame Rate ist besonders auf die Beleuchtung zu achten, da aufgrund der kurzen Belichtungszeit nur wenig Licht für jedes einzelne Bild zur Verfügung steht. Danach wird die optimale Beleuchtung auf den Versuch angepasst werden. Die Blende des Objektivs ist komplett geöffnet.

III. VERSUCHSABLAUF UND VORAUSSETZUNGEN

Die Heuschrecke wird auf der Versuchsfläche vor der Kamera platziert. Für die Fokuseinstellung werden die Poren auf der Backsteinoberfläche genutzt. Um die Tiere möglichst wenig in Stress zu versetzen, wird mit dem Erstellen der Bilder gewartet, bis die Tiere selbstständig abspringen. Um einen fehlerfreien Versuch sicherzustellen, wird der Versuchsablauf öfters wiederholt, bis die Bewegung optimal in der Fokusebene eingefangen ist. Ein weiteres Tier befindet sich als Referenz zur Sprungheuschrecke im Sichtfeld der Aufnahme, somit kann die richtige Fokusebene für die springende Heuschrecke während des Versuchs sichergestellt werden. Damit die Bilder kinematisch ausgewertet werden können, müssen die Pixel der Kamera realen Abständen zugeordnet werden. Dazu wird die Zeit als auch der Ort kalibriert. Folgend werden von den Videos Bilder (Momentaufnahmen) in Abständen von beginnend 60 Frames, später für eine höhere Auflösung mit Abständen von 30 Frames angefertigt. Hierbei entspricht ein Frame einer realen Zeit von 80 μ s. Um den Ort kalibrieren zu können, wird in die erzeugten Bilder ein Koordinatensystem bestehend aus einer X- und einer Y-Achse gelegt. Der Schnittpunkt der X- und Y-Achsen stellt den Nullpunkt dar. Auf diese Bilder wird im Anschluss auf den Schwerpunkt der Heuschrecke in Abbildung 2 händisch ein Punkt gelegt. Anschließend

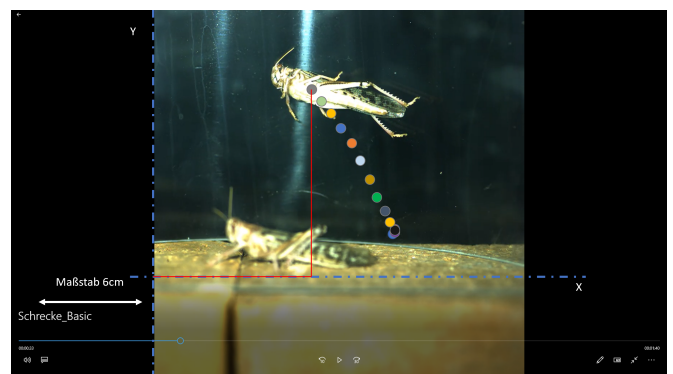


Abbildung 2. Sprung der Heuschrecke

legt man jeweils einen wie in Abbildung 2 rot dargestellten Strich auf die X- und Y- Achse. Mithilfe eines Bildbearbeitungsprogramms wird die Länge der roten Linien ausgegeben. Um die Koordinaten auswerten und in reelle Größen umwandeln zu können, wird ein Maßstabsfaktor errechnet. Dieser Maßstabsfaktor wird durch das Vermessen der Heuschrecke in der Realität und durch das Vermessen der Heuschrecke in dem erstellten Bild erzeugt. Die Geschwindigkeiten werden demnach durch numerisches Ableiten der Ortskoordinaten bestimmt. Dies geschieht auf Basis der vermessenen Ortsdifferenz (in x und y getrennt) und der kalibrierten Zeit zwischen den Mo-

mentaufnahmen. Die Ergebnisse werden in einer Tabelle zusammengetragen und sind in Diagramm 3 zu sehen. Auf der y-Achse des Diagramms ist die Geschwindigkeit

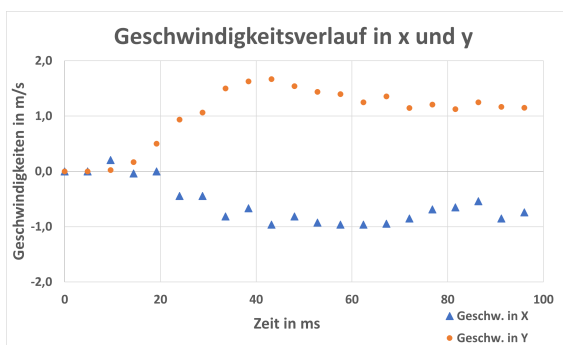


Abbildung 3. Geschwindigkeitsverlauf der Heuschrecke

in Meter pro Sekunde jeweils im positiven und negativen Bereich aufgetragen. Auf der x-Achse ist die fortlaufende Zeit aufgetragen. Orangene Punkte stellen den Geschwindigkeitsverlauf in Y-Richtung dar. Der Geschwindigkeitsverlauf in X-Richtung wird in blauen Dreiecken dargestellt. Aus diesen Diagrammen wird nun weiterführend die Charakteristik des untersuchten Bewegungsablaufes sichtbar.

IV. INTERPRETATION KINEMATIK

Auf Grundlage des entstehenden Diagramms lässt sich der Bewegungsablauf der Heuschrecke in vier Phasen unterteilen (groß in Abbildung 5 zu sehen).

1. Phase 1 bezieht sich auf den Zeitraum von 0-10 ms. Keine Geschwindigkeit in x und y Richtung. Die Heuschrecke ruht.
2. Die folgende Phase bezieht sich auf die Zeit von 10-40 ms. Hier ist ein Anstieg der Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung zu sehen. Die Geschwindigkeit in y-Richtung steigt auf $1,5 \frac{m}{s}$, die Geschwindigkeit in x-Richtung auf $1,0 \frac{m}{s}$. Dabei resultiert die negative Geschwindigkeit in x-Richtung dadurch, dass die Heuschrecke sich im Koordinatensystem nach links bewegt. In dieser Phase springt die Heuschrecke vom Boden ab. Hier beginnt der Impulsübertrag zwischen der Heuschrecke und dem Boden. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Heuschrecke in y-Richtung eine deutlich stärkere Beschleunigung erreicht als in x-Richtung. Dies lässt sich auch durch graphisches Ableiten der Geschwindigkeitsänderungen über die Zeit (Steigungsdreiecke) in Abbildung 5 durch die Beträgen der Beschleunigung erkennen. Interessant ist auch, dass in dieser Phase konstante Beschleunigungen ($a \approx const.$), also linear steigende Geschwindigkeiten vorliegen.
3. Phase 3 bezieht sich auf den Zeitraum von 40-70 ms. Mit Erreichen der maximalen Geschwindigkeit, fällt diese in Phase 3 in y-Richtung ab, während sie in x-Richtung konstant bleibt. In dieser Phase befindet sich die Heuschrecke im freien Fall, damit

lassen sich physikalische Grundgesetze leicht erkennen. Die konstant bleibende Geschwindigkeit in x-Richtung und die abnehmende Geschwindigkeit in y-Richtung wurden bereits beschrieben. Hier befindet sich die Heuschrecke vollständig in der Luft. Es findet kein Impulsaustausch zwischen Boden und Heuschrecke mehr statt. Die Heuschrecke befindet sich somit im freien Fall. Damit wirkt auf die Heuschrecke einzig und allein das Erdfeld mit einer Beschleunigung von hier mit $a \approx -11 \frac{m}{s^2}$ abgebildet, was aus der negativen Beschleunigung aus Phase 3 im Diagramm ersichtlich wird.

4. In der letzten Phase ab 70 ms fallen die Geschwindigkeiten in beide Richtungen ab. Dieser Verlauf der Bewegung lässt sich nicht erklären. Alle ausgewerteten Werte der Beschleunigungen in diesem Bereich geben keine mögliche Erklärung von physikalisch nachvollziehbaren Vorgängen. Möglicherweise weichen die Messwerte durch eine Drehung der Heuschrecke in ihrer Flugbahn von den erwarteten Werten ab. Der Bereich ab 70 ms dient also keiner physikalisch basierten Auswertung.

Mit dieser Auswertung lässt sich festhalten, dass eine Analyse der Kinematik mittels einer Highspeedkamera möglich ist und die resultierenden Ergebnisse mit den Kenntnissen aus der Physik übereinstimmen.

V. AUSWERTUNG BELASTUNG DES BEINS

Aufgrund dieser guten Ergebnisse aus der Kinematik, kann die Auswertung fortgeführt werden. Für weitere Erkenntnisse über die Heuschrecke, lassen sich noch beispielsweise mechanische Analysen durchführen. Ein interessantes Ziel wäre es, anhand der mechanischen Auswertung 4, Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des Heuschreckenbeins ziehen zu können. Exemplarisch wird hier

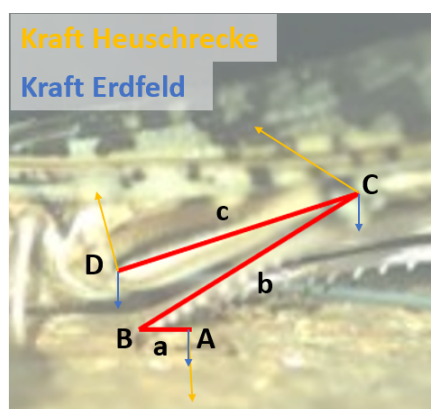


Abbildung 4. Anliegende Kräfte an dem Heuschreckenbein

nun die Spannung in dem Abschnitt a des Heuschreckenbeins berechnet. Um die Rechnung aufstellen zu können müssen folgende Annahmen getroffen werden:

- Die Gelenke A-D werden als starre Auflager behandelt. [2].
- Die Masse der Heuschrecke entspricht 3 g [3],[4],[5].

- Der Durchmesser des Beins beträgt in etwa 1 mm [3],[4],[5].

Aus der Auswertung der Kinematik und den abgeleiteten Beschleunigungen aus Phase 2 lassen sich die Kräfte berechnen, die beim Absprung auf die Heuschrecke wirken. Hierzu wird in y-Richtung mit einer Beschleunigung von $a_y = 60 \frac{m}{s^2}$ und in x-Richtung mit $a_x = 34 \frac{m}{s^2}$ gerechnet.

Mit der Gleichung:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

lassen sich die Kraftpfeile aus Abbildung 4 berechnen. Durch die Vektoraddition der Beschleunigungskraft in x-Richtung, der Beschleunigungskraft in y-Richtung und der Gewichtskraft, erhält man eine Gesamtkraft von 0,23 Newton im Lager A. Mit der errechneten Kraft und der Länge des Beinabschnitts a von 9,2 mm (über Maßstabsfaktoren) erhält man über die Gleichung:

$$M_b = F \cdot x$$

ein Biegemoment von $7,6 \cdot 10^{-3} Nm$. Im nächsten Schritt wird das polare Flächenmoment des Heuschreckenbeins mittels folgender Gleichung berechnet:

$$I_{xx} = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$$

Bei dem sehr kleinen Durchmesser des Beinabschnitts entspricht dies $5 \cdot 10^{-14} m^4$. Nun sind alle Größen bekannt

um die Spannung σ zu berechnen. Dies geschieht mit:

$$\sigma = \frac{M_b}{I_{xx}} \cdot \frac{d}{2}$$

somit erhält man die maximale Biegespannung, die in diesem Abschnitt des Beins vorliegt, hier 77 MPa.

Um damit Rückschlüsse auf ein Material zu ziehen, eignet sich bspw. die Kennzahl des E-Moduls. Da das E-Modul sich aus dem Verhältnis der Spannung zur Verformung berechnet, benötigt man eine Auswertung der elastischen Verformungen des Beins bei einer Belastung von 77 MPa. Diese Verformung ist allerdings mit der verwendeten Highspeedkamera nicht auswertbar. Eine Einordnung des Materials mittels der Belastung von 77 MPa kann nicht eindeutig getroffen werden. In diesem Belastungsbereich gibt es eine Vielzahl an Werkstoffen, die diese Belastung übertragen können.

VI. FAZIT

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass man über eine visuelle Auswertung mittels einer Highspeedkamera sehr interessante und durchaus verwertbare Daten erheben kann. Da die Werte mit den Erwartungen aus der Realität übereinstimmen (Erreichen der Beschleunigung nach Impulsaustausch) lässt sich zusammenfassen, dass eine kinematische Auswertung von explosionsartigen Impulsübertragungen mittels dieser Kamera möglich ist. Weiterführende Untersuchungen, wie zum Beispiel eine mechanische Auswertung waren nicht umsetzbar. Aufgrund der nicht auszuwertenden optische Verformung des Heuschreckenbeins stößt diese Analyse hier an ihre Grenzen.

[1] J. Eichler and A. Modler, Physik für das Ingenieurstudium - Prägnant mit vielen Lernkontrollfragen und Beispielaufgaben. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2018.

[2] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder, and W. A. Wall, Technische Mechanik 1 - Statik. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016.

[3] M. Chinery, Pareys Buch der Insekten - ein Feldführer der europäischen Insekten. Hamburg: Parey, 1987.

[4] H. Reichholf-Riehm, Insekten - mit Anhang Spinnentiere. Muenchen: Mosaik-Verlag, 1984.

[5] Å. Sandhall, Insekten + Weichtiere - niedere Tiere und ihre Lebensräume - Gliedertiere, Würmer, Nesseltiere, Weichtiere, Einzeller. München: BLV-Verlagsgesellschaft, 1974.

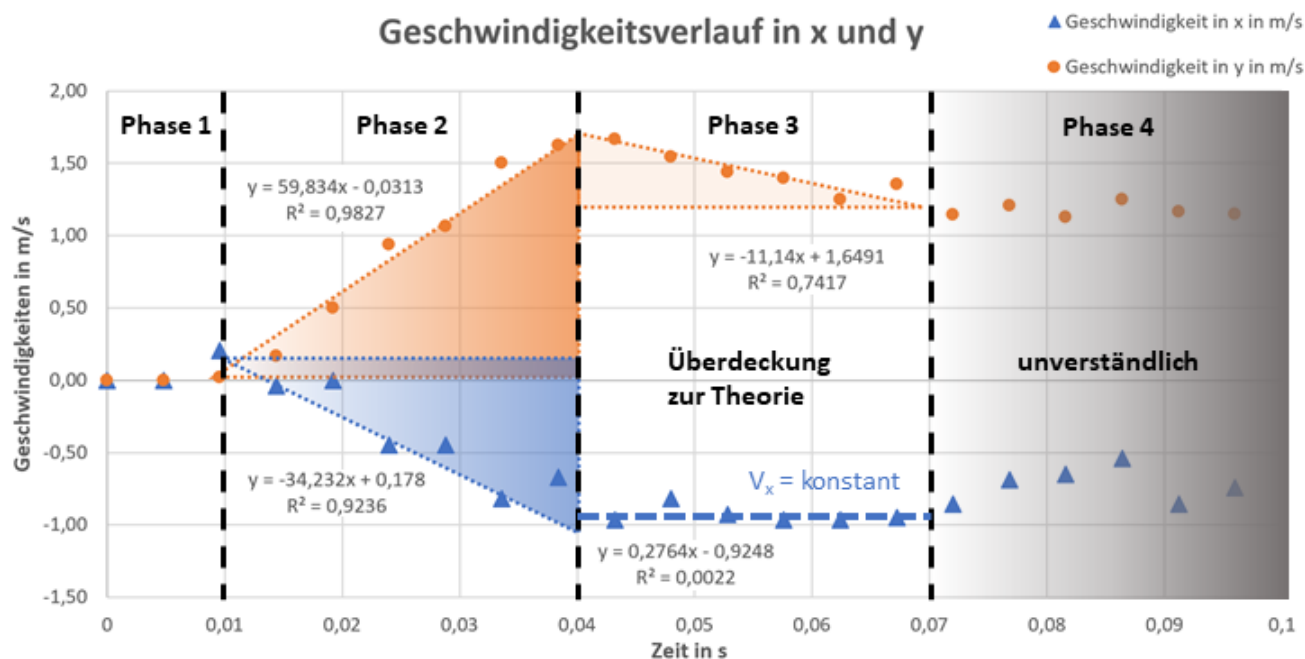


Abbildung 5. Graphische Ableitung der Geschwindigkeiten

- 1. Phase in der Zeit 0-10 ms, die Heuschrecke ist in Ruhe.
- 2. Phase in der Zeit 10-40 ms, die Heuschrecke springt ab.
- 3. Phase in der Zeit 40-70 ms, freie Bewegung ohne Wechselwirkungen, außer mit dem Erdfeld (freier Fall) erkennbar, in Y-Richtung ist keine Wechselwirkung mit beispielsweise Luft, da $v_2 = \text{konstant}$
- 4. Phase in der Zeit > 70 ms, Abweichung von freiem Fall unverständlich, evtl. durch die Drehung der Heuschrecke