Interaktion von Mensch und Boden bei Lauf- und Sprungbewegungen

Advanced Design Project (ADP)
Human-Ground-Interaction in Running and Jumping Activities

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

iMS

Diese Arbeit wurde vorgelegt von

Chunyu Jia

Jennifer Conrad

Dennis Dahms

Jianmeng Du

Jonathan Oelke

Ni Yue

Betreuer: Christian Schumacher (IFS), Veronika Noll (IMS), Christian Daniel (IAS)

Bearbeitungszeitraum: 19.11.2014 – 05.02.2015

Darmstadt, den 30. Januar 2015

Erklärungen

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt

Hiermit versicheren wir, Chunyu Jia, Jennifer Conrad, Dennis Dahms, Jianmeng Du, Jonathan Oelke, Ni Yue, die vorliegende Hausarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.
In der abgegebenen Hausarbeit stimmen die schriftliche und elektronische Fassung überein.

Datum

Unterschrift

Wir sind damit einverstanden, dass das Urheberrecht an meiner Arbeit zu wissenschaftlichen Zwecken genutzt werden kann.

Ort, Datum

Unterschrift

Aufgabenstellung

Inhaltsverzeichnis

ERKLÄRUNGEN **2**

AUFGABENSTELLUNG **3**

INHALTSVERZEICHNIS **4**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS **6**

TABELLENVERZEICHNIS **8**

1. EINLEITUNG **9**

1.1. MOTIVATION 9

2. VORÜBERLEGUNGEN UND VERSUCHSPLANUNG **12**

2.1. MECHANISMEN UND MODELLE VON SPRUNGBEWEGUNGEN UND BODENEINFLÜSSEN 12

2.2. DER PRÜFSTAND „MARCO HOPPER“ 12

2.2.1. Prinzip des stabilen Springens *14*

2.2.2. Die verschiedenen Kraftentfaltungsmodelle *14*

2.2.3. Energiemanagement des Springens *16*

2.3. HYPOTHESEN 17

2.4. VERSUCHSAUFBAU UND –DURCHFÜHRUNG 18

2.4.1. Bodenproben *18*

2.4.2. Daten und Versuchsprogramm *19*

3. EXPERIMENTE **23**

3.1. QUALITATIVE ANALYSE 23

3.1.1. Vergleich unterschiedlicher Beinsteifigkeiten *23*

3.1.2. Sprunghöhenvergleich für verschiedene Bodeneigenschaften *25*

3.1.3. Phasenverschiebung aufgrund der unterschiedlichen Bodeneigenschaften *26*

3.2. QUANTITATIVE ANALYSE 27

3.2.1. Duty Factor *27*

3.2.2. Energiedissipation beim Sprung in Abhängigkeit verschiedener Bodenverhältnisse *30*

3.2.3. Ermittlung der Steifigkeit der Böden *33*

3.2.4. Ermittlung der Dämpfungskonstanten der Böden *35*

4. MODELLBILDUNG MITTELS MATLAB/SIMULINK **39**

4.1. VORSTELLUNG DER SPRUNG- UND BODENMODELLE 39

4.1.1. Sprungmodelle *39*

4.1.2. Bodenmodelle ... *44*
4.2. SIMULATIONSBEDINGUNGEN ... 46
4.2.1. Auswahl von Sprungmodellen ... *46*
4.2.2. Entwicklung des Modell des Zweimassenschwinger-Modells ... *48*
4.2.3. Bewegungsgleichung ... *49*
4.2.4. Simulation eines Bodenmodells ... *52*
4.3. VORSTELLUNG DER MATLAB-SYSTEME UND VALIDIERUNG DER MODELLE ... 54
4.3.1. Vorstellung und Erläuterung der Modelle ansteigender Komplexität ... *54*
4.3.2. Validierung ... *59*
4.4. SIMULATIONSERGEBNISSE ... 64
4.4.1. Simulationsergebnisse eines Sprunges ... *65*
4.4.2. Simulationsergebnisse einer Sprungsequenz ... *67*

5. VERGLEICH SIMULATION - EXPERIMENT ... 71

5.1. PAARVERGLEICH QUALITATIVES VERHALTEN SIMULATION UND EXPERIMENT ... 71
5.2. QUANTITATIVER VERGLEICH MODELL - EXPERIMENT ... 76
5.3. KONSEQUENZEN AUS DEM VERGLEICH ... 77
ABBILDUNG 5.10: SIMULIERTER ABLAUF SPRUNG AUF BODEN MIT "TARTAN" EIGENSCHAFTEN ... 79

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK ... 80

6.1. BEWERTUNG DER ERGEBNISSE ... 80
6.2. WEITERFÜHRENDE ARBEITEN ... 80

LITERATURVERZEICHNIS ... 82

ANHANG ... 84

A. WICHTIGSTE MATLAB-SKRIPTE ZUR AUSWERTUNG DER VERSUCHE ... 84
A.1 Bestimmung des Kraftabbaus ... *84*
A.2 Bestimmung der Steifigkeit der verschiedenen Bodenproben ... *84*
A.3 Darstellung der Verläufe des Sprunges und der Bodenreaktionskraft ... *87*
A.4 Bestimmung der mittleren Sprunghöhen jedes Materials ... *87*

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:Feder-Masse-Model. *10*
Abbildung 2.1: Der Marco Hopper in seinem aktuellen Zustand *12*
Abbildung 2.2: POSIMAG System. *13*
Abbildung 2.3: Grundlegende muskelähnliche Kraftentfaltung des Marco Hoppers. *14*
Abbildung 2.4: Model 1 der Energiezufuhr im Marco Hopper. *15*
Abbildung 2.5: Model 2 der Energiezufuhr im Marco Hopper. *15*
Abbildung 2.6: Model 3 der Energiezufur im Marco Hopper. *15*
Abbildung 2.7: Funktionelles Schema des Marko Hoppers. *16*
Abbildung 2.8: Marko Hopper mit Stufe. *17*
Abbildung 2.9: Verschiedene Bodenproben. *19*
Abbildung 2.10: Ausschnitt aus der Datenaufzeichnung. *20*
Abbildung 3.1: Verlauf der Beinkraft, des Körperschwerpunkts und des Fußpunkts *23*
Abbildung 3.2: Verlauf der Beinkraft, des Körperschwerpunkts und des Fußpunkts *24*
Abbildung 3.3: Sprunghöhenverlauf für unterschiedliche Böden *25*
Abbildung 3.4: Phasenverlauf beim Hüpfen auf Schaumstoff- und Papieruntergrund *26*
Abbildung 3.5: Phasenverlauf beim Springen auf Schaumstoff und Schuh *26*
Abbildung 3.6: KSP Bewegung *28*
Abbildung 3.7: Abnahme der Sprunghöhe. *31*
Abbildung 3.8: Verlauf Bodenreaktionskraft und Auslenkung des Bodens *34*
Abbildung 4.1: Einmassenschwinger-Sprung-Modell *40*
Abbildung 4.2: Zweimassenschwinger-Sprung-Modell *41*
Abbildung 4.3 : Hauptkomponenten des Hill-basierten Modells *42*
Abbildung 4.4 : erweitertes kontraktiles Element von Häufle Modell *43*
Abbildung 4.5: Hopper-Modell von vergangenem ADP *43*
Abbildung 4.6: Bodenmodell durch Feder-Dämpfer-System *44*
Abbildung 4.7: Spannung-Dehnung-Diagramm von verschiedenen Betonsorten *45*
Abbildung 4.8: Schematische Darstellung eines Einmassenschwingers (Tings, 2010) *46*
Abbildung 4.9: Hill-Modell mit Freischnitt Skizze *47*
Abbildung 4.10: Aufbau der Aktivierung in Simulink *48*
Abbildung 4.11: Schematische Darstellung des Zweimassenschwingers *48*
Abbildung 4.12: Schematische Darstellung jeder Kraftwirkung im Zweimassenmodell *49*
Abbildung 4.13: Spannungs-Dehnungs-Diagramm *53*
Abbildung 4.14: Theoretischer und realer Verlauf der Linie von Tartan und Schaumstoff *53*

Abbildung 4.15: Die Darstellung des Sprungsmodells in Matlab/Simulink *55*
Abbildung 4.16: Der Aufbau des Subsystems „control signal“ *56*
Abbildung 4.17: Der Aufbau des Subsystems „F während Fliegen“ *57*
Abbildung 4.18: Der Aufbau des Subsystems „Boden“ *57*
Abbildung 4.19: Der Aufbau des Subsystems „Erzeugungskraft“ *59*
Abbildung 4.20 Statische Auslenkung auf Betonboden *60*
Abbildung 4.21 Dynamisches Sprungverhalten *61*
Abbildung 4.22 Sprungverhalten von Kontaktphase zu Flugphase *61*
Abbildung 4.23 Statische Auslenkung auf Tartanboden *63*
Abbildung 4.24 Statische Auslenkung auf Schaumstoffboden *64*
Abbildung 4.25: Einmaliges Sprungverhalten auf Betonboden *65*
Abbildung 4.26: Einmaliges Sprungverhalten auf Tartanboden *66*
Abbildung 4.27: Einmaliges Sprungverhalten auf Schaumstoffboden *66*
Abbildung 4.28 Kontinuierliches Sprungverhaten auf Betonboden *68*
Abbildung 4.29 Kontinuierliches Sprungverhalten auf Tartanboden *69*
Abbildung 4.30 Vergleich zwischen dem Sprungverhalten von Tartan und Schaumstoff *70*
Abbildung 5.1: Verlauf der simulierten Bodenreaktionskraft *72*
Abbildung 5.2: Experimentell ermittelter Ablauf Sprung auf Boden mit "Beton" Eigenschaften *73*
Abbildung 5.3: Verlauf der experimentell ermittelten Bodenreaktionskraft *73*
Abbildung 5.4: Simulierter Ablauf Sprung auf Boden mit „Beton“-Eigenschaften *74*
Abbildung 5.5:Experimentell ermittelter Ablauf Sprung auf Boden *74*
Abbildung 5.6: Experimentell ermittelter Ablauf Sprung auf Boden mit Schaumstoff Eigenschaften *75*
Abbildung 5.7: Simulierter Ablauf Sprung auf Boden mit Schaumstoff Eigenschaften *76*
Abbildung 5.8: Experimentell ermittelter Ablauf Sprung auf Boden mit "Schuh" Eigenschaften *78*
Abbildung 5.9: Experimentell ermittelter Ablauf Sprung auf Boden mit "Tartan" Eigenschaften *79*
Abbildung 5.10: Simulierter Ablauf Sprung auf Boden mit "Tartan" Eigenschaften *79*

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Übersicht der erfassten Daten innerhalb eines Durchlaufs *20*

Tabelle 2.2: Übersicht über die gespeicherten Dateien *22*

Tabelle 3.1: Durchschnittlicher Duty Factor *28*

Tabelle 3.2: Abnahme der Sprunghöhe *30*

Tabelle 3.3: Steifigkeit der verschiedenen Böden *34*

Tabelle 3.4: Ermittlung der Impactkraft bei Landung auf verschiedenen Böden *38*

Tabelle 5.1: Sprunghöhen für Experiment und Modell *77*

1. Einleitung

Im Rahmen der universitären Ausbildung findet in diesem Wintersemester 2014/15, unter Beteiligung der Institute für Mechatronische Systeme & Intelligent Autonomous Systems Group und des Instituts für Sportwissenschaft, ein interdisziplinäres Projekt statt. Ziel dieses „Advanced Design Project“ (ADP) ist es, forschungsnahe Themen als Team zu bearbeiten und auszuwerten. In der Vergangenheit bearbeiteten Studenten Themen zu menschlichen Bewegungen und Robotik, Gangsimulationen und Simulation eines biologischen Muskels mit Entwicklung eines mechanischen Konzepts. In diesem Semester liegt der Fokus auf den Mensch-Boden Interaktionen bei Lauf- und Sprungbewegungen.

1.1. Motivation

Mit Hilfe dieses Projekts sollen die Mechanismen bei Sprungbewegungen unter externen Einflüssen analysiert und in Modellen simuliert werden. Forschungsgruppen untersuchten die Mechanismen zur Anpassung des menschlichen Systems bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel dem Hüpfen auf der Stelle (Blickhan, 1989; Farley et al., 1991; Farley et al., 1998; Farley & Morgenroth, 1999) und konnten daraus wichtige Erkenntnisse gewinnen. Signifikant war dabei, dass sich die Beinsteifigkeit auf die veränderten Bodenverhältnisse anpasst (Farley et al., 1998; Ferris & Farley, 1997). Das zugrundeliegende Prinzip dieser Ergebnisse ist die Tatsache, dass sich die Funktion des menschlichen Beins beim Laufen, Springen und Rennen als Feder-Masse-Modell beschreiben lässt (Blickhan, 1989; Farley et al., 1993; McMahon & Cheng, 1990).

„The advantage of the spring-mass model is its simplicity in studying the mechanical behavior of the musculoskeletal system by using just one spring“(Kuitunen et al., 2002, S. 166). Mittels dieses Modells lassen sich die Bewegungen des Menschen biomechanisch beschreiben und Optimierung ableiten. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 1.1 nochmals verdeutlicht.

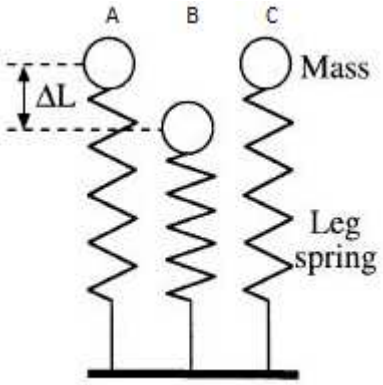


Abbildung 1.1:Feder-Masse-Model. Das menschliche Bein wird als einfache Feder simuliert und der Körper als Punktmasse oberhalb der Feder. Das Modell simuliert drei Phasen der Hüpfbewegung: (A) Start (B) mittlere Phase (C) Ende (mod. nach Farley et al., 1999, p.268).

Durch Krafteinwirkungen verkürzt sich die Länge der Feder (Abbildung 1.1 [B]) und vergrößert sich im Anschluss wieder bis auf die Ausgangslänge (Abbildung 1.1 [C]). Dieses Phänomen kann auf den Menschen übertragen werden, indem das komplette Bein als Feder betrachtet wird und der Körperschwerpunkt als eine Masse über der Feder fixiert ist. Forscher nutzen dieses Prinzip um verschiedene Bodeneinflüsse auf die Kinematik und Dynamik bei Sprungbewegungen zu analysieren. Untersuchungen ergaben, dass sich unser menschliches Muskel-Skelett-System an diese veränderte Umgebung anpasst (Farley et al., 1998; Ferris & Farley, 1997). Aufgrund dessen wird diesem Themengebiet eine hohe Relevanz zugeordnet, nicht nur von Seiten der Forschung, sondern auch von der Wirtschaft. Firmen entwickeln Schuhmodelle, die perfekt auf die externen Einflüsse abgestimmt sind, beispielsweise für den Alltag oder zum Joggen. Dennoch sind viele Mechanismen und Modelle noch nicht ausgereift untersucht worden, sodass weiterhin Grundlagenforschung betrieben werden muss. Hilfreich sind dabei Prüfstände, die auf menschliche und mechanische Modelle beruhen, um Simulationen unter Laborbedingungen durchzuführen. Ein solches Modell ist der Marco-Hopper, der im nachfolgenden Kapitel genauer erläutert wird. In den weiterführenden Kapiteln werden die genauen Modelle, die die Grundlage für den Marco-Hopper bilden, spezifiziert dargestellt und mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen simuliert.

Damit dieses Thema strukturiert analysiert werden kann, stützt sich diese Arbeit auf folgende Fragestellungen, die nachfolgend bearbeitet und in den wissenschaftlichen Kontext eingeordnet werden.

1. Analyse von Sprungbewegungen mit unterschiedlichen Boden- / Schuheigenschaften
2. Modellierung und Entwicklung von Sprungmodellen und Ansteuerungsstrategien
3. Entwurf und Realisierung eines Bodenelements mit variablen Eigenschaften für einen Robotik-Prüfstand
4. Nachbildung biologischer Sprungbewegungen mit variablen Bodeneigenschafen in einem Robotik-Prüfstand

2. Vorüberlegungen und Versuchsplanung

Wie bereits in der Einleitung angedeutet, soll in diesem Kapitel zunächst die Mechanismen und Modelle vorgestellt werden, welche sich mit der Anpassung von Lauf- und Sprungbewegungen bei unterschiedlichen Bodeneigenschaften beschäftigen. Im Anschluss wird der Prüfstand – Marco Hopper – welcher für die in dieser Arbeit zugrunde liegenden Experimente genutzt wird, vorgestellt. Abschließend werden in diesem Kapitel die Entwickelten Hypothesen sowie der Versuchsaufbau und -durchführung beschrieben.

2.1. Mechanismen und Modelle von Sprungbewegungen und Bodeneinflüssen

In diesem Abschnitt sollen zunächst die zu Grunde liegenden Mechanismen und Modelle von Sprungbewegungen und Bodeneinflüssen beschrieben werden. Bereits in der Einleitung wurden die Arbeiten von Farley et al. (1998) und Ferris & Farley (1997) kurz angesprochen. In diesen Arbeiten wurden zunächst mittels Kraftmessplatte und Elektromyographie Sprungdaten von Versuchspersonen ermittelt. Festzustellen war, dass die Gesamtsteifigkeit bei unterschiedlich steifen Bodenbelägen konstant blieb. Dies konnten die Versuchspersonen durch eine Anpassung der Beinsteifigkeit bewerkstelligen. In einem weiteren Schritt konnte mittels Modellierung des Beins (Hüfte-Knie-Bein) festgestellt werden, dass die diese Steifigkeitsanpassung hauptsächlich im Fußgelenk bewerkstelligt wird. Eine weitere Studie von Farley & Morgenroth (1999) zeigt, dass auch eine Veränderung der Sprunghöhe durch eine hauptsächliche Anpassung der Fußgelenkssteifigkeit durch den Menschen herbeigeführt wird.

2.2. Der Prüfstand „Marco Hopper"

Seyfarth et. al stellten 2007 die Frage ob es möglich ist Sprungmuster aus reiner Muskel-Reflex-Aktivität zu generieren. Um diese Hypothese zu prüfen wurde ein einfacher Prüfstand – Marco Hopper – entwickelt (siehe **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.**). Marco besteht aus einem Körper und einem motor-betriebenen Bein. Dieses Bein kann vertikal bewegt werden. Im Detail wird der Körper durch einen Schlitten repräsentiert, der durch ein Kugellager auf einer vertikalen Schiene bewegt wird. Das Bein – repräsentiert durch einen Stab – ist mit

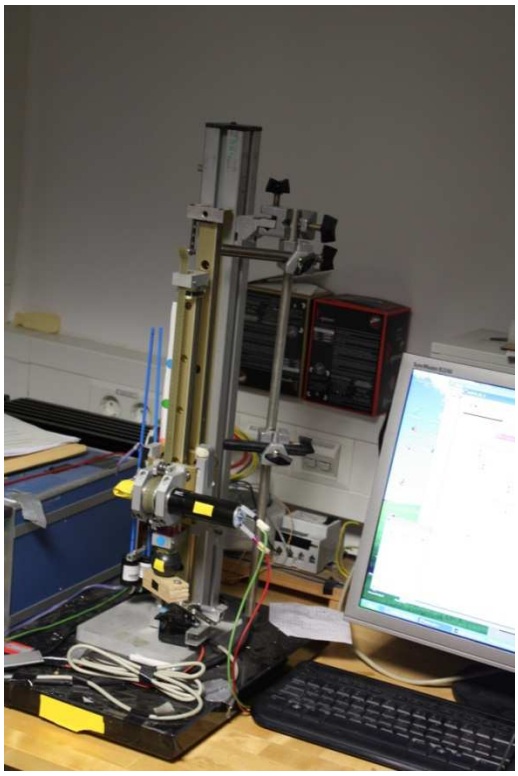
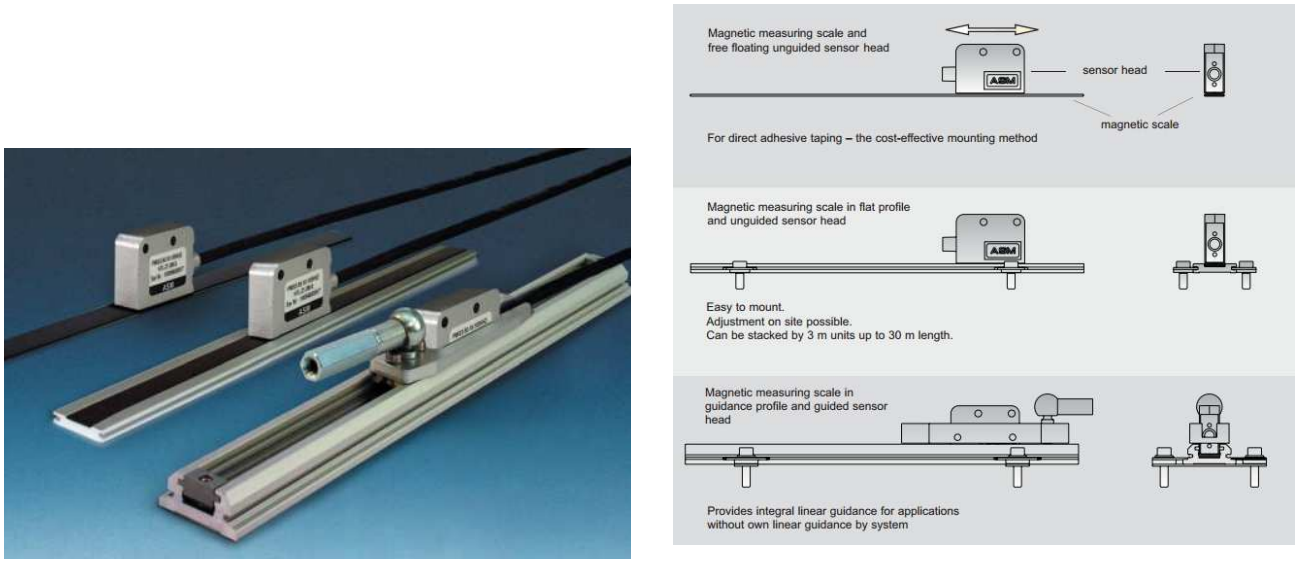


Abbildung 2.1: Der Marco Hopper in seinem aktuellen Zustand

dem Schlitten verbunden und kann sich relative zu diesem vertikal auf und ab bewegen. Der bewegungsinduzierende Motor wurde auf dem Schlitten angebracht. Mittels eines am Motor befestigten Zahnrades und einem am Bein angebrachten Zahnriemens kann das Bein bewegt werden. Um den Daten zu sammeln und den Status des Prüfstandes festhalten zu können wurden drei Sensoren angebracht (Seyfarth et al., 2007):

- POSIMAG System (Positionssensor)
- Tachometer
- Dehnmessstreifen

Das POSIMAG System (ASM GmbH, 2004) ist ein hochauflösendes magnetisches Positionsmesssystem. Es besteht aus einem Magnetoresistiven Scan-Kopf und einem flexiblen Stahlstreifen mit aufgebrachter Magnetträgerschicht (siehe Abbildung 2.2). Mittels des Positionsmesssystems wir die y-Position (y_s) des Schlittens gemessen. Der Tachometer – gekoppelt an die Bewegungsseite des Antriebs - misst die y-Geschwindigkeit des Beins. Der Dehnmessstreifen wurde auf der Bodenplatte angebracht um die Bodenreaktionskraft zu erfassen.



(a) (b)

Abbildung 2.2: POSIMAG System. (a) Abbildung der verschieden Systeme (b) Überblick über den Systemaufbau (ASM GmbH, 2004)

2.2.1. Prinzip des stabilen Springens

Um stabiles Springen zu erreichen, muss der Energieverlust der bei Bodenkontakt auftritt kompensiert werden. Seyfarth et al. (2007) beschreiben, dass in einem springenden mechanischen System die Energie nur während der Bodenkontaktzeit erhöht werden kann. Der Bodenkontakt kann in zwei Phasen eingeteilt werden, welche durch Midstance – dem Punkt an dem das Bein seine minimale Länge bzw. der Schlitten seinen tiefsten Punkt erreicht hat – voneinander getrennt werden. Eine Energiezufuhr während der ersten Standphase vor Midstance führt nicht zu einer Wiederherstellung des Ausgangsniveaus, da die zugeführte Energie zum abbremsen des Schlitten genutzt wird und nur dafür sorgt, dass der Schlitten nicht so tief fällt wie er es ohne zusätzliche Energie getan hätte. Im Gegensatz kann eine Energiezufuhr in der zweiten Standphase zur Aufwärts-Beschleunigung des Schlittens genutzt werden. Somit kommen die Autoren zu dem Schluss dass während der zweiten Standphase mehr Energie als in der ersten in das System eingebracht werden sollte.

2.2.2. Die verschiedenen Kraftentfaltungsmodelle

Das Kraftentfaltungsgesetz bei Bodenkontakt des Beines wurde hier nach dem Muskelmodell von Hill modelliert. Dies entspricht dem Produkt von drei Variablen:

- s (lowpass- gefilterte Stimulation) -> Aktivierung a
- Kraft-Längen-Beziehung F_L
- Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung F_V

Aus diesem Basismodell (siehe Abbildung 2.3) wurde von Seyfarth et al. (2007) vier Verschiedene Untermodelle abgeleitete.

Mit dem Marco Hopper war es Seyfarth et al. (2007) möglich zu prüfen welche Kraftentfaltungsgesetze eine stabile Sprungbewegung mit entsprechenden Bodenkontaktzeiten und Flugphasen ermöglichen. Der große Vorteil in der Konzeption des Marco Hoppers liegt hierbei im motorgetriebenen Bein. Dieser Umstand erlaubt es sehr schnell und einfach verschiedene Kraftentfaltungsgesetze auszuwählen und mittels Motors anzuwenden. 2007 untersuchten Seyfarth et.al die vier verschiedenen bereits

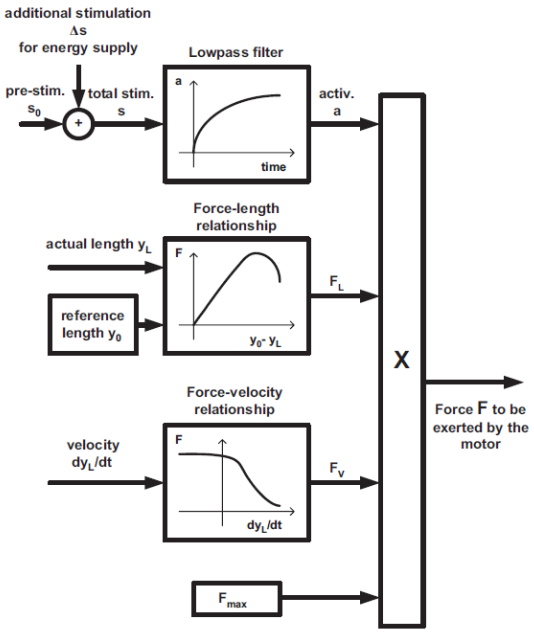


Abbildung 2.3: Grundlegende muskelähnliche Kraftentfaltung des Marco Hoppers. (Seyfarth et al., 2007)

erwähnten Modelle der Energiezufuhr von denen drei ein stabiles Sprungmuster hervor brachten. Diese drei Modelle werden hier kurz beschrieben:

Model 1: Mechanische Feder

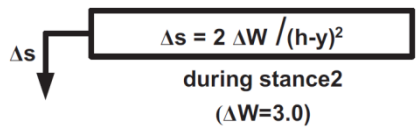


Abbildung 2.4: Model 1 der Energiezufuhr im Marco Hopper. (Seyfarth et al., 2007)

In diesem Ansatz wurde eine Mechanische Feder nach Hooke also Kraftentfaltungsgesetzt zugrunde gelegt. Die Anregung s kann in diesem Modell als Federsteifigkeit interpretiert werden. Die zusätzliche Anregung Δs, welche zur Grundanregung addiert wird, wurde mit der Formel aus Abbildung 2.4 berechnet. Hierbei bezeichnet ΔW die Menge der gewünschten Energie die ins System eingebracht werden soll, h beschreibt die tiefste Position des Schlittens während Midstances und y die Position des Schlittens bei Verlust des Bodenkontaktes. Mit einem ΔW zwischen 3.0 und 2.4 Nm (s = 180 N/m) konnte eine stabile Sprungsequenz realisiert werden.

Model 2: Quadratische Energieerhöhung

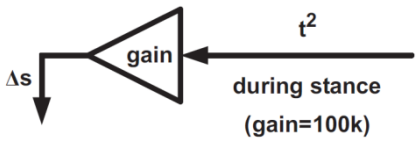


Abbildung 2.5: Model 2 der Energiezufuhr im Marco Hopper. (Seyfarth et al., 2007)

In diesem Modell wurde die Energiezufuhr über die Zeit des Bodenkontaktes quadratisch erhöht. Eine stabile Sprungsequenz konnte mit Zusätzen zwischen 60 und 125 kN/m erreicht werden (Seyfarth et al., 2007)

Model 3: positives Force Feedack

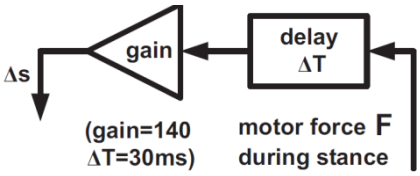


Abbildung 2.6: Model 3 der Energiezufur im Marco Hopper.

In diesem Modell wird der Ansatz des positiven Force Feedback verfolgt, welches ein Muskel-Reflex-Mechanismus implementiert. Das Feedback wurde hier zwischen 20 und 50 ms verzögert. Zudem wurden zwei Kraft-Geschwindigkeits-Beziehungen getestet. Entweder mit dem Wert 1 oder eine exponentielle Abhängigkeit der Geschwindigkeit nach Midstance. Beide Versionen führten zu einer stabilen Sprungsequenz (Seyfarth et al., 2007).

2.2.3. Energiemanagement des Springens

Kalveram et al. (2010) untersuchten das Energiemanagement des Springens und verglichen Daten aus Modellen, vom Marco Hopper und dem Menschen. Die Autoren sind der Meinung, dass die aktuelle Forschung in diesem Gebiet sich zu sehr mit dem konservativen Masse-Feder-Modell beschäftigt. Ihrerseits schlagen Sie einen Neuen Ansatz des stufenförmigen gedämpften Feder-Masse Konzepts vor. Im Gegensatz zum herkömmlichen Masse-Feder-Modell wird im neuen Ansatz die dissipierte Energie als ein dazugehöriges Mittel gesehen um Springen ausdauert und stabil – dem Boden angepasst – zu gestalten. Um dies These zu stützt haben (Kalveram et al.) verschieden Sprünge und Modi des Marco Hopper mit Sprüngen von Versuchspersonen verglichen. Der Prüfstand wurde im Vergleich zu der Vorstellung in Kapitel 2.2 angepasst. Der schematische Aufbau wird in Abbildung 2.7 dargestellt. Ebenso wurden zwei neue Modelle zur Untersuchung genutzt:

Konstante Energiezufuhr

Hierbei wird unabhängig von Störungen immer die gleiche Menge an Energie dem System zugeführt. Die Energie wurde durch eine Erhöhung der Steifigkeit während des Bodenkontaktes nach Midstance mit folgender Formel berechnet:

$$\Delta k_1 = \frac{6 * \Delta W}{(l_{10} - l_{1min})^3} * (l_1 - l_{1min})$$

Dieser Ansatz beschreibt ein Bodenanpassendes Springen (Kalveram et al., 2010).

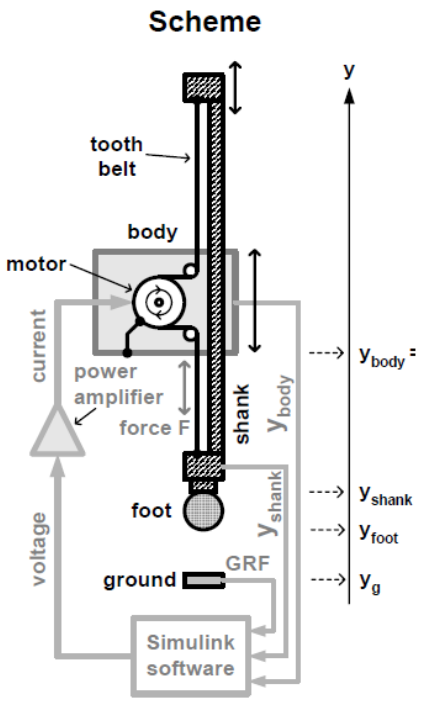


Abbildung 2.7: Funktionelles Schema des Marko Hoppers. (Kalveram et al., 2010)

Verlorene Energiezufuhr

Das Prinzip dieses Ansatzes ist immer die jeweils während des Sprungs dissipierte Energie wieder in das System einzubringen. Diese Energie kann errechnet werden indem die totale Energie im Midstance von der totalen Energie bei Bodenkontakt (touchdown) abgezogen wird. Diese so errechnete Energie wird in etwa verdoppelt und mit der oben genannten Formel in das System eingebracht. Dieser Ansatz beschreibt ein Sprunghöhen-erhaltendes Springen(Kalveram et al., 2010).

Der Vergleich der Marco-Hopper-Sprünge mit denen von Versuchspersonen zeigte, dass menschliche Sprünge eher dem bodenangepassten Springen aus dem Ansatz der konstanten Energiezufuhr ähneln (Kalveram et al., 2010).

2.3. Hypothesen

In diesem Kapitel sollen nun die Fragestellungen die mittels Marco Hopper beantwortet werden sollen vorgestellt werden. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben Verfügt der Marko Hopper über drei verschiedene Kraftentfaltungsmodelle um eine konstante Sprungsequenz zu erzeugen. Die bisherigen Untersuchungen wurden jedoch immer mit konstanten Bodeneigenschaften durchgeführt. Somit stellten sich zu Beginn folgende Fragen die mit empirischen Versuchen beantwortet werden sollen:

1. Wie wirken sich verschiedene Bodeneigenschaften auf die verschiedenen Sprungmodi aus?
    a. Gibt es Unterschiede in der Sprunghöhe?
    b. Gibt es Unterschiede in der Bodenkontaktzeit
    c. Gibt es Unterschiede im Duty Factor?
2. Wie schnell kann sich das System bei einer eingebrachten Störung wieder anpassen?
    a. Gibt es zwischen den Modi Unterschiede in der Anpassung?
    b. Gibt es zwischen den Bodenbelägen Unterschiede in der Anpassung?

Nach Begutachtung des Prüfstandes musste aber festgestellt werden dass einige Gegebenheiten des Marco Hoppers bestimmte Versuche nicht zulassen. Die drei genannten Modelle waren nicht mehr verfügbar und es konnte nur das Modell der konstanten Energiezufuhr aus Kapitel 2.2.3 genutzt werden. Ein Vergleich von verschiedenen Sprungmodi auf gleichen Bodenbelägen konnte nicht stattfinden.

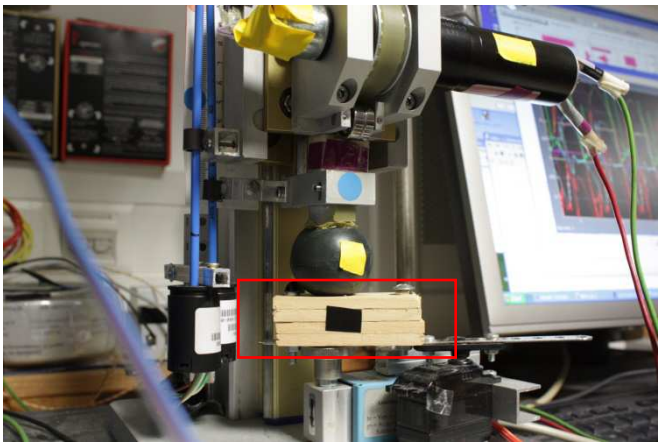


Abbildung 2.8: Marko Hopper mit Stufe. Rot eingerahmt ist die Stufe zu sehen, welche unter dem springenden Bein hervorgezogen werden kann

Im aktuellen Zustand verfügt der Marco Hopper über eine Stufe die automatisch während des Springens entfernt werden kann (siehe Abbildung 2.8). Leider konnten die verfügbaren Bodenproben im Rahmen dieses Projektes nicht derart angepasst werden um die Stufe zu nut-

zen. Somit mussten Fragestellungen zu einer eingebrachten Störung ebenfalls entfallen.

Nach Prüfung des Marco Hoppers und einigen Vorversuchen sollen Folgende Fragen beantwortet werden:

Qualitative Fragestellungen

1. Wie wirkt sich unterschiedliches Bodenmaterial auf den Duty Factor aus?
   H1. Ein weicherer Boden führt zu einem höheren Duty Factor
   H2. Je weicher der Boden desto höher ist die Zykluszeit
2. Lässt sich die im Sprung dissipierte Energie für unterschiedliche Bodenbeläge bestimmten?
3. Kann die Steifigkeit der Bodenbelege bestimmt werden?

Quantitative Fragestellungen

1. Führen unterschiedliche Zusatzsteifigkeiten (Δk) zu einer Veränderung des Körperschwerpunktverlaufs?
2. Führen unterschiedliche Zusatzsteifigkeiten zu einer Veränderung des Beinkraftverlaufes?
3. Führen unterschiedliche Zusatzsteifigkeiten zu einer Veränderungen des Fußpunktverlaufs?
4. Welchen Einfluss haben die Bodeneigenschaften auf die Sprunghöhe?
5. Verändert sich die Sprungphase durch unterschiedliche Bodeneigenschaften?

2.4. Versuchsaufbau und –durchführung

In diesem Kapitel sollen die ausgewählten Bodenproben und die Versuchsdurchführung gezeigt werden.

2.4.1. Bodenproben

Zu Beginn der Versuchsplanung wurde diskutiert welche Bodenbeläge für das Experiment in Frage kommen. Die beiden wichtigsten Kriterien waren hier zum einen die Verfügbarkeit des Materials und zum anderen Bodenbeläge mit möglichst unterschiedlichen Eigenschaften zu beschaffen. Zunächst wurden drei Materialien ausgewählt:

- Tartan
- Beton
- Schaumstoff (Isomatte)

Nach den ersten Vorversuchen wurden zusätzliche Materialien aufgenommen:

- Fersenbereich einer Sportschuhsohle
- Adipren Ball

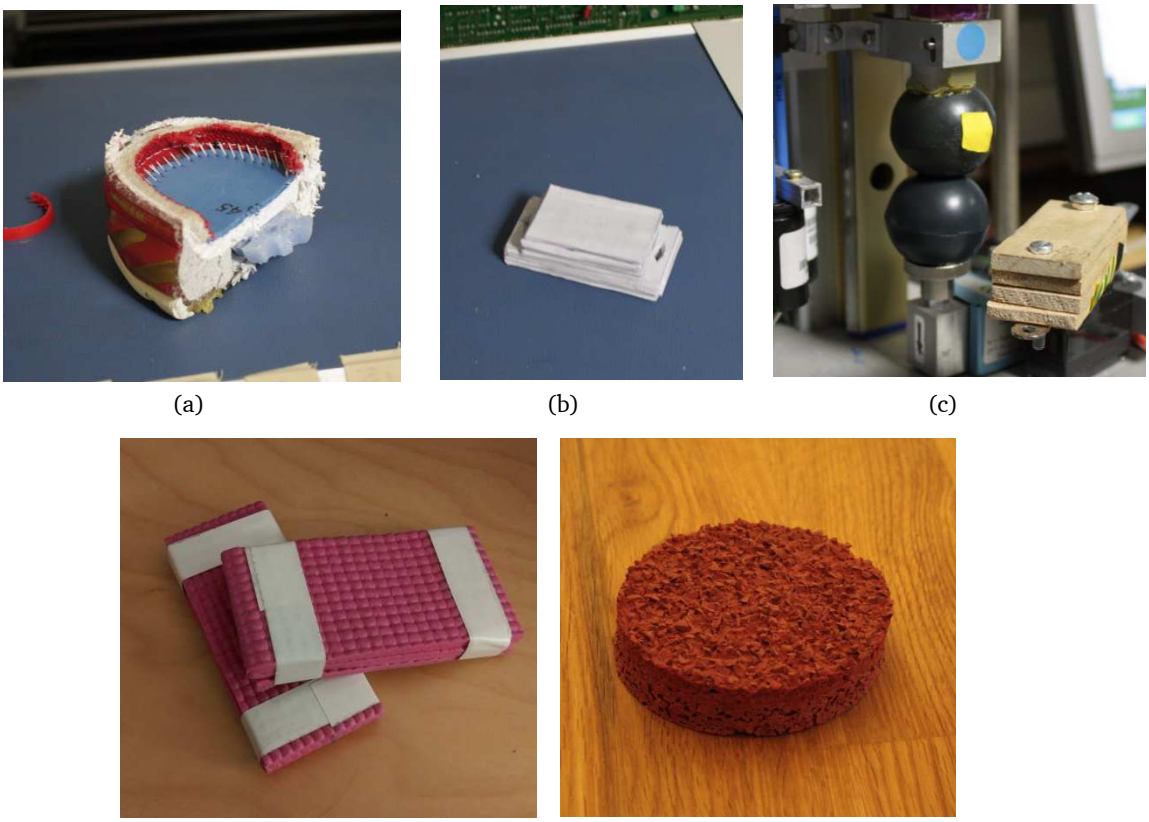


Abbildung 2.9: Verschiedene Bodenproben. (a) Ferse des Sportschuhs, (b) Papier, (c) Adipren, (d) Isomatte, (e) Tartan

Zudem konnte keine passende Bodenprobe aus Beton beschafft werden. Diese Bodenprobe wurde durch eine Papierschicht ersetzt (siehe Abbildung 2.9 [b]).

2.4.2. Daten und Versuchsprogramm

Wie bereits weiter oben erwähnt konnte der Marco Hopper eine Sprungsequenz nach dem Modell der konstanten Energiezufuhr durchführen. Jede Sprungsequenz dauert 20 Sekunden und die aufgenommenen Daten werden automatisch in einer Matlab/Simulink-Datei gespeichert. Die erfassten Variablen können der Tabelle 2.1 entnommen werden. Ein Beispiel für einen Datenscope zeigt Abbildung 2.10.

Tabelle 2.1: Übersicht der erfassten Daten innerhalb eines Durchlaufs

Spalte	Daten
1	Zeit
2	y_1 Schwerpunkt des Motors mit Vorfaktor 1
3	L_1 Beinlänge mit Vorfaktor 1
4	y_2 Schwerpunkt des Fußes mit Vorfaktor 1
5	v_1 Geschwindigkeit des Motorschwerpunktes mit Vorfaktor 0.1
6	F Bodenreaktionskraft, Vorfaktor 0.001
7	F_+ zusätzliche Kraft aus der künstlichen Erhöhung der Steifigkeit mit Vorfaktor 0.001
8	Flug oder Stand (0/1), Vorfaktor 0.001
9	Schrittlänge; Stufe ein/aus
10	Kraft die der Motor ausübt mit Vorfaktor 0.01/dF

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		0.0363	0.0015	0.0348	-2.5956e-05	0.0176	0	0	0.0220	-0.0998
2	1.0000e-03	0.0363	0.0013	0.0351	3.9909e-04	0.0183	0	0	0.0220	-0.1000
3	0.0020	0.0363	0.0013	0.0351	0.0038	0.0241	0	0	0.0220	-0.1000
4	0.0030	0.0363	0.0013	0.0351	0.0149	0.0474	0	0	0.0220	-0.0999
5	0.0040	0.0363	0.0013	0.0351	0.0323	0.0724	0	0	0.0220	-0.0997
6	0.0050	0.0363	0.0015	0.0348	0.0432	0.0758	0	0	0.0220	-0.0993
7	0.0060	0.0363	0.0015	0.0348	0.0373	0.0547	0	0	0.0220	-0.0994
8	0.0070	0.0363	0.0015	0.0348	0.0194	0.0334	0	0	0.0220	-0.0996
9	0.0080	0.0366	0.0018	0.0348	0.0024	0.0271	0	0	0.0220	-0.0995
10	0.0090	0.0369	0.0021	0.0348	-0.0045	0.0338	0	0	0.0220	-0.0993
11	0.0100	0.0369	0.0021	0.0348	-3.5188e-04	0.0438	0	0	0.0220	-0.0993
12	0.0110	0.0369	0.0023	0.0345	0.0103	0.0477	0	0	0.0220	-0.0989
13	0.0120	0.0374	0.0026	0.0348	0.0212	0.0455	0	0	0.0220	-0.0985

Abbildung 2.10: Ausschnitt aus der Datenaufzeichnung

Zudem gelten folgende Bedingungen

- k_0 ist die grundlegend eingestellte Steifigkeit des Motors k_0=400 N/m
    - d_k ermittelbar über $d_k = amendatory \frac{force}{L_{10}-L_1}$
    - k_{ges} ist die Reihenschaltung von Boden-Feder und Bein-Feder
    - $k_{ges} = k_0 * \frac{k_{Boden}}{k_{Boden}+k_0}$
    - k_{ges} für sehr steife Böden ist ungefähr gleich k_0
    - k_{ges} soll beim idealen Sprung für eine Änderung der Bodensteifigkeit
    - k_{Boden} ungefähr gleich bleiben
    - $k_{ideal} = k_{ges} * \frac{k_{Boden}}{k_{Boden}-k_{ges}}$
- BRK ist für t=0 19.1 N
    - m=1,95 kg

Auf Grund der Stabilität des Versuchsprogramms wurde darauf verzichtet die Versuche zu wiederholen. Pro Versuchssequenz konnten Daten von ca. 20 aufeinander folgenden Sprüngen aufgezeichnet werden. Zeigt die die gespeicherten Dateien.

Tabelle 2.2: Übersicht über die gespeicherten Dateien

Bodenbelag	**Dateiname**	**Bemerkungen**
Standardunterlage (Holz)	ScopeData_11 ScopeData_16 ScopeData_17 ScopeData_18	Halbe Zeit mit Stufe K=350 K=450
Beton(Papier)	ScopeData_12	
Tartan	ScopeData_15 ScopeData_19 ScopeData_20	
Schaumstoff	ScopeData_13 ScopeData_14	Höhe 1.3cm Höhe 2.6cm
Schuh	ScopeData_22 ScopeData_23 ScopeData_27 ScopeData_28	 K=350 K=450
Adipren	ScopeData_24 ScopeData_25 ScopeData_26	 K=450 K=350

3. Experimente

Damit die Ergebnisse aus den Experimenten strukturiert analysiert werden können, werden zunächst eine qualitative und anschließend eine quantitative Analyse erfolgen.

3.1. Qualitative Analyse

Beschreibt die Ergebnisse der Qualitativen Analyse aus den, im Experiment gewonnen Daten.

3.1.1. Vergleich unterschiedlicher Beinsteifigkeiten

Wie zuvor beschrieben, nutzt der Marco-Hopper eine durchgehend konstante Beinsteifigkeit. Allerdings ist es auch möglich, eine variable Zusatzsteifigkeit dem System hinzuzufügen. Dies bewirkt, dass die individuell dissipierte Energie, die dem System verloren ging, wieder zugeführt werden kann. Die folgenden Abbildungen verdeutlichen den Zusammenhang.

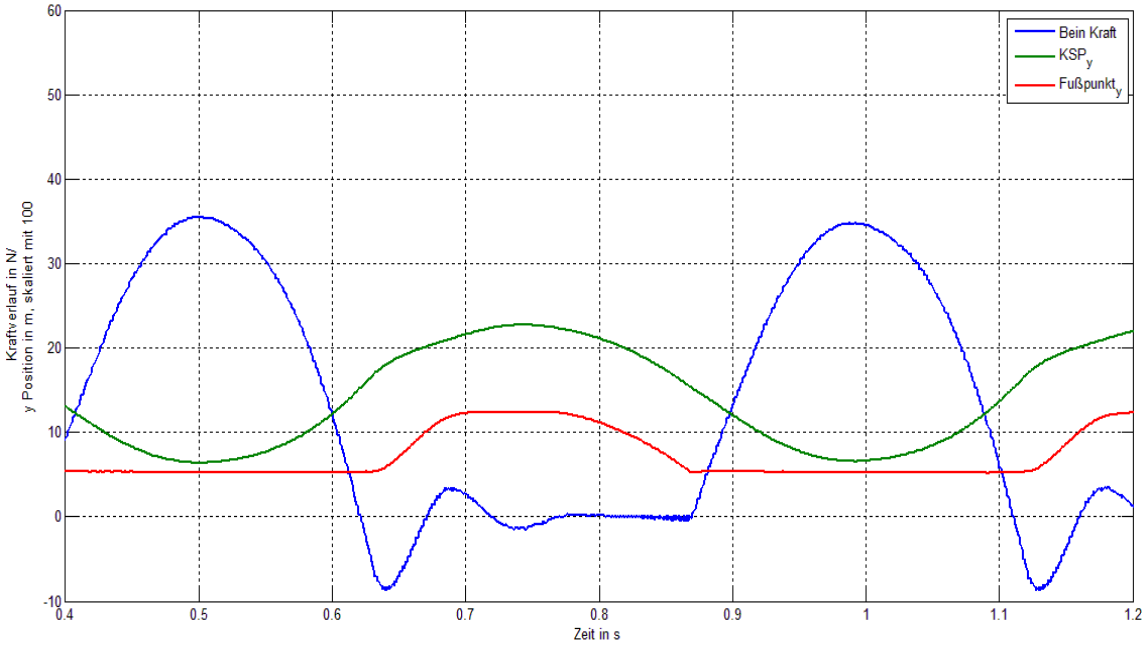


Abbildung 3.1: Verlauf der Beinkraft, des Körperschwerpunkts und des Fußpunkts beim Hüpfen auf Papier-Untergrund (Beton) mit konstanter Steifigkeit

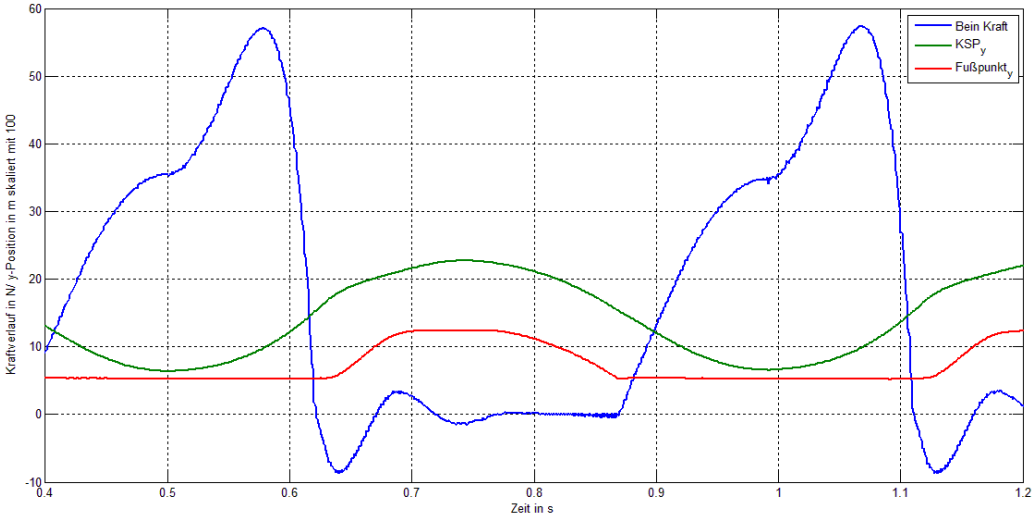


Abbildung 3.2: Verlauf der Beinkraft, des Körperschwerpunkts und des Fußpunkts beim Hüpfen auf Papier-Untergrund (Beton) mit variabler zusätzlicher Steifigkeit

Der Verlauf des Körperschwerpunkts und des Fußpunkts variiert zwischen den beiden Modifikationen nicht. Das liegt daran, dass das konzeptionelle Design des Marco-Hopper´s kongruent ist und somit die maximale Distanz zwischen dem Fußpunkt und dem Körperpunkt fest definiert ist. Lediglich beim Verlauf der Kraft des Beins entstehen signifikante Unterschiede. Der Abfall der blauen Kurve unterhalb des Nullpunkts, aufgrund von Relikten in der Flugphase, die durch die Auslenkung zwischen Körper- und Fußmasse entstehen, ist ebenfalls bei beiden Kurvenverläufen markant. In Abbildung 3.1 weicht jedoch der Verlauf der Beinkraft (blaue Linie) im Vergleich zur Abbildung 3.2 ab. Während in der ersten Abbildung eine gleichmäßige Steigung zu verzeichnen ist, enthält die zweite Abbildung einen biphasigen Anstieg. Diese Steigung ist auf die Zusatzsteifigkeit (Δk) zurückzuführen, da zusätzliche Energie generiert wird. Dieser Verlauf ist allerdings nicht vergleichbar mit menschlichen Sprüngen (Linthorne, 2001). Ein weiterer signifikanter Unterschied ist der Zeitpunkt der maximalen Kraft im Verhältnis zum Abstand zwischen Körperschwerpunkt und Fußpunkt. In Abbildung 3.1 ist der Höhepunkt der Kraft zu dem Zeitpunkt, wo der Abstand zwischen Körperschwerpunkt und Fußpunkt minimal ist, bei Abbildung 3.2 hingegen, ist der Abstand etwas nach rechts verschoben. Dies ist ebenfalls ein Indiz dafür, dass es nicht den realen Sprungverläufen folgt, da der Krafthöhepunkt bei realen Sprüngen, zum Zeitpunkt der höchsten Beinflexion stattfindet (Farley et al., 1991).

3.1.2. Sprunghöhenvergleich für verschiedene Bodeneigenschaften

Der Vergleich der unterschiedlichen Sprunghöhen verdeutlicht den Einfluss des Untergrunds mit den individuellen Eigenschaften.

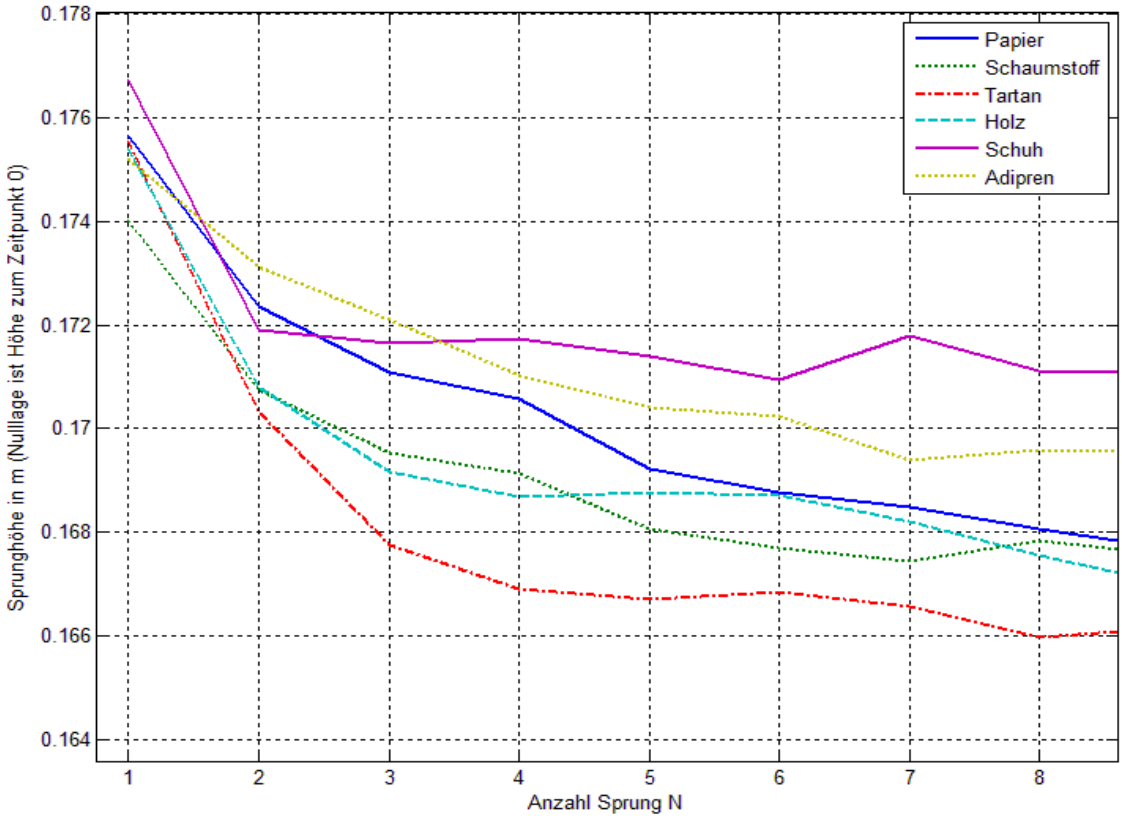


Abbildung 3.3: Sprunghöhenverlauf für unterschiedliche Böden

In Abbildung 3.3 werden die maximalen Sprunghöhen für die ersten acht Sprünge dargestellt. Die Sprunghöhe wird dabei über den Körperschwerpunkt bestimmt, da hier eine geringere Varianz im Verglich zum Fußpunkt gegeben ist. Beim Verlauf ist deutlich zu erkennen, dass alle Höhen nach den ersten zwei bis drei Sprüngen abnehmen. Danach manifestiert sich für jeden Boden eine nahezu konstante Sprunghöhe. Der Schuh ist hierbei nicht nur in der Sprungleistung am besten, sondern stabilisiert sich auch am schnellsten. Direkt im Anschluss folgt das Adipren und mit etwas Abstand die restlichen Materialien. An dieser Grafik wird deutlich, wie entscheidend der Untergrund mit seinen individuellen Eigenschaften für Bewegungen darauf ist. Dennoch sind die Daten mit Bedacht zu begutachten, da umfangreichere Messungen mit dem System und Böden durchgeführt werden müssen, um aussagekräftige Aussagen zu generieren. Weiterhin können auch Steuerungsfehler im Modell zu unterschiedlichen Reaktionen auf den Boden resultieren, die falsch angenommen wer-

den. Ein weiteres Indiz, zur Beeinflussung des Bodens auf die Sprungeigenschaft zeigen die folgenden Abbildungen.

3.1.3. Phasenverschiebung aufgrund der unterschiedlichen Bodeneigenschaften

Die beiden Grafiken verdeutlichen den Sprunghöhenverlauf über eine gewisse Zeitspanne.

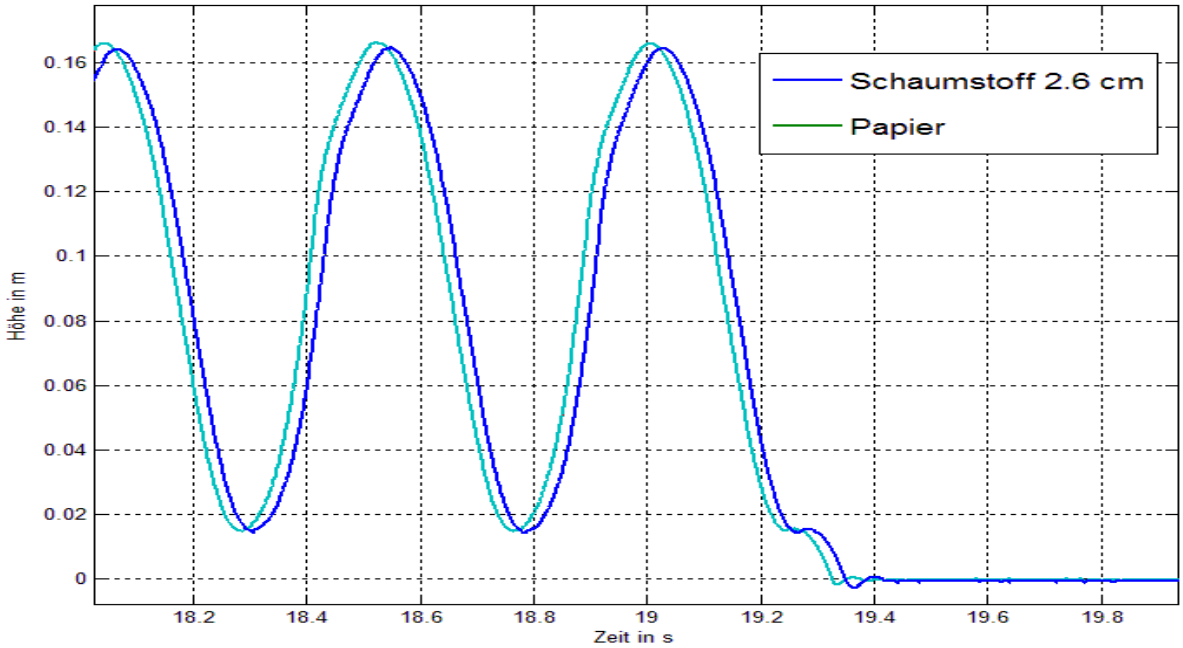


Abbildung 3.4: Phasenverlauf beim Hüpfen auf Schaumstoff- und Papieruntergrund

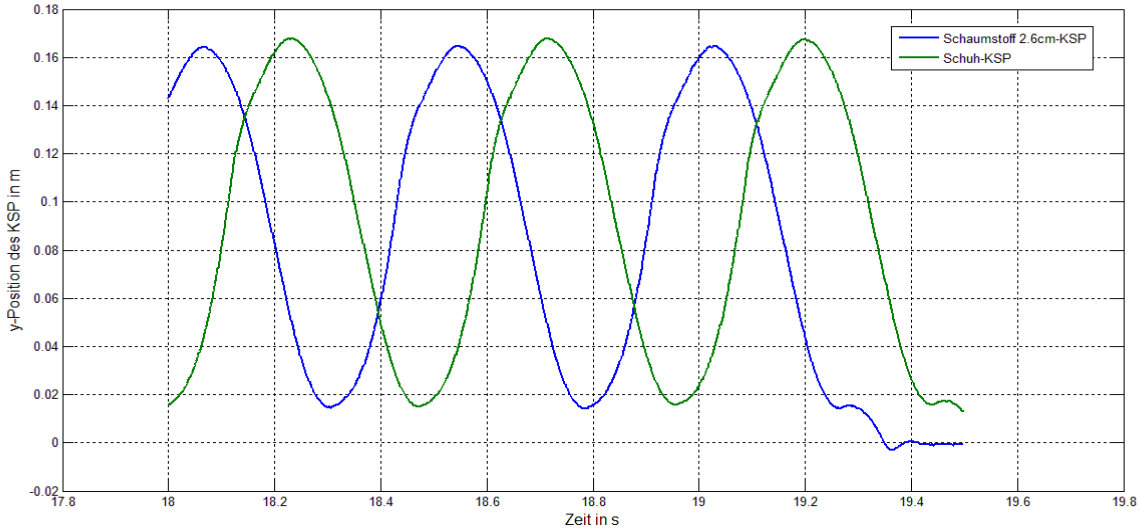


Abbildung 3.5: Phasenverlauf beim Springen auf Schaumstoff und Schuh

Die Sprunghöhen unterscheiden sich hierbei kaum, dennoch entstehen Phasenverschiebungen zwischen unterschiedlichen Böden. Wie lässt sich nun der divergierende Verlauf erklären? Der Ursprung der Verschiebung könnte zum Einen an der Bodenkontaktzeit oder zum Anderen an der Flugzeit liegen. Mit Hilfe der quantitativen Analyse, speziell dem Duty-Factor, soll nun die Ursache genauer bestimmt werden. Daraus lassen sich genauere Erkenntnisse erschließen, die für die Optimierung der Modelle genutzt werden können.

3.2. Quantitative Analyse

Beschreibt die Ergebnisse der quantitativen Analyse aus den, im Experiment gewonnen Daten.

3.2.1. Duty Factor

Ausgehend von der Analyse der Sprungdaten soll die Auswirkung des Bodenmaterials auf den Duty Factor untersucht werden. Der Duty Factor DF gibt das Verhältnis zwischen Boden-Kontaktzeit BK und Zykluslänge ZL an.

$$DF = \frac{BK}{ZL}$$

Die Zykluslänge ZL gibt den Zeitraum eines jeden Sprungs von Absprung (Take-Off) bis zum nächsten Absprung wieder. Die Boden-Kontaktzeit BK meint den Zeitraum von Landung (Touch-Down) bis zum nächsten Absprung. Der Duty Factor ergibt also den Anteil des Sprunges wieder der auf dem Boden verbracht wird. Beim menschlichen Sprung liegen die Werte für den Duty Factor über 0.5. Wie in Tabelle 3.1 zu erkennen ist weisen auch die Versuche mit Marco Hopper diese Tendenz auf, was für die Realitätsnähe der Versuche spricht. Variierende Duty Factors können als ein Indikator für eine resultierende Phasenverschiebung beim Sprung auf verschiedenen Böden angesehen werden.

Tabelle 3.1: Durchschnittlicher Duty Factor in Abhängigkeit des Boden Materials, das Standard Material Holz ist grün markiert, rot markiert sind Extremwerte

Material des Bodens (Fußmaterial Adipren)	Mittlere Flugdauer in ms	Mittlere Boden-Kontaktzeit BK in ms	Mittlere Zyklus-länge ZL in ms	Mittlerer Duty Factor – mean_DF
Papier (ScopeData_12)	233,37	247,30	480,67	0.5205
Adipren (ScopeData_24)	234,56	249,65	484,21	0.5215
Schuh (ScopeData_22)	235,04	250,58	485,62	0.5217
Tartan (ScopeData_15)	231,32	249,40	480,72	0.5249
Holz (ScopeData_16)	230,96	249,60	480,56	0.5255
Schaumstoff (ScopeData_14)	229,1	252,08	481,18	0.5298

In Tabelle 3.1 sind die mittleren Werte des Duty Factor für alle verwendeten Bodenarten angegeben. Die Zykluslänge eines Sprunges beträgt im Mittel ungefähr 0,48 s. Die Änderungen der Werte des Duty Factor liegen alle im tausendstel Bereich. Anhand der ermittelten Werte kann die Vermutung aufgestellt werden, dass der Duty Factor mit zunehmend „weicheren“ Material zunimmt. Interessant ist, dass die Zykluslänge des Sprunges und die Bodenkontaktzeit nicht im gleichen Maße von der Änderung des Bodens abhängen. Naheliegend wäre die Vermutung, dass bei weichen Materialien die Bodenkontaktzeit maximal wird und dementsprechend auch die Zykluszeit zunimmt. Es kann die Unterscheidung zwischen weichen „dissipativen“ und weichen „energieerhaltenden“ Böden getroffen werden. Schaumstoff ist ein weicher „dissipativer“ Boden. Die Bodenkontaktzeit ist relativ lang und die Dauer der Flugphase ist relativ kurz. Im Gegensatz dazu steht der weiche Schuh. Auch bei Verwendung des Schuhmaterials als Boden ist die Boden-Kontaktzeit im Mittel hoch (zweithöchste Boden-Kontaktzeit). Allerdings ist die Flugdau-

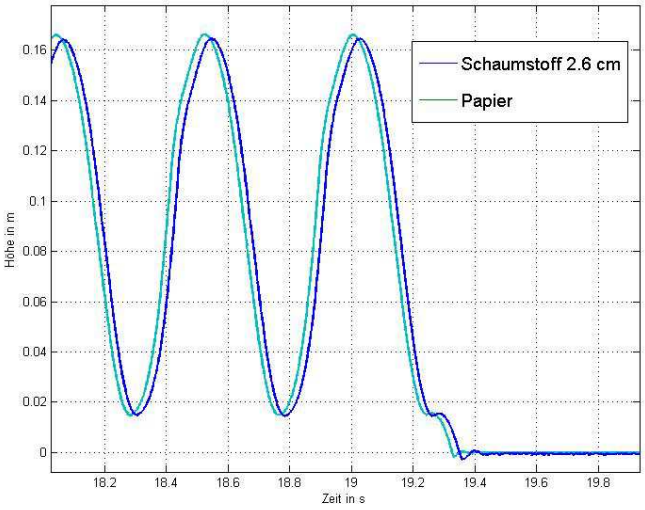


Abbildung 3.6: KSP Bewegung über der Zeit bei Sprung auf verschiedenen Materialien, dargestellt sind die letzten drei Sprünge

er die längste bei den verglichenen Materialien. Es kann die Behauptung aufgestellt werden, dass das Schuhmaterial Sprungenergie speichert und diese wieder in einen neuen Sprung geben kann. Sehr ähnlich zu den Werten des Schuhs sind diejenigen für das Adipren. Auch hier kann von einem „energie-erhaltenden“ Material gesprochen werden. Werte für Flugdauer und Bodenkontaktzeit sind denen des Schuh-Bodens sehr ähnlich.

Je höher der Duty Factor, einen desto längeren Anteil hat die Boden-Kontaktzeit am gesamten Sprung. Durch die unterschiedlichen Boden-Kontaktzeiten verschieben sich die Abläufe der Sprünge gegeneinander. Sprungvorgänge mit größerem Duty Factor eilen denen mit kleinerem nach, eine Phasenverschiebung der Sprünge findet statt. Wie in Abbildung 3.6 zu erkennen ist verschiebt sich der Sprungverlauf bei verschiedenen Bodenmaterialien. Als Beispiel wurden an dieser Stelle die Materialien Papier und Schaumstoff gewählt, da diese die „extremsten“ Werte für den Duty Factor annehmen. Beide Sprünge hatten zum Ausgangszeitpunkt des ersten Sprungmaximums denselben zeitlichen Verlauf. Im Laufe der Gesamtzeit verschieben sich die Abläufe der Sprünge gegeneinander. Eine längere Boden-Kontaktzeit beim Material Schaumstoff bewirkt dabei eine positive Phasenverschiebung, während der Sprung aufgrund eines „schlechteren“ Bodens noch in Kontakt ist, kann bei einem anderen Boden schon wieder abgesprungen werden. Eine positive Phasenverschiebung liegt vor, wenn ein Sprung einem Vergleichssprung „nacheilt“ das Sprungmaximum also später erreicht.

Auch eine längere Flugdauer die aufgrund einer Energie-Rückgabe durch den Boden erreicht wird, bewirkt eine positive Phasenverschiebung. Diese tritt beim Boden-Papier auf. Die Phasenverschiebungen aufgrund von Boden-Kontaktzeit (positiv beim Boden Schaumstoff, im Vergleich zum Sprung auf Papier) und der Flugdauer (positiv beim Boden Papier, im Vergleich zum Sprung auf Schaumstoff) heben sich gegenseitig teilweise auf, da sowohl Flugzeit als auch Bodenkontaktzeit vom Material des Bodens bestimmt werden. In unserem in Abbildung 3.6 dargestellten Beispiel bewirkt die Differenz in den Flugdauern die stärkere Verschiebung und somit ein „nacheilen“ der Sprünge auf dem Papier-Untergrund. Das Resultat einer Phasenverschiebung beim Sprung ist das Zustandekommen von mehr bzw. weniger Sprüngen während einem festen Zeitabschnitt.

Die Abschätzung dieser Verschiebung mittels des Duty Factors gelingt nur unzureichend. Gelingen tut dies besser mittels einer Abschätzung der Zykluszeit. Eine vergleichsweise lange Zykluszeit bewirkt eine positive Phasenverschiebung gegenüber Referenzsprüngen.

Über den Duty Factor können dennoch Hinweise auf die Bodenverhältnisse ermittelt werden. Hohe Werte sind ein Hinweis auf eher nachgiebige Bodenverhältnisse.

3.2.2. Energiedissipation beim Sprung in Abhängigkeit verschiedener Bodenverhältnisse

Bei Sprüngen kommt es durch Böden die nicht als ideale Feder abgebildet werden können zu Energie-Dissipationen. Diese Energie steht weiteren Sprüngen nicht mehr zur Verfügung und muss ersetzt werden. Bei einer konstanten Energiezugabe wie im Falle des Marco Hopper kommt es dadurch zu einem Absinken der Sprunghöhe. Verschiedene Bodentypen bewirken dabei unterschiedlich hohe Dissipationen. Eine Frage die sich stellt ist, wie sich die im Sprung dissipierte Energie bestimmen lässt?

Eine mögliche Idee wäre die Sprunghöhen der ersten beiden Sprünge auf jedem Material zu vergleichen. Ein beobachtbares Phänomen ist, dass die Sprunghöhen der ersten beiden Sprüngen bei allen Bodenproben abnehmen (siehe Tabelle 3.2). Wie stark ist jedoch abhängig von den verschiedenen Böden.

Tabelle 3.2: Abnahme der Sprunghöhe (Höhe KSP relativ zur Nulllage) bei verschiedenen Böden, für die mittleren Sprünge auf dem Papieruntergrund wurden die Sprünge 15-26 von der Mittelwertbildung ausgeschlossen, da an diesen Stellen eine Änderung des Nullniveaus stattfindet (Stufe)

Material	**Sprunghöhe der ersten drei Sprünge**			**Differnz zweier Sprünge**		**Mittlere Sprunghöhe**	
	1	2	3	1./2.	1./8.S	gesamt	ab 8.Sprung
Papier (ScopeData_12)	0.1757 (2.)	0.1724 (2.)	0.1681 (3.)	0.0033 (3.)	0.0076 (3.)	0.1570 (6.)	0.1561 (4.)
Schaumstoff 2.6 cm (ScopeData_14)	0.1740 (6.)	0.1708 (4.)	0.1678 (4.)	0.0032 (2.)	0.0062 (2.)	0.1581 (5.)	0.1558 (5.)
Tartan (ScopeData_15)	0.1755 (3.)	0.1703 (5.)	0.1660 (6.)	0.0052 (6.)	0.0095 (5.)	0.1583 (4.)	0.1562 (3.)
Holz (ScopeData_16)	0.1754 (4.)	0.1708 (4.)	0.1676 (5.)	0.0046 (4.)	0.0078 (4.)	0.1585 (3.)	0.1562 (3.)
Schuh (ScopeData_22)	0.1767 (1.)	0.1719 (3.)	0.1711 (1.)	0.0048 (5.)	0.0056 (1.)	0.1612 (1.)	0.1590 (1.)
Adipren (ScopeData_24)	0.1752 (5.)	0.1731 (1.)	0.1696 (2.)	0.0021 (1.)	0.0056 (1.)	0.1605 (2.)	0.1582 (2.)

Wie man in Abbildung 3.7 erkennen kann setzt sich der Abwärtstrend der Sprunghöhen unabhängig vom Material ungefähr innerhalb der ersten acht Sprünge fort, bevor sich die Sprunghöhe relativ stabilisiert. Interessant sind die Entwicklung der Sprunghöhen und der Vergleich der Platzierungen in Abhängigkeit des Bodenmaterials (siehe Tabelle 3.2).

Während des ersten Sprunges kann die gesamte in das System gebrachte Energie für die Erreichung einer maximalen Sprunghöhe genutzt werden. Zusätzliche Energie bekommt das System aus der Federwirkung des Bodens. Die „Boden-Feder“ wird entspannt und gibt Energie in das System. Es lässt sich folgern, welches Material die stärkste Federwirkung besitzt. Auf den ersten Rängen sind das federnde Schuhmaterial, das Papier und Tartan zu finden. Die Ergebnisse für den Schuh und das Tartan überraschen nicht, da diese leicht als federnde Materialen zu erkennen sind. Das an zweiter Stelle platzierte Papier könnte damit erklärt werden, dass sich für dieses der Messaufbau in Vergleich zu fast allen anderen Proben unterscheidet.

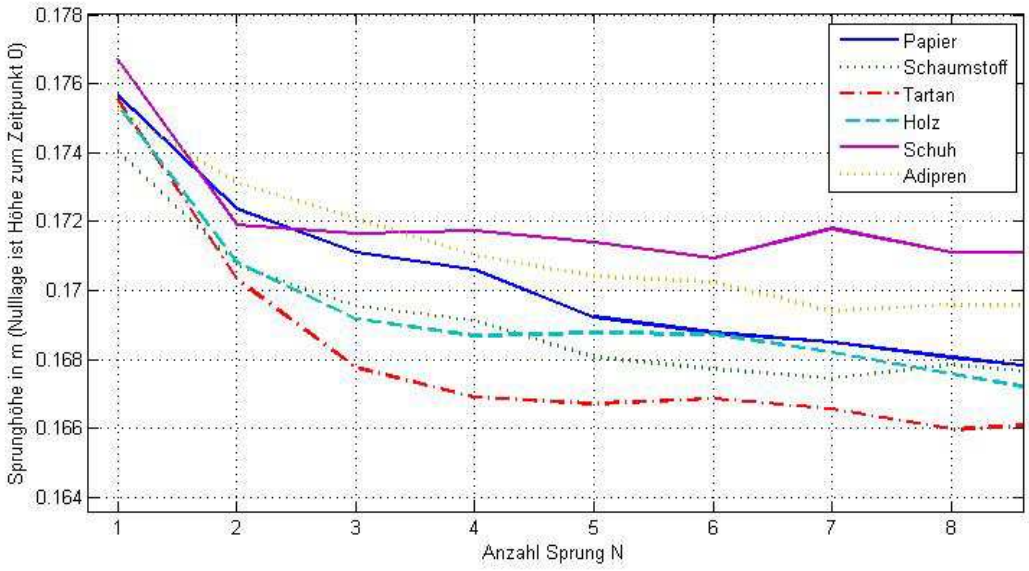


Abbildung 3.7: Abnahme der Sprunghöhe innerhalb der ersten 8 Sprünge in Abhängigkeit verschiedener Materialien

Der Papier-Probekörper wurde genau wie der Standard-Boden aus Holz auf eine Metall-Schiene aufgesetzt und mit Schrauben fixiert. Dadurch könnten Vorspannungen entstehen, die eine Federwirkung ausüben. Auch die Platzierungen von Holz, Adipren und Schaumstoff sind plausibel. Der Schaumstoff-Boden kann seine Feder-Wirkung kaum entfalten, da die Entspannung des Materials länger braucht als der Absprung-Vorgang. Die Werte für Tartan, Holz und Adipren liegen zu nah beieinander um verlässliche Aussagen treffen zu können.

Ab dem zweiten Sprung haben die dissipativen bzw. energie-erhaltenden Eigenschaften der Böden eine Auswirkung auf die erreichte Sprunghöhe. Es kann eine Einschätzung gegeben werden, welche Böden Sprungenergie speichern und diese zurück in den Bewegungsablauf geben. Mittels der Differenzen zischen 1. und 2. bzw. 1. und 8. Sprung (siehe Tabelle 3.2) kann an dieser Stelle eine Rangfolge in der Energieerhaltung der Böden ermittelt werden. Umso kleiner die Differenz der Sprunghöhe zwischen dem ersten und folgenden Sprüngen desto mehr Energie gibt der Boden jeweils in den nachfolgenden Sprung. Am aussagekräftigsten ist an dieser Stelle der Vergleich der Werte für die Differenz zwischen 1. und 8. Sprung. Die Abnahme der Sprunghöhe aufgrund dissipativer Effekte ist zum größten Teil abgeschlossen was eine Bewertung der Böden an dieser Stelle ermöglicht. Der Schuh und das schuhähnliche Material Adipren schneiden in Bezug auf die Energieerhaltung am besten ab. Dieser Effekt ist beim Verhalten von Sportschuhen erwünscht, daher überrascht das Ergebnis nicht. Die relativ hohe Platzierung des Schaumstoffs kann damit erklärt werden, dass der Sprungvorgang schneller abläuft als die Verformung des Materials. Der Schaumstoff bleibt ab dem ersten Sprung in einem verformten Zustand, was keine weitere Energieaufnahme oder –abgabe möglich macht. Es kann in seiner Auswirkung als relativ neutral angesehen werden. Die Werte für Papier und Holz haben eine ungefähr gleiche Größenordnung. Die Dissipation kann mit einer Reibung der Schichten untereinander (schichtenweiser Aufbau der Standardunterlage Holz, mit resultierender Reibung bei Verformung des Versuchskörpers; Reibung durch die Verschraubung am Versuchskörperträger) und/oder einer Reibung mit dem Versuchsträger erklärt werden. Die größte Differenz zwischen dem 1. und 8.Sprung weist der Untergrund aus Tartan auf. Eine mögliche Interpretation wäre, dass Tartan so entworfen ist, dass es die Energie von schlagartigen Belastungen (in diesem Fall von Sprüngen) aufnimmt und dissipiert um Verletzungen/Überlastungen von Sportlern zu verhindern. Das beobachtete Verhalten ist schlüssig.

Eine weitere beobachtete Größe die Interpretationen zu dissipativen Effekten von Boden-Materialien zulässt ist die mittlere Sprunghöhe auf jedem Boden. Durch sie lässt sich eine kombinierte Einschätzung gewinnen welche Materialien auf der einen Seite relativ viel Energie speichern können (Federeigenschaften des Bodens) und auf der anderen Seite wieder Energie in neue Sprünge geben können (dissipative Eigenschaften von Böden). Um mögliche Effekte auf die mittleren Sprunghöhen die während der ersten acht Sprünge auftreten auszuschließen wurde eine mittlere Sprunghöhe für die Gesamtzahl der Sprünge ermittelt und eine weitere mittlere Sprunghöhe exklusive der ersten acht Sprünge. Die Rangfolge der Böden ist jedoch bei beiden Betrachtungen gleich, was darauf schließen lässt, dass Effekte die durch das „Einspringen“ auftreten bei dieser Betrachtung vernachlässigt werden können. An erster Stelle stehen wiederum die Böden Schuh und Adipren. Diese haben eine gute Federwirkung und dissipieren im Vergleich relativ wenig Energie. Die

Erkenntnisse die bei der Betrachtung der Sprunghöhe des 1. Sprungs und der Sprunghöhenabnahme gewonnen wurden bestätigen sich bei der Betrachtung dieser Größe. Tartan und Holz liegen auf einem ähnlichen Niveau. Auch hier stimmt die Beobachtung mit den Erkenntnissen aus den vorherigen Überlegungen überein. Der Schaumstoff bildet wie erwartet das Schlusslicht bei der Betrachtung der durchschnittlichen Sprunghöhen. Wie schon im vorigen Abschnitt beschrieben bildet die unzureichende Verformung des Schaumstoff-Bodens eine Barriere für die Rückgewinnung von Sprungenergie. Ähnlich ist die Platzierung des Papieruntergrunds zu erklären. Diese sehr steife Unterlage hat zwar einen relativ niedrigen dissipativen Einfluss kann jedoch durch die mangelnde Elastizität die Sprunghöhe nicht positiv beeinflussen.

Abschätzen der Energiedissipation und Ermittlung von Bodenparametern

In einem nächsten Schritt sollen mithilfe der Erkenntnisse die aus den bisher qualitativen Betrachtungen gezogen wurden quantitative Aussagen zur Dissipation von Energie beim Bodenkontakt ermittelt werden. Es soll die Annahme getroffen werden, dass ein Boden-Material sowohl linear-elastische als auch linear-dämpfende Eigenschaften aufweist, die den Sprung beeinflussen. Das wahre Materialverhalten kann zum Teil stark von diesen Vereinfachungen abweichen, wie es schon für das Beispiel des Schaumstoffs in den bisherigen Betrachtungen ersichtlich ist. Die Verformungsgeschwindigkeit des Schaumstoffs ohne Last, ist zu langsam um zwischen zwei Sprüngen wieder die Ausgangsform annehmen zu können. Daher kann zum Beispiel an dieser Stelle nur sehr schwer von einem linear-elastischen Verhalten gesprochen werden, da der Arbeitspunkt während der Versuche vermutlich außerhalb dieses Bereiches liegt. Ähnliche Probleme ergeben sich bei anderen Probekörpern und der Trennung von verschiedenen Effekten. Alle erarbeiteten Ergebnisse müssen mit Vorsicht als wahr geprüft werden.

Eine Ermittlung von Bodenparametern ist notwendig, da diese bei den verwendeten Böden nicht im Vorhinein bekannt sind. Gelingt eine Quantifizierung der Böden können Voraussagen für das Sprungverhalten auf anderen Materialien getroffen werden.

3.2.3. Ermittlung der Steifigkeit der Böden

Die grundlegende Idee hinter der Ermittlung eines Wertes für die Steifigkeit der einzelnen Böden ist der Gedanke, dass vor dem Zeitpunkt des ersten Absprunges der Boden durch die aufgebrachte Kraft die zum Abspringen führt, verformt wird. Es wird angenommen, dass dieser Zusammenhang einem linear-elastischen Kraft-Verformungs-Gesetz folgt:

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta s}$$

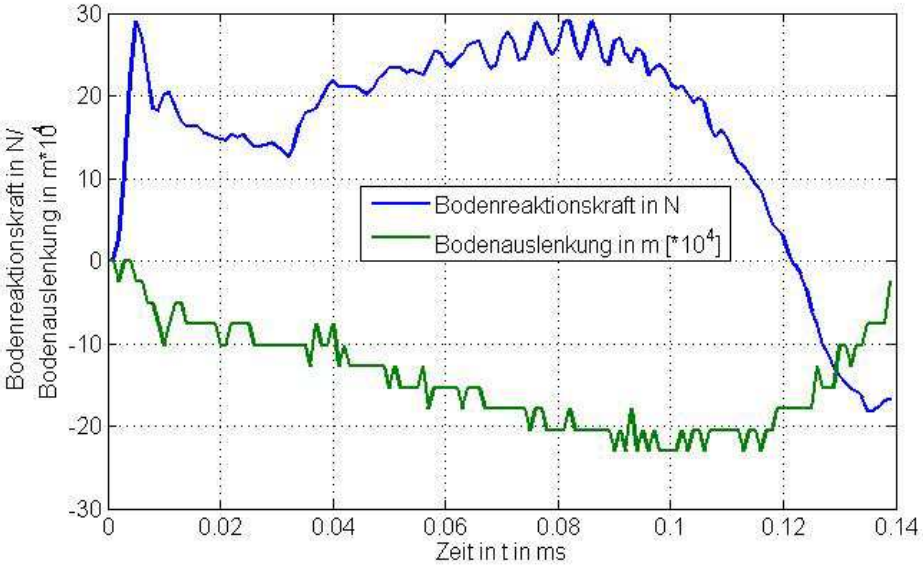


Abbildung 3.8: Verlauf Bodenreaktionskraft und Auslenkung des Bodens vor dem ersten Sprung bei Adipren-Boden

k [N/m] ist der Proportionalitätsfaktor zwischen aufgebrachter Kraft und Verformung und soll im Folgenden gleichbedeutend mit der Steifigkeit des Bodens sein. ΔF [N] und Δs [m] (Darstellung der Verläufe der Änderungen für das Material Adipren in Abbildung 3.8) geben die Änderungen bei der aufgebrachten Kraft und dem Verformungsweg des Bodens wieder. Die aufgebrachte Kraft wird mittels der Bodenreaktionskraft bestimmt die während den Versuchen aufgezeichnet wird. Eine Verformung des Bodens kann durch die Messung der Position des Fußes bestimmt werden. Verformungen aufgrund der Gewichtskraft werden dabei berücksichtigt. Das Matlab-Skript zur Ermittlung dieser Größen ist im Anhang zu finden. In Tabelle 3.3 sind die Ergebnisse für die einzelnen Böden dargestellt. Aus vorherigen Arbeiten war der Steifigkeitswert für das Adipren bekannt (Kalveram et al., 2010, S. 153) Der mittels der vorgestellten Methode bestimmte Wert für die Steifigkeit des Bodens aus Adipren stimmt mit dem aus der Literatur bekannten Wert überein, daher werden die für die anderen Böden ermittelten Steifigkeiten als korrekt angenommen. Fraglich ist ob diese ermittelte Steifigkeit für ein Bodenmodell verwendet werden kann und mit diesem Wert korrekte Ergebnisse bei simulierten Sprüngen liefert. Eine mögliche Fehlerquelle wäre, dass die ermittelten Steifigkeiten im betrachteten Auslenkungsbereich Aussagekraft besitzen, aber bei größeren Auslenkungen ihre Steifigkeiten erhöhen, also ein nichtlineares Materialverhalten vorliegt. Diese Annahme scheint plausibel, da keines der verwendeten Materialien als ideale Feder angesehen werden kann.

Tabelle 3.3: Steifigkeit der verschiedenen Böden bei Annahme von linear-elastischem Verhalten

Material	Steifigkeit k in N/m
Holz (ScopeData_16)	28.930
Papier (ScopeData_12)	46.075
Tartan (ScopeData_15)	24.169
Schuh (ScopeData_22)	37.254
Schaumstoff 2.6 cm (ScopeData_14)	19.230
Adipren (ScopeData_24)	15.105

Die in Tabelle 3.3 angegebenen Werte scheinen auf den ersten Blick plausibel, da die Rangfolge der Materialien mit Vorstellungen und haptischen Versuchen übereinstimmt. Als kritisch muss der Wert des Schaumstoffes angesehen werden, da dieser schon im Stand eine hohe Auslenkung aufweist und vermutlich den Bereich des linear elastischen Verhaltens bereits verlassen hat.

3.2.4. Ermittlung der Dämpfungskonstanten der Böden

Es wurde versucht mittels verschiedener Ansätze die Dämpfung-Kennwerte der Böden zu bestimmen. Der erste Ansatz basiert auf der Überlegung, dass die Verluste die durch die im Boden verrichtete Dämpfungsarbeit entstehen sich in einer Verringerung der Sprunghöhe niederschlagen. Der Vergleich der Sprunghöhen bei verschiedenen Böden mit einem Referenzsprung bei dem das Bodenmaterial als nicht dämpfend angenommen wird ergibt eine dämpfungsabhängige Sprunghöhenreduktion mittels derer ein Dämpfungswert für die verschiedenen Böden bestimmt werden könnte. Allerdings haben sowohl die Feder- als auch die Dämpfereigenschaften der verschiedenen Böden eine Auswirkung auf die Sprunghöhe. Eine Quantifizierung der einzelnen Anteile gestaltet sich schwierig.

Eine zweite Möglichkeit ergibt sich aus dem Versuch die Dämpfung über die gemessene Kraftspitze beim Auftreffen des Fußes auf den Boden zu bestimmen. Es kann angenommen werden, dass zum Zeitpunkt des Touch-Down die gesamte Kraft über den „Dämpfer“ des Bodens übertragen wird, da die Zeit zum Einfedern des Bodens nicht ausreicht. Die Dämpfungskonstante des Bodens könnte also mittels des Verhältnisses zwischen Geschwindigkeit des Fußes kurz vor dem Auftreffen und der resultierenden Bodenreaktionskraft ermittelt werden.

Eine dritte Möglichkeit wäre die Annahme einer steifigkeitsproportionalen Dämpfung der Böden.

Ermittlung des Kraftabbaus der Böden in Anlehnung an DIN EN 14808

Um ein Maß für die Dämpfung von Sportböden zu erhalten wird die Ermittlung des Kraftabbaus R vorgeschlagen. Der Kraftabbau von Sportböden ist als „Fähigkeit eines Sportbodens, die Stoßkraft eines auf die Oberfläche fallenden Körpers zu reduzieren“ (vergleiche DIN EN 14808, S. 4) definiert. R kann als Dämpfung und Nachgiebigkeit infolge eines bestimmten Aufpralls interpretiert werden. In der Norm wird ein Prüfvorgang definiert mit Hilfe dessen der Wert des Kraftabbaus ermittelt werden kann. Prinzipiell stellt der Kraftabbau ein Verhältnis zwischen der maximalen Kraft beim Fall einer Masse auf einen starren Boden (Betonplatte, F_r) und einen dämpfenden, nachgiebigen Boden (zu prüfender Sportboden, F_t) dar.

$$R = \left(1 - \left(\frac{F_t}{F_r}\right)\right) * 100$$

Die Definition des Kraftabbaus lässt sich auch auf die Experimente mit unterschiedlichen Böden an Marco anwenden. Es muss dazu ein Referenzboden gewählt werden dessen Spitzenkraftwert bei den Sprungversuchen als Referenzkraft für die Verhältnisbildung genommen wird. Der genaue Prüfvorgang der in DIN EN 14808 definiert wird kann nicht durchgeführt werden. Daher müssen aus den gewonnenen experimentellen Daten Werte ausgewählt werden, deren Auswertung ähnliche Aussagen zulässt wie der Wert des Kraftabbaus. Die Referenzkraft F_r wird aus Sprüngen unmittelbar auf dem Sensor bestimmt. Der Sensor kann als steifster Boden ohne Dissipation angenommen werden. F_r wird mittels Mittelwertbildung der gemessenen Impact-Kräfte aus acht Sprüngen ermittelt. Da die Messwerte für den Sprung auf dem Sensor nach der Störung durch die Stufe aufgenommen wurden, werden erst Sprünge gezählt die mindestens drei Sprünge nach der Störung stattfinden. Für die Ermittlung der Vergleichskraftwerte F_t der einzelnen Bodenproben gilt ein ähnliches Vorgehen. Die ersten acht Sprünge eines jeden Versuches werden nicht in die Auswertung einbezogen, da an dieser Stelle ein „Einspringen“ mit einem konstanten Absinken der Sprunghöhe stattfindet. Ab dem Moment der Störung durch die Schaltung der Stufe ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht für alle Bodenproben gewährleistet. Daher werden nur Sprünge bis zum 14. Sprung in die Mittelwertbildung einbezogen. Die so ermittelten Kräfte F_t und F_r können zur Ermittlung eines Wertes für den Kraftabbau in Anlehnung an DIN EN 14808 verwendet werden. Da es allerdings zu einer Abweichung von der normierten Versuchsdurchführung können folgende Fehlerquellen auftreten:

1. Unterschiedliche Fallhöhen des „Körpers“ für die verschiedenen Materialien, aufgrund der verschiedenen Federwirkung der Böden
2. Kraftmessung findet abweichend von der Norm unterhalb des Bodens statt und nicht „im Fuß“
3. Keine Relaxationszeit des Bodens, das heißt eher dynamische Dämpfungswirkung des Bodens bei zyklischer Belastung ermittelt, Norm gibt Erholungszeiten für die Bodenproben vor
4. Abmessungen der Bodenproben sind so klein, dass Randeffekte nicht ausgeschlossen werden können
5. Dämpfendes Material in der Ferse (Fuß aus Adipren) nimmt Stoßenergie auf

Zu 1.: Sehr elastische Materialien erreichen eine dauerhaft höhere Sprunghöhe. Durch die erhöhte potentielle Energie fällt auch der Landestoß entsprechend höher aus. Das Verhältnis aus potentieller Energie aus der Sprunghöhe und dem Landestoß muss in die Betrachtung einbezogen werden.

Zu 3.: Da der Boden keine Relaxationszeit hat verändert er im Laufe von aufeinanderfolgenden Versuchen seine Eigenschaften. Zu erwarten ist, dass der dynamische Kraftabbau unterhalb des Wertes des Kraftabbaus bei einzelnen Sprüngen mit Relaxationszeit für das Material liegt. Mögliche Vergleichswerte aus Literaturquellen werden also über den ermittelten Werten liegen.

Zu 4.: Bei sehr kleinen Probekörpern kann kein ungestörtes Materialverhalten angenommen werden. Die Störung wird höchstwahrscheinlich dazu führen, dass eher ein nichtlineares Verhalten bei bestimmten Eigenschaften erreicht wird, als eigentlich für das Material zu erwarten wäre.

Zu 5.: Durch das dauerhafte Vorliegen von dämpfendem Material im Versuchsaufbau wird die Dämpfungswirkung der Bodenproben verfälscht. Da aber auch während des Referenzsprungs der Fuß aus Adipren vorhanden ist, kann davon ausgegangen werden, dass der zusätzlich ermittelte Kraftabbau allein den Bodenproben zuzuschreiben ist.

Tabelle 3.4: Ermittlung der Impactkraft bei Landung auf verschiedenen Böden und Verhältnisbildung zur Bestimmung des relativen Kraftabbaus, die angegebene Impactkraft ist dabei ein Mittelwert der Impactkräfte (Bodenreaktionskräfte beim Aufprall) der Sprünge 8-14, bei den ersten 8 Sprüngen nimmt die Sprunghöhe stetig ab (mögliche Fehler bei der Interpretation) und ab dem 15. Sprung liegt bei manchen Messungen die Stufe vor (Fehler bei der maximalen Kraft nach der Stufe)

Boden	**Gemittelte Impactkraft während Sprung 8-14 in N**	**Kraftabbau in % in Bezug auf Sprung auf Sensor**
Papier (ScopeData_12)	237.68	6.1%
Schaumstoff 2.6 cm (ScopeData_14)	116.78	53.9%
Tartan (ScopeData_15)	167.18	33.9%
Holz (ScopeData_16)	241.90	4.4%
Schuh (ScopeData_22)	130.32	48.5%
Adipren (ScopeData_24)	120.62	52.3%
Sprung direkt auf dem Sensor (Sprung 17-25 bei Papier ScopeData_12)	253.08 (F_r)	0%

Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind in Tabelle 3.4 dargestellt. Der Kraftabbau-Wert des Tartans stellt eine realistische Größe dar. Laut DIN EN 14877 wird für Kunststoffflächen für Mehrzweck Sportanlagen je nach Klassifizierung ein Kraftabbau von 25-70 % gefordert (siehe Tabelle 3.4, DIN EN 14877). Der ermittelte Wert von 33.9 % liegt also in einem plausiblen Bereich. Wahrscheinlich ist, dass die wahren Werte für den Kraftabbau höher als ermittelt liegen, da der dynamische Kraftabbau ermittelt wurde. Werden die Prüfbedingungen aus DIN EN 14808 eingehalten, hat das Material Zeit zu relaxieren und kann anschließend mehr Energie aufnehmen.

Die ermittelten Material-Parameter können für die Modellbildung verwendet werden. Die Dämpfungseigenschaften des Bodens lassen sich durch eine Dissipation eines des Kraftabbau entsprechenden Anteils der Sprungenergie darstellen.

4. Modellbildung mittels Matlab/Simulink

Der Fokus des ADPs liegt auf der Interaktion zwischen Springer und Boden. Neben dem Experiment mit Hilfe des Marco-Hopper ist es auch ein Schwerpunkt, die Sprungbewegungen auf unterschiedliche Böden zu simulieren. In diesem Kapital wird erläutert, wie die Simulation durchgeführt wird.

4.1. Vorstellung der Sprung- und Bodenmodelle

In diesem Teil des ADPs sollen das menschliche Springen und verschiedene Bodeneinflüsse auf die Kinematik und Dynamik bei Sprungbewegungen mit Hilfe Matlab/Simulink simuliert und analysiert werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, das Springen und den Boden in korrekter Weise durch Modelle darzustellen.

4.1.1. Sprungmodelle

Menschen und Tiere bewegen sich in unterschiedliche Bewegungsformen, wie schwimmen, laufen, rennen, springen, etc. In diesem ADP soll der Sprungvorgang durch die Software Matlab/Simulink simuliert werden. Ein Problem ist, auf welche Art und Weise der Körper des Menschen durch Matlab dargestellt werden soll.

Das Springen gehört zu den elementaren Bewegungen in Sport und Alltag. Beim Springen müssen alle Beine gleichzeitig den Körper vom Boden abdrücken. (Thiele, 2010). Ein Höchstmaß an Energiespeicherung, während der Bewegung, bewirkt die Aneinanderreihung und Parallelschaltung von kurzfaserigen Muskeln, langen Sehnen und Bändern. Sehnen geben die gespeicherte Energie fast verlustfrei ab, wenn die Spannung innerhalb der Bewegung wieder nachlässt. Sie fungieren als elastische Elemente und können ersatzweise als Feder betrachtet werden (Ziermann, 2006). Theoretisch würde das einfachste Modell für einen Springer ein Feder-Masse-System sein (Kalveram et al., 2010). Nach diesem Prinzip kann der Bewegungsapparat eines Menschen (Muskeln, Sehnen und Bänder) durch ein Feder-Dämpfer-System und das Gewicht des Körpers durch eine Masse repräsentiert werden.

Wie der Körper des Menschen bei der Simulation während dem Springen dargestellt wird, also wie der Körper (Masse) und die Beine (Feder) miteinander verbunden werden, spielt eine wichtige Rolle. Je nach Verbindungsart entstehen verschiedene Sprung-Modelle. Die unterschiedlichen Varianten der Sprung-Modelle werden im Folgenden dargestellt.

Einmassenschwinger-Sprungmodell

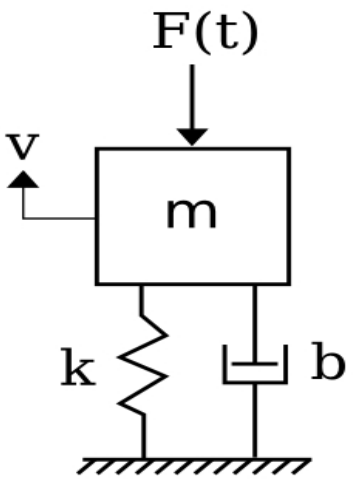


Abbildung 4.1: Einmassenschwinger-Sprung-Modell (Stinger Labs, 2009)

Abbildung 4.1Abbildung zeigt die Freischnitt-Skizze des Sprung-Modells des Einmassenschwingers. Die Masse m repräsentiert das Körpergewicht und der Bewegungsapparat (Bein) wird durch eine Feder mit der Federsteifigkeit k dargestellt. Da in der Realität jede Feder eine steifigkeitsproportionale Dämpfung besitzt, wird eine Dämpfung *b* parallel geschaltet. Die Masse *m* wird direkt mit der Feder verbunden und durch die Feder gestützt. Die Kraft *F* ist die aktive Kraft des Muskels, die das Springen ermöglicht. In realen Fall wird die Sprungkraft durch die Zusammenarbeit von Muskeln, Sehnen und Bändern erzeugt. Bei der Simulation wird Muskelkraft durch eine vorgespannte Federkraft dargestellt.

Das Einmassenschwinger Sprung-Modell ist das einfachste Modell. Dieses Modell kann durch den Aufbau aus lediglich drei Elementen sehr schnell erstellt werden. Eine Simulation kann in kurzer Zeit durchgeführt werden. Der Nachteil aufgrund der getroffenen Vereinfachungen ist offensichtlich: Der Körperaufbau ist undeutlich und die Wirkung der Füße wird vernachlässigt. Aus diesem Grund kann die Simulation mit diesem Modell zu Fehlern führen.

Zweimassenschwinger-Sprungsmodell

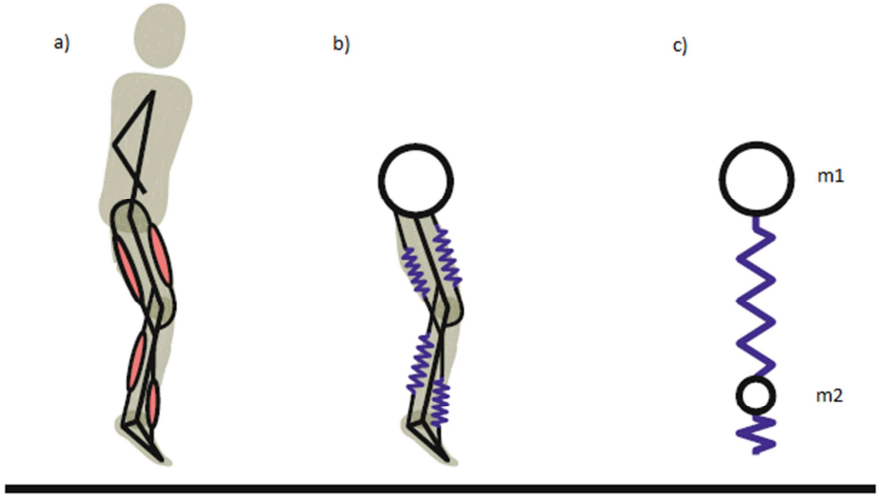


Abbildung 4.2: Zweimassenschwinger-Sprung-Modell] (mod. nach Kalveram et al., 2010 aus Burbach et al., 2013)

Ein anderes Sprung-Modell wird in Abbildung 4.2 gezeigt. In realen Fall besteht das Bein aus verschiedenen Muskeln, wie zum Beispiel dem Rectus Femoris (RF), Biceps Femoris (BF), Tibialis Anterior (TA), und Gastrocnemius (GA) (Kalveram et al., 2010). Diese Muskeln sind für die Erzeugung der Kraft des Sprungs verantwortlich. Wenn diese Muskeln nach dem Hill-Muskelmodell durch Feder-Systeme und das Körpergewicht durch eine Punktmasse ersetzt werden, sieht das Körper wie in Abbildung 4.2 b) aus. Wird die Modellvorstellung weiter vereinfacht, kann der Körper durch zwei Massen und zwei Federn abgebildet werden. Die Masse m_1 repräsentiert den Fuß und die Masse m_2 stellt das Körpergewicht dar.

Dieses Zweimassenschwinger Sprung-Modell bildet im Vergleich zum Einmassenschwinger Sprung-Modell der Körper detaillierter ab. Weil der Fuß separat betrachtet wird, wird das dynamische Verhalten des Modells vermutlich realitätsnäher sein. Ein Problem liegt darin, dass dieses Modell nur die Bewegung in vertikale Richtung abbildet, d.h. dass die Beugung des Beins vernachlässigt wird.

Sprungmodell mit Muskelmodell

Der Muskel des Menschen kann durch mechanische Modelle vereinfacht dargestellt werden. Dadurch wird es möglich, Muskelfunktionen besser zu verstehen und Bewegungsabläufe realitätsnäher darzustellen. Mit ihrer Hilfe können freie optimale Bewegungen bestimmt und Belastungen und Beanspruchungen von Extremitäten beurteilt werden(Henning).

Die Grundlage für die nachfolgend vorgestellten Modelle bildet der biologische Muskel. Zur Darstellung des Muskels wurden zwei mechanische Konzepte verwendet. Zum einen das Modell nach Hill und das Modell nach Häufle.

Eines der grundlegenden Modelle zur Muskelmodellierung stellt das Muskelmodell von A. V. Hill dar. Das Modell beinhaltet drei Arten von Elementen. Ein kontraktiles Element (contractile element, CE), ein serielles Element (series element, SE) und ein paralleles Element (parallel element, PE), wobei CE und SE meist seriell hintereinander geschaltet sind, wie in Abbildung 4.3 a), dargestellt. Abbildung 4.3 b) zeigt eine weitere klassische Struktur des Muskelmodells nach Hill (Henning).

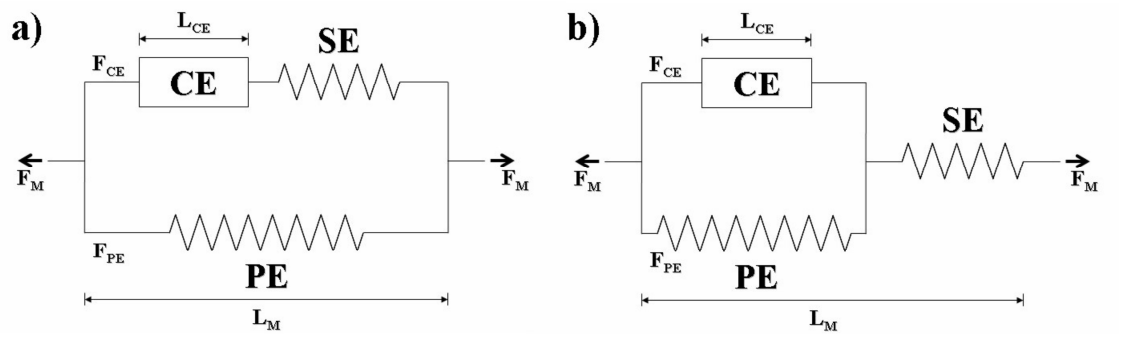


Abbildung 4.3 : Hauptkomponenten des Hill-basierten Modells (Henning, 2006, S. 20).

Hierbei repräsentieren die SE- und PE-Komponenten passive Muskelfasern und das die Muskeln umschließende Bindegewebe (PE) und die Sehnen, das an die Muskeln angeschlossenes serielle elastische Element (SE). Die CE-Komponenten stellen die aktiven Muskelfasern dar.

Basierend auf dem Hill-Muskelmodell wurde ein erweitertes Muskelmodell entwickelt: das Häufle-Muskelmodell (Haeufle et al., 2012). Im Vergleich zum Hill-Muskelmodell erweitert Häufle das kontraktile Element（CE）. Damit ist es besser möglich, die makroskopisch mechanische Struktur und Funktion des biologischen Muskels in Hinsicht auf seine dynamische Rolle während der Kontraktion abzubilden.

Das Hill-Modell (siehe Abbildung 4.3) besteht aus zwei Federn, also einer parallelen und einer seriellen Feder, und einem kontraktilem Element. Häufle hat nun das kontraktile Element durch ein aktives Element (AE) mit einem parallel geschaltetem Dämpfer（PDE）, als auch einer zu AE und PDE seriell geschalteten Feder（SE）, erweitert (siehe Abbildung 4.4).

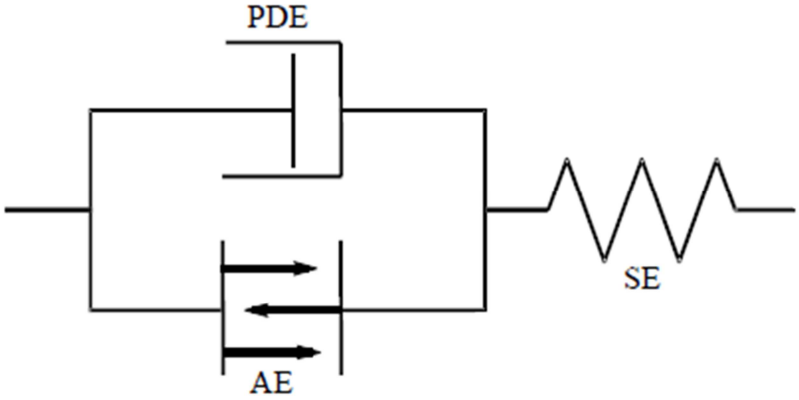


Abbildung 4.4 : erweitertes kontraktiles Element von Häufle Modell (Haeufle et al., 2012)

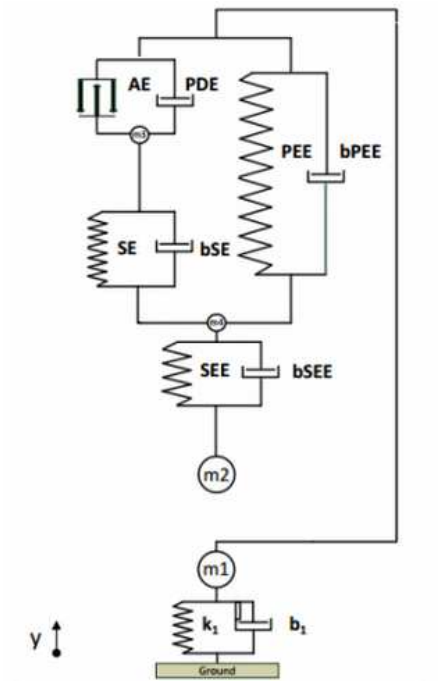


Abbildung 4.5: Hopper-Modell von vergangenem ADP (J.-N. Burbach, 2013)

Abbildung 4.5 zeigt ein Sprung-Modell des vorhergehenden ADPs (WS 2012/13) am Institut für Sportwissenschaft.

In diesem Modell werden die Füße durch die Masse m_1, einer Feder mit der Steifigkeit k_1 und eine Dämpfung mit b_1 abgebildet. Das Körpergewicht wird durch die Masse m_2 repräsentiert und direkt an die Feder SEE drangeheftet. Neben die Masse m_1 und m_2 sind an den Verbindungsstellen der Elemente Massen (m_3 und m_4) eingefügt worden.

Das Besondere an diesem Modell ist, dass die Muskeln der Beine durch das Hill-Muskelmodell abgebildet werden. Dies ermöglicht eine präzisere Darstellung des Körperaufbaus und der Erzeugung der Muskelkraft. Aus diesem Grund könnte die Simulation mit diesem Modell genauere Ergebnisse liefern.

4.1.2. Bodenmodelle

Im Rahmen des interdisziplinären ADPs soll die Interaktion von Mensch und Boden bei Sprungbewegungen untersucht werden. Um richtige und zuverlässige Ergebnisse zu gewährleisten, ist es notwendig, neben Sprungmodellen auch ein Bodenmodell zu entwickeln. Die Bodeneigenschaften variieren je nach Bodenmaterial (wie zum Beispiel Beton, Holz, Tartan usw.). Wie die Bodeneigenschaften dargestellt werden, spielt eine wichtige Rolle bei der Simulation.

Masse-Feder-Modell

Sowohl im Alltag als auch beim Experiment verformt sich der Boden beim Sprung. Jedoch ist die Verformung je nach Material unterschiedlich. Eine andere wichtige Eigenschaft ist, dass der Boden ein Teil der Kraft aufnehmen kann, die während der Sprungbewegung entsteht. Im Falle von speziell entwickelten Sportböden schützt diese Eigenschaft den Menschen vor Verletzungen. Diese beiden Eigenschaften von Boden müssen in der Simulation abgebildet werden. Eine denkbare Möglichkeit wäre, dass der Boden durch ein Feder-Dämpfer-System dargestellt wird. Abbildung 4.6 zeigt ein Bodenmodell repräsentiert durch ein Feder-Dämpfer-System. Bei jeder Feder gibt es einen zusätzlichen Dämpfer, welcher nicht im Bild dargestellt wird.

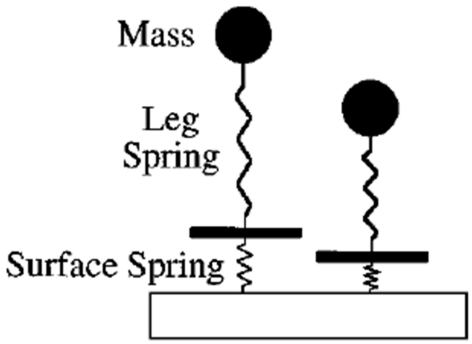


Abbildung 4.6: Bodenmodell durch Feder-Dämpfer-System (Haeufle et al., 2012)

Dieses Bodenmodell bildet den Boden bei der Simulation durch eine einfache Methode ab. Jedoch hat dieses Bodenmodell den Nachteil, dass die Federsteifigkeit und die Dämpfungkonstanten der untersuchten Böden bestimmt werden müssen. Bei nicht idealen Böden (Nichtlinearität der Eigenschaften, Vermischung von Effekten, Fehler durch die Auswertung der Messwerte) gestaltet sich die Extraktion solcher Werte als schwierig.

Darstellung als Spannung-Dehnung-Diagramm

Es ist auch möglich, die Bodeneigenschaft durch ein Spannung-Dehnung-Diagramm darzustellen.

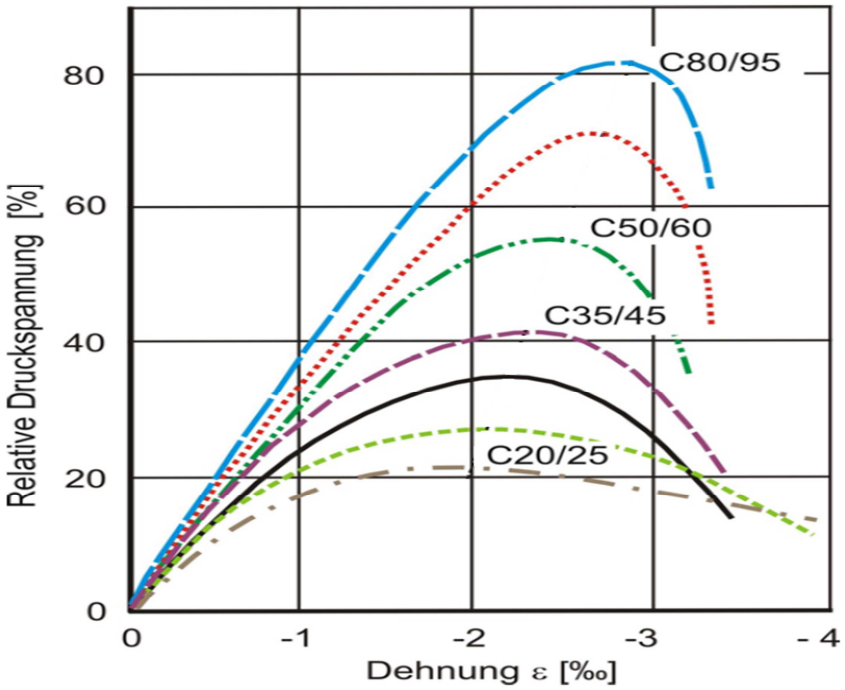


Abbildung 4.7: Spannung-Dehnung-Diagramm von verschiedenen Betonsorten (Thienel, 2006)

Abbildung 4.7 zeigt ein Spannung-Dehnung-Diagramm von Beton. Bei der Simulation kann die resultierende Verformung des Bodens mittels der wirkenden Kraft, aus dem Diagramm bestimmt werden. Diese Methode ist verlässlicher als das Masse-Feder-Modell, da mittels eines vorhandenen Spannungs-Dehnungs-Diagramms das wahre Verhalten des Materials bekannt ist. Der vorliegende Nachteil ist, dass das Absorbieren von Kraft durch vorliegende Spannung-Dehnung-Diagramme nicht dargestellt werden kann.

4.2. Simulationsbedingungen

Um die genauen Simulationsergebnisse zu erhalten, muss nicht nur die Größe der Steifigkeit jeder Feder und der Dämpfungskonstante, sondern auch die Bewegungsgleichung jedes Massenpunkts bestimmt werden. In diesem Abschnitt werden die Simulationsbedingungen der Sprungmodelle beschrieben.

4.2.1. Auswahl von Sprungmodellen

Nach Analyse der Aufgabenstellung wurden drei aussichtsreiche Modelle zur Simulation des Sprunges ausgewählt. Aufgrund ihrer verschiedenen Eigenschaften erfüllen diese drei Modelle die Aufgabe mehr oder weniger gut. Da während des Entwurfs der Modelle meist keine vorherige Beurteilung möglich ist, muss diese durch eine Qualifizierung im Abgleich mit experimentellen Daten durchgeführt werden. Dabei sind im Laufe der Entwicklung ungeeignete Konzepte auszusondern, um die Simulationsergebnisse der verbleibenden Modelle mit den experimentellen Messungen am Prüfstand zu vergleichen. Dieses Beurteilen und Entscheiden muss fundiert erfolgen, da die Genauigkeit der Simulationsergebnisse davon abhängt (Kloberdanz, 2013).

Da das Modell des Einmassenschwingers sehr einfach zu erstellen ist und ein großer Anteil vom des Sprungmodells mit Muskelmodell bereits vorhanden ist, soll zunächst die Beschreibung dieser zwei Modelle erfolgen.

Mit dem Einmassenschwinger ist es möglich, mittels eines einzigen Freiheitsgrades das zeitliche Bewegungsverhalten einer Masse (in diesem Fall der Körpermasse, konzentriert im Körperschwerpunkt) genau zu beschreiben. Wie die Abbildung 4.8 zeigt, ist die Masse m über eine lineare Feder mit der Steifigkeit c und einen geschwindigkeitsproportionalen Dämpfer mit der Dämpfungskonstante b mit dem Boden verbunden.

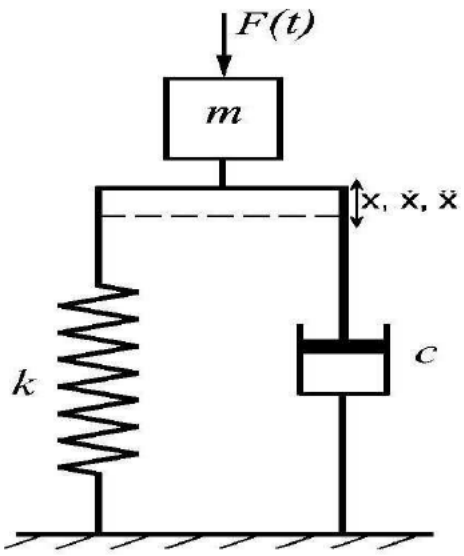


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung eines Einmassenschwingers (Tings, 2010)

Eine Erregung der Bewegung der Masse m erfolgt über eine veränderliche Kraft $F(t)$, die durch die zeitliche Änderung der Beinsteifigkeit des Marco Hopper entsteht. Die zeitliche Änderung der Beinsteifigkeit wird durch den Wert Δk im Versuchsaufbau beschrieben (siehe Versuchsdurchführung und Modellbeschreibung Marco Hopper). Die durch die äußere Anregung entstehende Bewegung der Masse wird durch die Koordinate $x(t)$ beschrieben (Risch, 2009). Ein Problem besteht darin, dass die Abbildung der

Sprungbewegung mittels eines Einmassenschwingers eine zu vereinfachte Annahme sein könnte. Das Sprungmodell eines Zweimassenschwingers beinhaltet die Körpermasse, die Beinmasse, die Beinfeder und die Fußfeder. Wird das Modell als ein Einmassenschwinger vereinfacht, d.h. die Masse m die Summe der Körpermasse und der Beinmasse und die Federsteifigkeit wird als die serielle Verbindung der Beinfeder und Fußfeder angenommen, sind relevante Fehler bei der Simulation zu erwarten. Darüber hinaus zeigt sich beim Vergleich mit den Simulationsergebnissen, dass die eine große Differenz zu den Messungen der Experimente aufweisen. Die Ergebnisse die mittels dieses Modells erhalten werden sind somit nicht verlässlich. Die Fortführung der Entwicklung der Modellierung durch einen Einmassenschwinger wird somit aufgegeben.

Das Muskelmodell bringt weniger Nachteile mit sich. Es ist aus vorherigen ADPs entstanden und kann die Entstehung einer biologischen Muskelkraft sehr exakt modellieren. Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass es die Sprungbewegung als ein Zweimassenschwinger abbildet und somit die Realität realistischer wiedergibt. Das Prinzip der Krafterzeugung unterscheidet sich allerdings relevant von der Steuerung des Versuchsgeräts. Die Steuerung des Marco Hopper sieht vor, dass innerhalb einer Sprung-Periode eine konstante Energie zugeführt wird, die zu einer periodischen Zunahme der Steifigkeit der Beinfeder führt. Mittels einer Formel kann die resultierende Sprungkraft berechnet werden. Im Gegensatz dazu erfolgt der Kraftaufbau im Muskelmodell durch eine periodisch auftretende zusätzliche Kraft F_{AE} (siehe Abbildung 4.9).

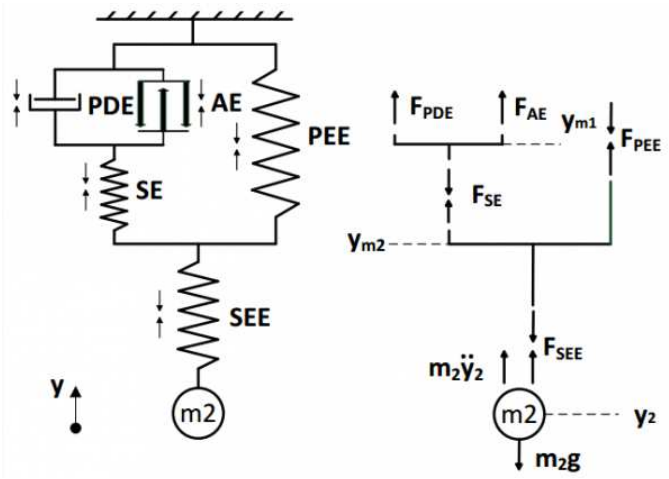


Abbildung 4.9: Hill-Modell mit Freischnitt Skizze (Zimmermann, 2012)

Für die Untersuchung des Sprungmodells mit beinhaltetem Muskelmodell wird eine Aktivierung des Muskels durch einen Puls (Simulink-Block: Puls Generator) dargestellt, der in seiner Weite, Frequenz und Pulshöhe (entspricht der Kraft $F_{AE,max}$) moduliert werden kann. Das Ausgangssignal des Puls Generators wird durch ein PT1 Tiefpass gefiltert (siehe Abbildung 4.10) (Zimmermann, 2012).

Durch die Unterschiede in der Krafterzeugung im Modell und in der Steuerung des Versuchsstandes sind relevante Unterschiede bei den Ergebnissen zu erwarten. Daher wird die Entwicklung dieses Modell nicht weiter verfolgt.

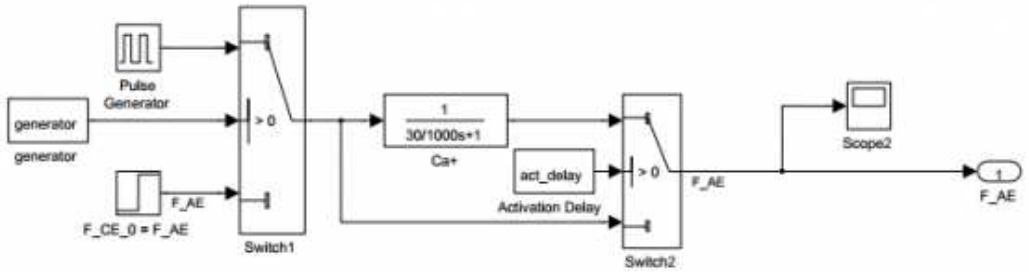


Abbildung 4.10: Aufbau der Aktivierung in Simulink (Zimmermann, 2012)

4.2.2. Entwicklung des Modell des Zweimassenschwinger-Modells

Um die Simulation eines validen Sprungmodells und den Vergleich mit den Experimenten, die mittels des Marco-Hopper durchgeführt wurden, fertigzustellen, wird das Modell eines Zweimassenschwingers entwickelt. Wie Abbildung 4.11 zeigt, besteht das Modell aus drei Punktmassen (m_1, m_2 und m_3). m_1 und m_2 stellen die Massen des Körpers und des Beins dar. m_3 ist die Massen des Fußes und sehr viel kleiner als die die Körper- und Beinmassen und wird aus diesem Grund vernachlässigt.

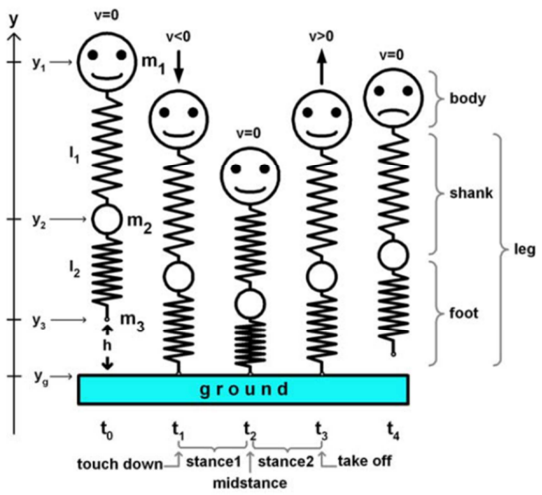


Abbildung 4.11: Schematische Darstellung des Zweimassenschwingers (Kalveram et al., 2010)

Zwischen m_1 und m_2, m_2 und Boden befinden sich die Bein- und Fußfeder mit einer Ausgangslänge von L_{10}, L_{20}. Die aktuelle Länge wird mit als L_1 und L_2 bezeichnet. Die Steifigkeiten sind gegeben

durch k_1 und k_2, Dämpfungskonstanten durch b_1 und b_2. y_1, y_2 und y_3 bezeichnen die aktuelle vertikale Position jeder Masse und y_g gibt die Position der oberen Fläche des Bodens an. Befindet sich der „Körper“ in der Flugphase, ist y_g gleich der Bodendicke und y_3 gleich der Summe aus Sprunghöhe h und y_g. Unter Midstance wird der Zeitpunkt verstanden, zu dem die Geschwindigkeit der Körpermasse (v_1) gleich null ist. Zum Zeitpunkt t_2 erreicht die Länge der Beinfeder L_1 ihr Minimum L_{1min}. Dieser Parameter ist von großer Bedeutung für die Berechnung der Zusatzkraft die durch die Änderung der Beinsteifigkeit (Δk) verursacht wird. Die Größe L_{1min} beschreibt zusätzlich den Zustand der Beinfeder, wenn sich das Modell im statischen Gleichgewicht befindet (Kraft der Beinfeder gleicht die Gewichtskraft aus). Zum Zeitpunkt t_2 wird in der Steuerung des Marco Hopper die Beinsteifigkeit des Modells durch Δk erhöht. Aus dieser Erhöhung resultiert eine Zusatzkraft, die Verluste während des Sprungs ausgleichen soll und mit einer konstanten Energiezuführung pro Sprung vergleichbar ist (Kalveram et al., 2010).

4.2.3. Bewegungsgleichung

Die Bewegungsgleichungen des Zweimassenschwingers stellen die Grundlage der Modellierung dar. Deshalb sollen diese zunächst aufgrund analytischer Überlegungen aufgestellt werden, um danach das entstandene Gleichungssystem in Matlab/Simulink abzubilden.

In Abbildung 4.12 sind die Zusammenhänge innerhalb des mathematischen Modells eines Zweimassenschwingers dargestellt.

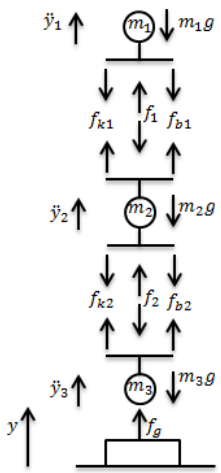


Abbildung 4.12: Schematische Darstellung jeder Kraftwirkung im Zweimassenmodell

$$l_1 = y_1 - y_2;\ \dot{l}_1 = \dot{y}_1 - \dot{y}_2$$

$$l_2 = y_2 - y_3;\ \dot{l_2} = \dot{y}_2 - \dot{y}_3$$

Solange eine Phase des Sprungs beschrieben wird während der Bodenkontakt angenommen wird, erfüllen die Bewegungsgleichungen diese Voraussetzungen.

$$m_1\ddot{y}_1 = f_1 - b_1\dot{l}_1 - k_1(l_1 - l_{10}) - m_1 g - c_1 sign(\dot{l}_1)$$

$$m_2\ddot{y}_2 = f_2 + b_1\dot{l}_1 + k_1(l_1 - l_{10}) - f_1 + c_1 sign(\dot{l}_1) - b_2\dot{l}_2 - k_2(l_2 - l_{20}) - c_2 sign(\dot{l}_2) - m_2 g$$

$$m_3\ddot{y}_3 = f_g + b_2\dot{l}_2 + k_2(l_2 - l_{20}) + c_2 sign(\dot{l}_2) - f_2 - m_3 g$$

Während der ganzen Simulation wird angenommen, dass die Reibung innerhalb des Bewegungsapparates sehr klein ist und somit in erster Näherung vernachlässigt werden kann. Damit werden c_1 und c_2 gleich Null gesetzt. f_1 und f_2 beschreiben Zusatzkräfte in Bein und Fuß, die nicht aus der Federwirkung der als konstant angenommen Beinfeder resultieren. Im Fall des Marco Hopper stellen diese also die Erregungskraft dar, die aus der periodischen Steifigkeitserhöhung durch Δk erfolgt. f_g ist die Bodenreaktionskraft. Wie bereits erwähnt, wird m_3 als sehr klein angenommen und somit vernachlässigt. Demzufolge kann die Bodenreaktionskraft f_g durch folgende Formel berechnet werden.

$$f_g = k_2(l_{20} - l_2) - b_2\dot{l_2} - c_2 sign(\dot{l_2}) + f_2$$

Die Bodenreaktionskraft ist gleich Null, wenn sich das Modell in der Flugphase befindet und größer Null sobald ein Bodenkontakt hergestellt wird.

Darüber hinaus wird y_3 unter folgenden Bedingungen beschränkt, wenn das Modell nicht die Bodenoberfläche verliert.

$$\ddot{y_3} = 0, \dot{y_3} = 0, y_3 = y_g$$

Die Steuerung des Marco Hopper ist dadurch charakterisiert, dass eine konstante Energiezufuhr (ΔW) pro Sprung erfolgt. Diese wird über eine virtuelle Steifigkeitserhöhung (Δk) ab Midstance in

das System eingebracht. Die auf die Masse m_1 wirkende Zusatzkraft f_1 erhält man durch die untere Formel.

$$f_1 = \Delta k * (l_{10} - l_1) = \frac{6\Delta W}{(l_{10} - l_{1min})^3}(l_1 - l_{1min}) * (l_{10} - l_1)$$

f_2 kann zu Null angenommen werden, da innerhalb des Fußes von außen keine Energie zugeführt wird.

Die Kraft f_1 ist immer positiv. Sie wird größer Null, wenn sich der Fußpunkt in Bodenkontakt befindet und das Vorzeichen der Geschwindigkeit der Körpermasse m_1 positiv wird, d.h. entsteht sie nur im Zeitraum, während dem das Modell vom Midstance in die Flugphase übergeht. In diesem Zeitraum muss die Steifigkeit der Beinfeder k_1 mit Δk addiert werden. Δk ergibt sich zu:

$$\Delta k = \frac{6\Delta W}{(l_{10} - l_{1min})^3}(l_1 - l_{1min})$$

Alle bisher beschriebenen Gleichungen und Parameterwerte sind die Voraussetzung für die Simulation des Zweimassenschwingers beim Bodenkontakt.

Sobald das Modell in die Flugphase übergeht, ändern sich die beschriebenen Bewegungsgleichungen. Während der Flugphase werden die Werte für die Federsteifigkeit und die Dämpfungskonstante des Beines, angepasst. Es wirken zusätzlich zur Steifigkeit und Dämpfung in der Standphase zwei zusätzliche Kräfte, die sich aus den Parametern k_{flight} und b_{flight} ergeben. Normalerweise kann eine Feder ausgedehnt werden. Da die simulierte Feder jedoch ein Ersatzmodell für das menschliche Bein beim Sprung darstellt muss eine Dehnung der Feder in der Flugphase verhindert werden. Es werden zwei Reaktionskräfte benutzt, um zu realisieren, dass die Feder theoretisch in originaler Länge bleibt. Beim Fliegen ist zudem die Kraft f_1 gleich Null. Deshalb werden die Bewegungsgleichungen von Massenpunkten m_1, m_2 und m_3 in diese Formen geändert.

$$m_1\ddot{y}_1 = -b_1\dot{l}_1 - k_1(l_1 - l_{10}) - m_1 g - k_{flight}(l_1 - l_{10}) - b_{flight}\dot{l}_1$$

$$m_2\ddot{y}_2 = b_1\dot{l}_1 + k_1(l_1 - l_{10}) - b_2\dot{l}_2 - k_2(l_2 - l_{20}) - m_2 g + k_{flight}(l_1 - l_{10}) + b_{flight}\dot{l}_1$$

$$m_3\ddot{y}_3 = b_2\dot{l}_2 + k_2(l_2 - l_{20}) - m_3 g$$

Bei der Simulation möchten wir zunächst bestätigen, dass das Modell in der Flug- und Bodenkontaktphase korrekt arbeitet. Danach werden automatisch im Matlab die entsprechenden Gleichungen verwendet und die richtigen Kurven der y_1, y_2 und f_g erhalten.

4.2.4. Simulation eines Bodenmodells

Im Rahmen des interdisziplinären ADPs soll die Interaktion von Mensch und Boden bei Sprungbewegungen untersucht werden. Deshalb wird in das Sprungmodell ein Bodenmodell eingefügt. Um zuverlässige Ergebnisse zu erhalten, ist es wichtig, die Eigenschaften jedes Bodenmaterials zu analysieren und die richtigen Simulationsmethoden zu bestimmen.

Um den Zusammenhang zwischen der Sprungbewegung und verschiedene Bodeneigenschaften zu analysieren, wurden insgesamt fünf Bodenmaterialien ausgewählt, Beton, Tartan, Schaumstoff, das Material Adipren (spezielles dämpfendes Material für Sportschuhe) und ein Stück aus einem Sportschuh. Diese sollen Materialien repräsentieren, die im Alltag bei Sprung- und Laufbewegungen mit dem Fuß des Menschen interagieren.

Um die Bodeneigenschaft des Betons zu simulieren, entscheiden wir uns, ein Spannungs- Dehnungs-Diagramm zu benutzen. Boden kann großer Druckspannung und nur sehr niedriger Zugspannung ausgesetzt werden. Während der Simulation beträgt die größte Kraft weniger als 300 N und überschreitet somit nicht die Streckgrenze. Je größer der Betrag des Elastizitätsmoduls, desto mehr Widerstand kann ein Material einer elastischen Verformung entgegensetzen. Angesichts des großen Elastizitätsmodul E wird eine sehr kleine Dehnung durch die Druckspannung erzeugt. Folglich wird nur der linear- elastische Bereich des Dehnungs- Spannung- Diagramms verwendet (siehe Abbildung 4.13).

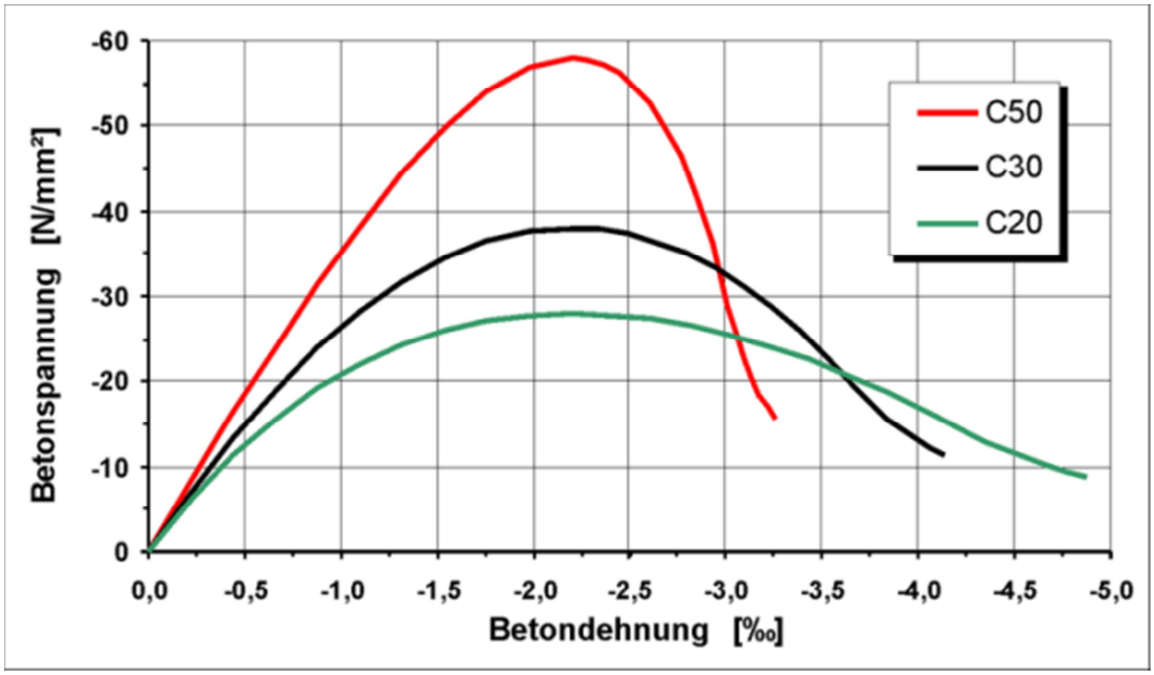


Abbildung 4.13: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von unterschiedlichen Arten des Betons (Stöfix, 2005)

Im Gegensatz zum Beton gehören Tartan und Schaumstoff zu elastischen Materialien mit eher kleinen Elastizitätskoeffizienten. Deshalb sind die Eigenschaften nicht allein durch ein Elastizitätsmodul zu beschreiben. Durch die Überlegung und angesichts der Messungsdaten sind wir der Meinung, ist es besser, mit der Steifigkeit die Bodeneigenschaft zu modellieren. Unter Erhöhung der Kraft wird diese dann über der verursachten Längenänderung ΔL grafisch dargestellt. Diese Kurve bezeichnet man als Kraft-Verlängerungs-Diagramm (siehe Abbildung 4.14).

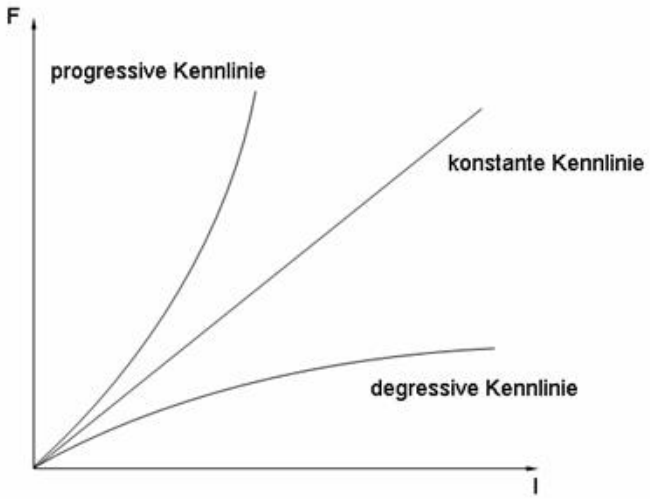


Abbildung 4.14: Theoretischer und realer Verlauf der Linie von Tartan und Schaumstoff (Greim, 2006)

Im Falle von linear elastischem Verhalten besitzt das Diagramm einen linearen Verlauf. Das Verhalten von Schaumstoff oder Tartan weist jedoch eher nicht-linear-elastisches Verhalten auf, die Deformation hängt nichtlinear von der Spannung ab. Zwar ist eine angenäherte Steifigkeit durch die Auswertung experimenteller Daten ermittelbar. Die Dämpfungskonstante, die eine Maßzahl für die materialabhängige Energiedissipation ist, ist sehr schwierig durch eine Auswertung der experimentellen Messwerte zu erhalten. Auch kann in Frage gestellt werden, dass das dissipative Verhalten der Materialien durch eine Konstante beschreibbar ist. Zu erwarten sind auch an dieser Stelle nichtlineare Effekte, die eine einfache Abbildung erschweren. Deshalb möchten wir den bereits ermittelten Materialparameter des Kraftabbaus für die Simulation verwenden. Durch den Stoß der Masse des springenden Systems auf den Boden werden eine kleine Verformung und eine große Kraft erzeugt. Es soll angenommen werden, dass nur ein Teil der Energie des Stoßes in eine reversible Verformung des Bodens überführt wird Der durch den Kraftabbau beschriebene Anteil des Stoßes wird irreversibel dissipiert. Der restliche Anteil der Aufprallenergie wird vom Boden wieder abgegeben und geht zum Teil in die Energie des springenden Körpers ein, der Körper wird vom Boden beschleunigt. Die Dämpfungseigenschaften des Bodens und der prozentuale Parameter des Kraftabbaus beschreiben dieselbe Eigenschaft des Bodens, einen Anteil der Sprungenergie durch dissipative Vorgänge abzubauen.

4.3. Vorstellung der Matlab-Systeme und Validierung der Modelle

In Anlehnung an den Prüfstand Marco Hopper wird ein auf einem Zweimassenschwinger-Modell basierendes Sprungmodell in Matlab/Simulink entwickelt. Um abzuschätzen, ob sich das System korrekt verhält, wird nach der Modellbildung eine Validierung durchgeführt.

4.3.1. Vorstellung und Erläuterung der Modelle ansteigender Komplexität

Wie vorher erwähnt sind das Einmassenschwinger-Modell und das Sprungmodell mit Muskelmodell nicht für die Simulation geeignet. Aus diesem Grund hat unser Team ein Zweimassenschwinger-Modell entwickelt. Die genaue Konstruktion wird in Abbildung 4.11 dargestellt.

Nach der Festlegung des zu verwendenden Sprungmodells sollen die Bewegungsgleichungen von jedem Teil des Sprungmodells aufgestellt werden, da diese den Schwerpunkt der Modellierung darstellen. Deshalb sollen zunächst theoretisch die Bewegungsgleichungen jeder Punktmasse (Körper und Fuß) im Modell bestimmt werden und diese danach durch entsprechende Simulink-Blöcke in Matlab abzubilden. Das ganze System wird in diesem Kapital erläutertet.

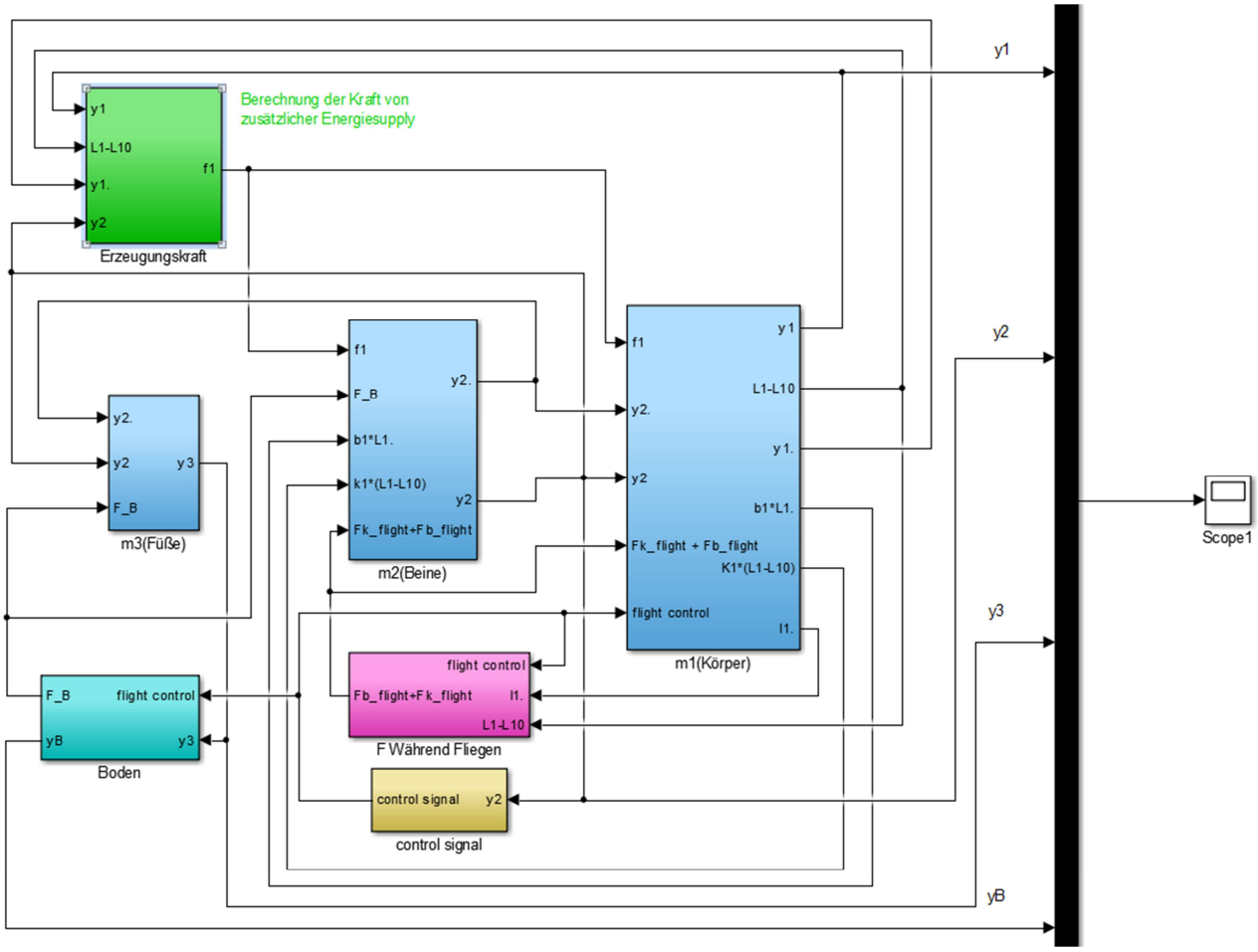


Abbildung 4.15: Die Darstellung des Sprungsmodells in Matlab/Simulink

Das ganze System besteht aus, wie in Abbildung 4.15 dargestellt, insgesamt sieben Subsystemen.

Die Subsysteme m_1, m_2 und m_3 repräsentieren jeweils den Körper, die Beine und die Füße. Solche Subsysteme werden durch die beschreibenden Bewegungsgleichungen mit Hilfe der entsprechenden Simulink-Blöcke abgebildet. Die drei Subsysteme haben die Aufgabe, die auf die Massen wirkenden Kräfte zu berechnen und liefern Informationen über die Geschwindigkeit, Position und Beschleunigung der einzelnen Punktmassen.

Man sollte bei der Simulation darauf achten, dass die modellierte Sprungbewegung in zwei Phasen aufgeteilt wird. In der ersten Phase (Bodenkontakt) bleibt der Punkt m_3, also die Füße, noch auf dem Boden. Wie in Abbildung 4.11 dargestellt teilt sich diese Phase noch in die Teilphasen in stance_1 und stance_2, die am Punkt midstance (KSP hat seinen tiefsten Punkt erreicht) getrennt werden. Während der zweiten Phase hat das komplette System keinen bodenkontakt. Da in den verschiedenen Phasen unterschiedliche Kräfte auf das System wirken, ist es notwendig, Fallunterschei-

dungen für Zustände bestimmter Größen in beiden Phasen vorzunehmen. Diese Aufgabe übernimmt das Subsystem „control signal“.

Der Aufbau dieses Subsystems wird in Abbildung 4.16 dargestellt. In welcher Phase sich das System befindet ist von der Position der Masse m_2 abhängig. Die Ruhelänge der „virtuellen“ Feder zwischen Beinen und Füße beträgt L_{20}. Wenn der Abstand von der Masse m_2, der gleich y_2 ist, größer als L_{20} + Bodendicke ist, verliert der Fuß den Bodenkontakt und das Output-Signal gibt den Wert: 0 aus. Wenn der Abstand der Masse m_2 vom Boden kleiner als L_{20} + Bodendicke ist, hat der Fuß Bodenkontakt, sodass das Output-Signal von diesem Subsystem den Wert: 1 ausgibt. Das Output-Signal des Subsystems „control signal“ wird wieder als Input-Signal für andere Subsysteme verwendet.

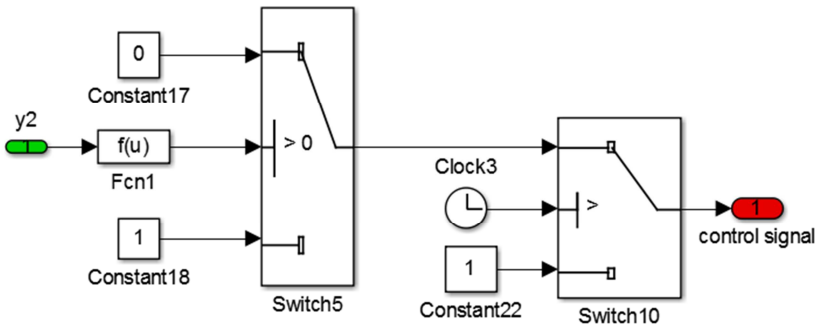


Abbildung 4.16: Der Aufbau des Subsystems „control signal“

Befindet sich das Modell in der Flugphase, sind die Bewegungsgleichungen unterschiedlich. Die hier in der Simulation dargestellte Feder ist als ein Ersatzmodell für den menschlichen Muskelapparat während des Sprungs gedacht. Während eines Sprunges kann das Bein nur komprimiert und nicht ausgedehnt werden. Deshalb werden zwei Reaktionskräfte, nämlich zwei zusätzliche Kräfte die mittels k_{flight} und b_{flight} gebildet werden benutzt, um zu realisieren, dass die Feder während der Flugphase theoretisch in originaler Länge bleibt und nicht überschwingt. Die Berechnung dieser beiden zusätzlichen Kräfte wird durch das Subsystem „F während Fliegen“ realisiert.

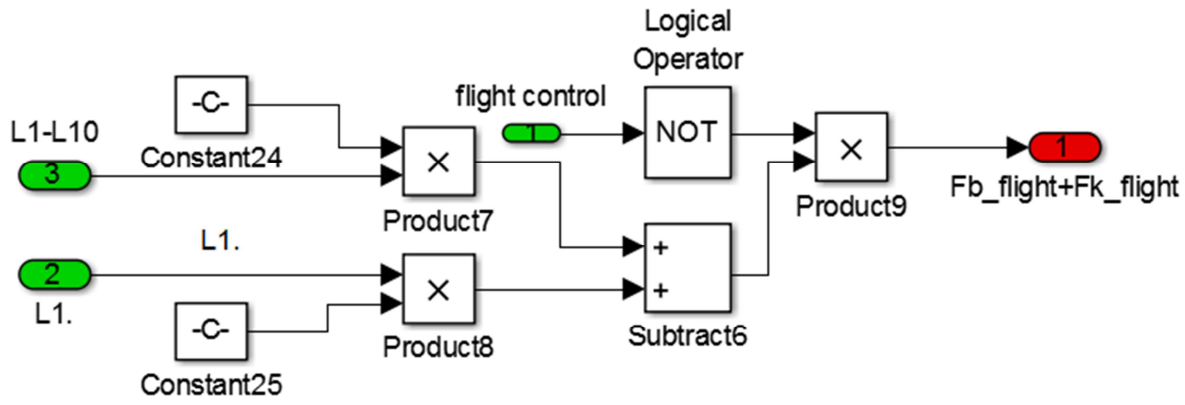


Abbildung 4.17: Der Aufbau des Subsystems „F während Fliegen“

Die Interaktionskräfte zwischen Boden und Fuß werden durch das Subsystem „Boden“ berechnet. Bei der Simulation werden die Bodeneigenschaften von unterschiedlichen Bodenmaterialen verwendet. Um die Bodeneigenschaft mit dem Material Beton zu simuliere wurde ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm verwendet.

Werden die Bodeneigenschaften von Tartan und Isomatte modelliert, dann sieht der Kraftaufbau anders aus, da deren Eigenschaften nicht allein durch ein Elastizitätsmodul beschrieben werden können. Deshalb sollen, wie in Kapitel 4.2.4 erwähnt, die vorher ermittelten Materialparameter vom Kraftabbau für die Simulation verwendet werden. Dies wird durch einen GAIN-Block „Kraftabbau“ in Simulink realisiert.

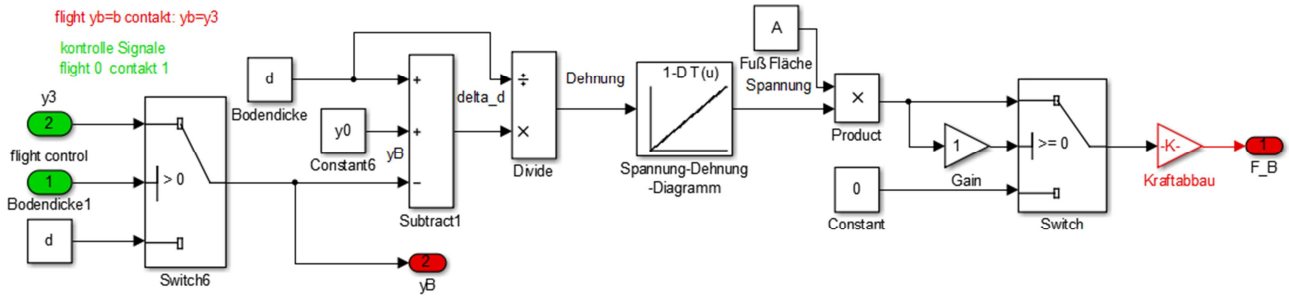


Abbildung 4.18: Der Aufbau des Subsystems „Boden“

Wenn man springen will, müssen Muskelkräfte von Beinen und Füßen zur Verfügung gestellt werden. Diese Kräfte werden in der Simulation durch die Kräfte f_1 und f_2 abgebildet. Die auf die Masse m_1 wirkende Zusatzkraft f_1 erhält man durch die untere Formel.

$$f_1 = \Delta k * (l_{10} - l_1) = \frac{6\Delta W}{(l_{10} - l_{1min})^3}(l_1 - l_{1min}) * (l_{10} - l_1)$$

f_2 kann als Null angenommen werden, da innerhalb des Fußes von außen keine Energie zugeführt wird.

Die Aufgabe der Berechnung und Kontrolle der beiden Kräfte übernimmt das Subsystem „Erzeugungskraft“. Die genaue Vorgehensweise wird in Kapitel Vorstellung und Erläuterung der Modelle ansteigender Komplexität4.3.1 dargestellt. Wie vorher in Kapitel 4.2.2 und 4.2.3 erwähnt wirken die Kräfte f_1 und f_2 nur während eines Abschnitts des Bodenkontaktes ($stance_2$, siehe Abbildung 4.11). Dieses Subsystem kontrolliert dadurch den Zeitpunkt, in dem die Erzeugungskraft wirkt:

a) Die Geschwindigkeit der Masse m_1 muss positiv sein, d.h. der Körper bewegt sich nach oben.
b) Die Länge der Beinfeder L_1 muss kleiner als die der Ruhelänge L_{10} sein, d.h. der Körper bleibt noch auf den Boden, fliegt noch nicht.
c) Mit Hilfe des Subsystem „control Signal“, um zu gewährleisten, dass das System auf den Boden bleibt.

Wenn alle Bedingungen erfüllt werden, wirkt die Kraft f_1.

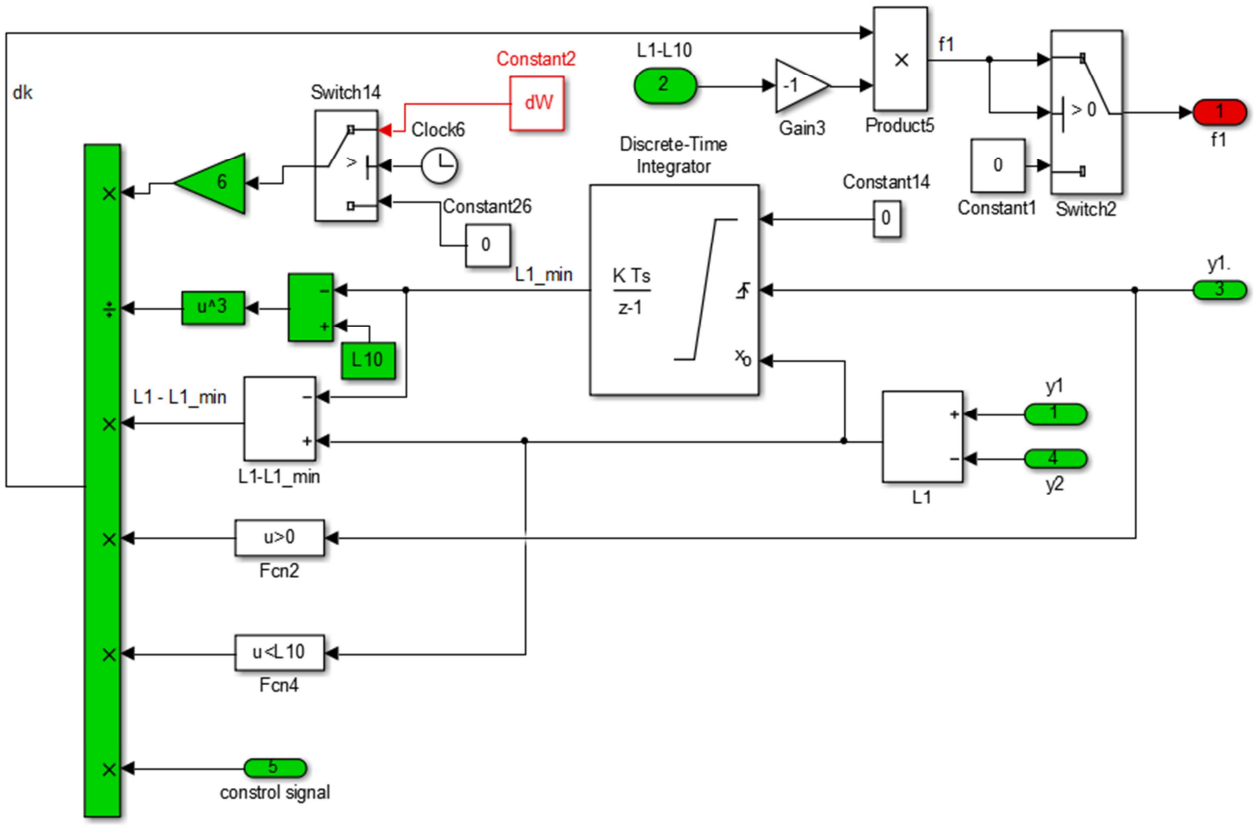


Abbildung 4.19: Der Aufbau des Subsystems „Erzeugungskraft“

4.3.2. Validierung

Zur Validierung des Systems wird die Auslenkung an den Koordinaten y_1 und y_2 in Ruhelage mit den berechneten Werten verglichen. Da das E-Modul von Beton sehr groß (E=20 GPa) ist, verändert sich die Bodenverformung in sehr geringem Bereich. Demzufolge wird die Bodenverformung bei der Validierung des Sprungsystems auf Betonboden vernachlässigt, also der Boden wird als verformt angenommen. Die berechneten statischen Ruhelagen lauten:

$$y_1 = -\frac{m_1 g}{k_1} - \frac{m_2 g}{k_2} + y_0 + d + L_{20} + L_{10} = 0{,}1198\, m,$$

$$y_2 = -\frac{(m_1+m_2)g}{k_2} + y_0 + d + L_{20} = 0{,}05379\, m,$$

$$mit\ Körpermasse\ m_1 = 1{,}424\, kg,$$

$$Beinmasse\ m_2 = 0{,}426\, kg,$$

$$Beinfeder\ k_1 = 400\, N/m,$$

$Beinfeder\ L_{10} = 0{,}1\ m,$

$Fußfeder\ k_2 = 15000\ N/m,$

$Fußfeder\ L_{20} = 0{,}035\ m,$

$Bodendicke\ d = 0{,}02\ m,$

$y_0 = 0.$

Die Ausgangssignale der Simulation an den Koordinaten y_1 und y_2 werden in Abbildung 4.20 dargestellt. Aus diesem Diagramm ist zu erkennen, dass die berechneten Werte mit den Ausgangssignalen der Simulation übereinstimmen. Die geringen Abweichungen sind auf numerische Fehler und die nicht vollständig abgeklungene Schwingung zurückzuführen.

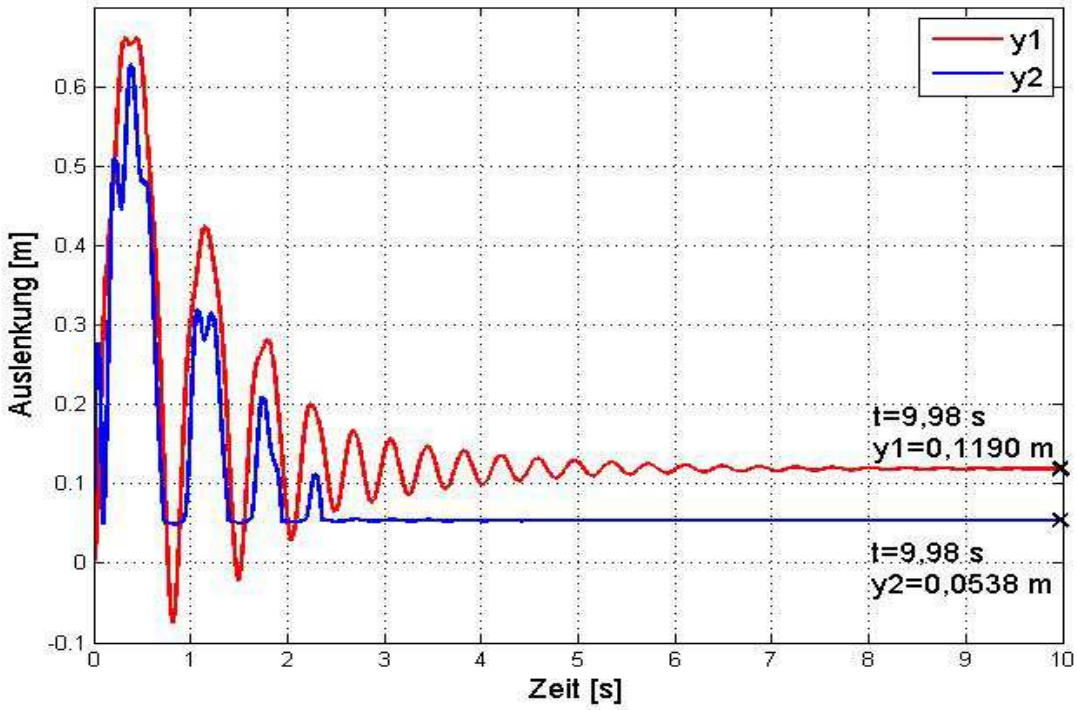


Abbildung 4.20 Statische Auslenkung auf Betonboden

Um das Sprungverhalten zu plausibilisieren, wird das dynamische Sprungverhalten nach der Einführung der Sprungenergie betrachtet. Die Sprungenergie wird in Form einer zusätzlicher Federsteifigkeit Δk_1, die anschließend die Muskelkraft erzeugt, durch die Beinfeder k_1 im System eingeführt. In Abbildung 4.21 und Abbildung 4.22 ist der Verlauf der Muskelkraft und des dynamischen Sprungverhaltens dargestellt.

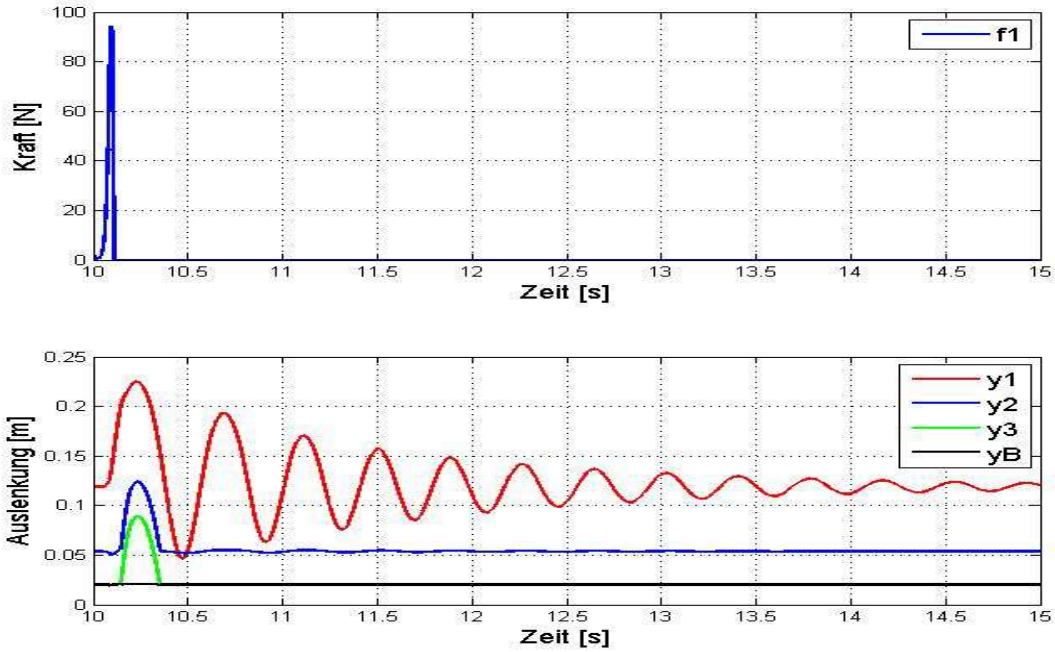


Abbildung 4.21 Dynamisches Sprungverhalten

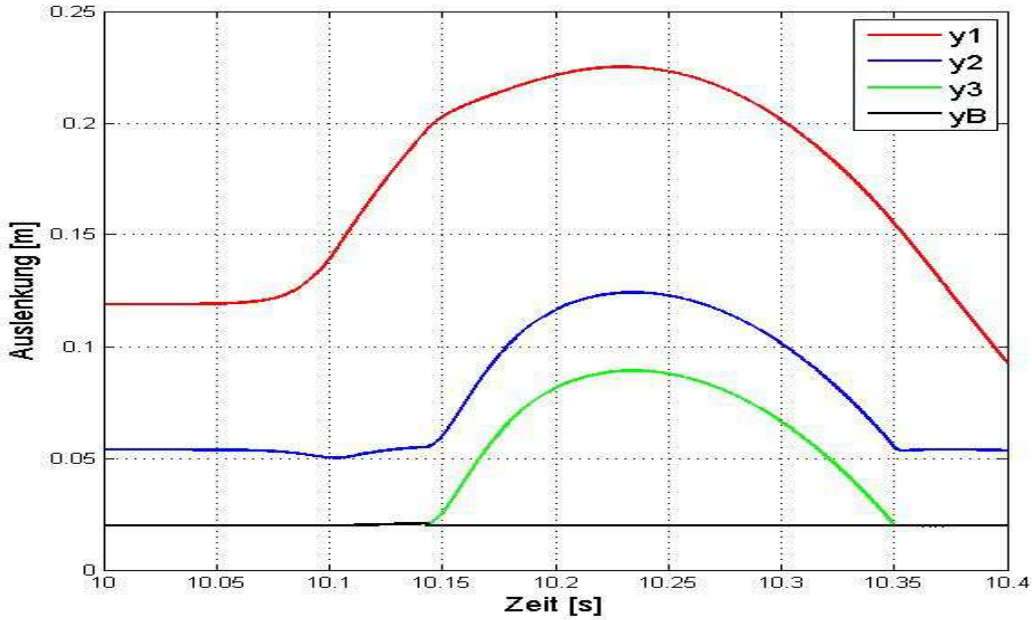


Abbildung 4.22 Sprungverhalten von Kontaktphase zu Flugphase

Nachdem die zusätzliche Federrate Δk_1 der Beinfeder zugefügt worden ist, nimmt die Koordinate y_1 aus der Ruhelage wegen der zusätzlich eingeführten Muskelkraft sofort zu. In Vergleich dazu wird y_2 zunächst leicht abgesenkt. Die Federlänge L_1 erhöht sich, bis die originale Federlänge L_{10} erreicht wird. Danach fällt die Muskelkraft aus und m_2 wird durch m_1 nach oben gezogen. Wenn die

Fußfeder L_2 gleich der Ruhelänge L_{20}, also y_2 auf 0,055 m $(d + L_{20})$ gestiegen ist, wechselt das System von der Kontaktphase in die Flugphase. Das System springt nach oben. Die Differenz zwischen y_1 und y_2 wird durch das in der Flugphase funktionierende Feder-Dämpfer-System auf L_{10} abgesenkt. Wenn y_2 kleiner als 0,055 m ist, geht das System wieder in die Kontaktphase. Da der Beindämpfer b_1 viel geringer als der Fußdämpfer b_2 ist, schwingt y_1 viel langsamer aus. Bei der Kontaktphase verhält sich y_3 gleich wie y_B. Bei der Flugphase springt y_3 nach oben, während y_B auf null bleibt.

Die Materialeigenschaften von Tartan und Schaumstoff wurde nicht gefunden. Bei der Modellierung des Tartan- und Schamstoffbodens werden die durch das Experiment bestimmten Bodensteifigkeiten und Kraftabbaukoeffizienten verwendet. Während die Steifigkeit die Verformungsfähigkeit des Bodens - also das Verhältnis zwischen Bodenreaktionskraft und Bodenverformung - darstellt, repräsentiert der Kraftabbaukoeffizient die durch Boden dissipierte Energie. Die Steifigkeit wird im Bodenmodell in Form von einem Kraft-Verformungs-Diagramm präsentiert. Die Bodenreaktionskraft die durch die Verformung des Bodens bestimmt wird, wird zunächst mit dem Kraftabbaukoeffizient multipliziert und dann in das Sprungmodell eingeführt.

Bei der Validierung des Sprungmodells auf Tartan- und Schaumstoffboden muss die Verformung des Bodens berücksichtigt werden. Die berechneten statischen Ruhelagen auf Tartanboden lauten:

$$y_B = -\frac{(m_1+m_2)g}{k_{Tartan}} + y_0 + d = 0{,}01925\, m,$$

$$y_2 = -\frac{(m_1+m_2)g}{k_2} + y_0 + y_B + L_{20} = 0{,}05304\, m,$$

$$y_1 = -\frac{m_1 g}{k_1} - \frac{m_2 g}{k_2} + y_0 + y_B + L_{20} + L_{10} = 0{,}1191\, m,$$

$$mit\ Bodensteifigkeit\ k_{Tartan} = 24169\ N/m.$$

Die statische Auslenkung auf Tartanboden ist in Abbildung 4.23 dargestellt. Aus dieser Abbildung ist zu sehen, dass die berechneten Ruhelagen höher als die Simulationsergebnisse sind. Der Grund besteht darin, dass sich die im Sprungsystem eingeführte Bodenkraft aus der Multiplizierung der Bodenreaktionskraft und des Kraftabbaukoeffizienten ergibt. Beim Gleichgewicht kommt die Schwerkraft $(m_1 + m_2)g$ der Multiplizierung der Bodenreaktionskraft und der Kraftabbaukoeffizienten gleich. Demzufolge ist die Bodenreaktionskraft höher als die des Systems ohne Kraftabbaukoeffizient, was die große Bodenverformung zur Folge hat. Wenn man den Kraftabbaukoeffizient einbezieht, sind die berechneten Ruhelagen fast gleich wie die Simulationsausgangssignale.

$$y_B = -\frac{(m_1 + m_2)g/K_{Kraftabbau}}{k_{Tartan}} + y_0 + d = 0{,}01886\,m$$

$$mit\ Kraftabbaukoeffizient\ K_{Kraftabbau} = 0{,}661.$$

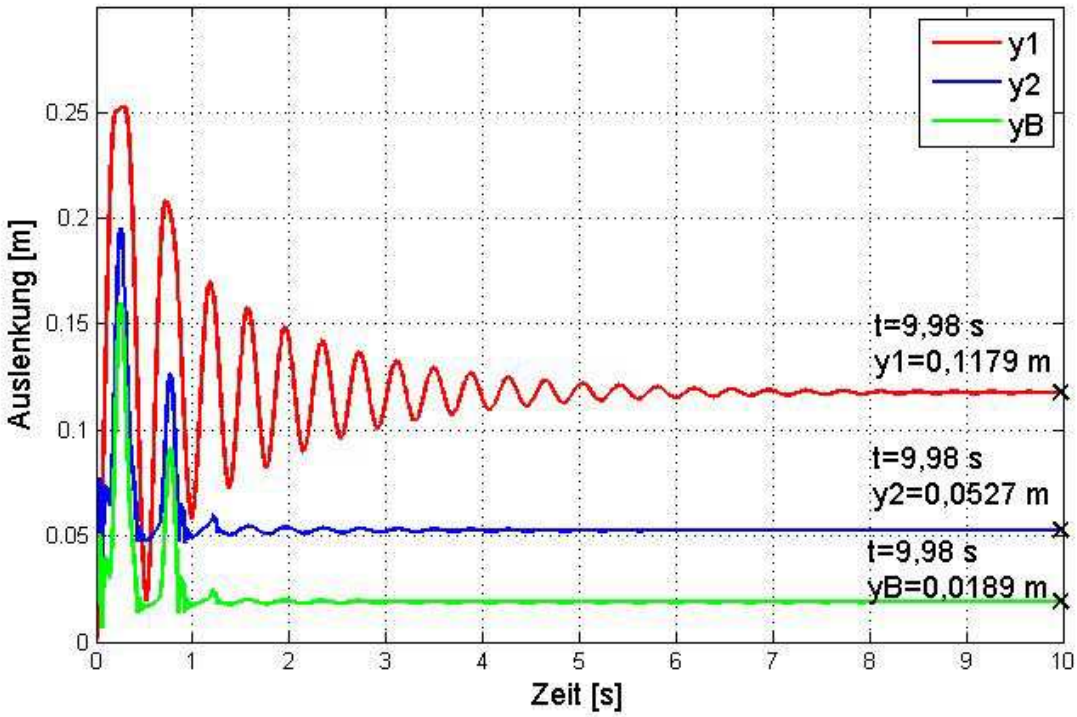


Abbildung 4.23 Statische Auslenkung auf Tartanboden

Die berechneten statischen Ruhelagen auf Schaumstoffboden lauten:

$$y_B = -\frac{(m_1+m_2)g}{k_{Schaumstoff}} + y_0 + d = 0{,}01906\,m,$$

$$y_2 = -\frac{(m_1+m_2)g}{k_2} + y_0 + y_B + L_{20} = 0{,}05285\,m,$$

$$y_1 = -\frac{m_1 g}{k_1} - \frac{m_2 g}{k_2} + y_0 + y_B + L_{20} + L_{10} = 0{,}1189\,m,$$

$$mit\ Bodensteifigkeit\ k_{Schaumstoff} = 19230\,N/m.$$

Die statische Auslenkung der Simulation ist in Abbildung 4.24 dargestellt. Wie im Fall auf Tartanboden sind die berechneten statischen Ruhelagen auf Schaumstoffboden wegen des Kraftabbaukoeffizienten höher als die Ausgangssignale der Simulation. Unter Berücksichtigung der Kraftabbaukoeffizienten stimmt die berechnete statische Bodenauslenkung mit dem Ausgangssignal der Simulation überein.

Aus den Ergebnissen der Validierung lässt sich erkennen, dass das Bodenmodell in Form des Kraftabbaukoeffizienten vom wahren Bodenverhalten abweicht, weil die statischen Ruhelagen der Simulation unter Berücksichtigung des Kraftabbaukoeffizienten niedriger als die berechneten Werte sind. Theoretisch sollen die statischen Ruhelagen des Bodendämpferanteils, der als Kraftabbaukoeffizient im Bodenmodell repräsentiert wird, nicht abhängen. Da das dynamische Sprungverhalten vorzugsweise in der Simulation betrachtet wird und die statischen Abweichungen relativ klein sind, wird das Bodenmodell in Form von Steifigkeit und Kraftabbaukoeffizient trotz der Fehler in statischen Auslenkungen angewendet.

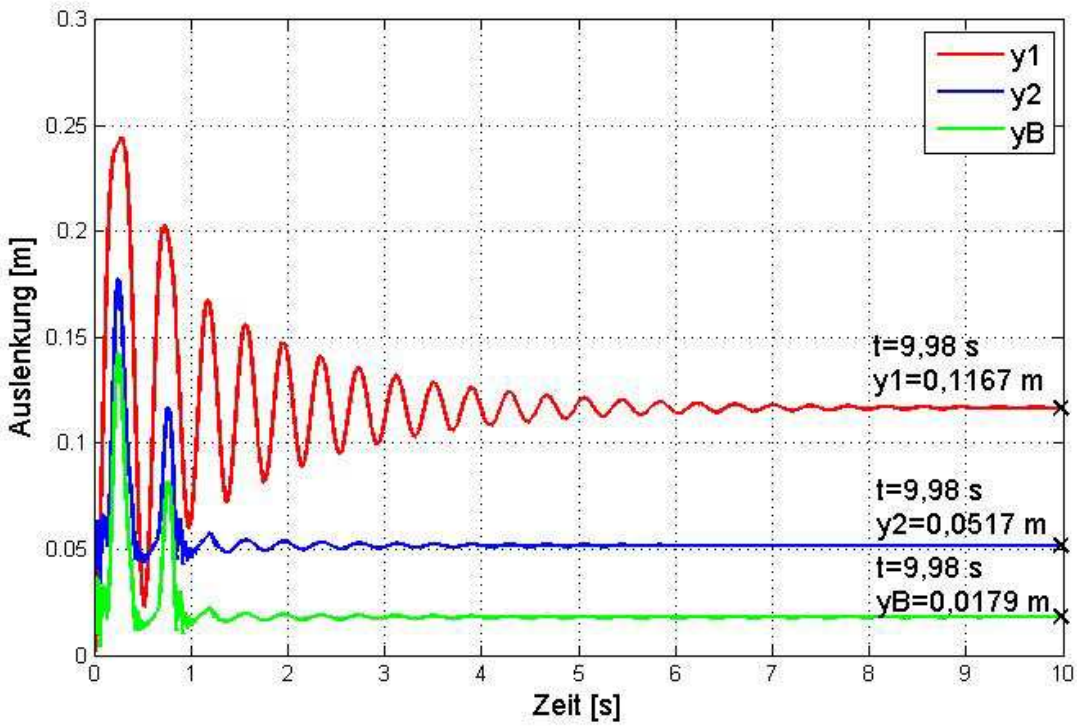


Abbildung 4.24 Statische Auslenkung auf Schaumstoffboden

4.4. Simulationsergebnisse

Nachdem die Bewegungsgleichungen und die Größe aller Parameter bestimmt worden sind, wird das Modell in Matlab/Simulink gebildet. Durch mehrfache Versuche konnten zuverlässige Simulati-

onsergebnisse erzielt werden, die hauptsächlich die Bewegung der Köpermasse y_1 und der Fußmasse y_2 und die Bodenreaktionskraft unter den unterschiedlichen Bedingungen der Bodenmaterialien umfassen. Folgend werden die Ergebnisse sorgfältig dargestellt und erläutert.

4.4.1. Simulationsergebnisse eines Sprunges

Um das Sprungverhalten besser zu untersuchen, wurde zunächst ein einzelner Sprung betrachtet. Die Simulationsversuche wurden jeweils auf Beton-, Tartan- und Schaumstoffboden durchgeführt. Die Abbildung 4.25 zeigt die Ergebnisse auf Betonboden.

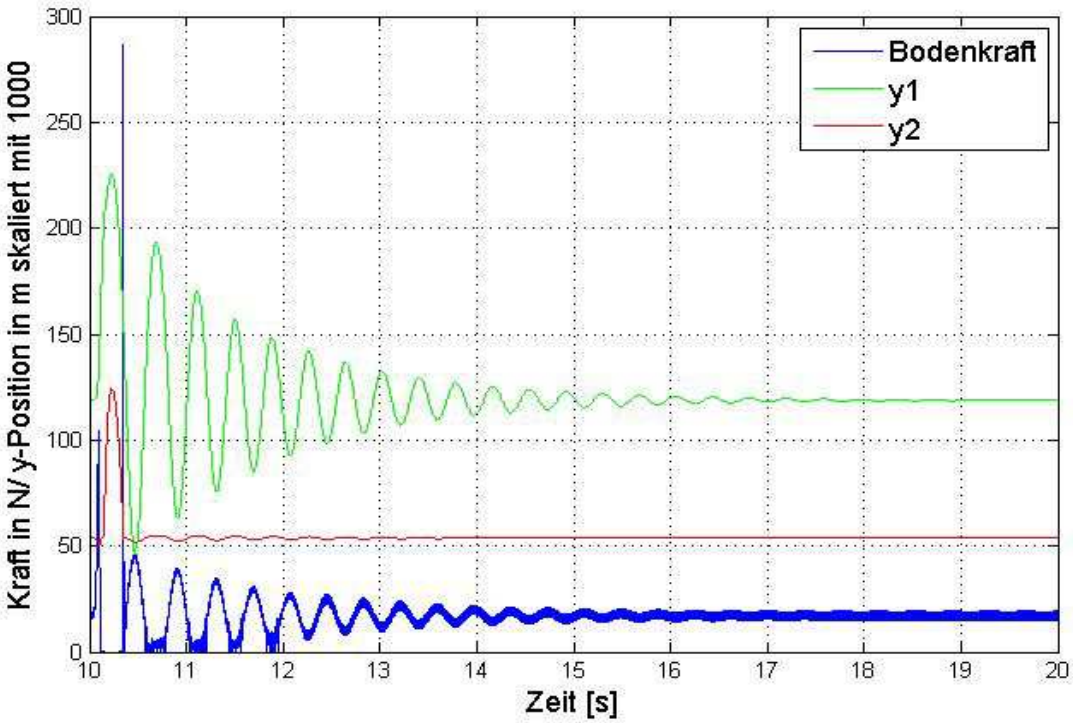


Abbildung 4.25: Einmaliges Sprungverhalten auf Betonboden

Für zehn Sekunden bleibt das System im Gleichgewicht. Die Muskelkraft wird nach zehn Sekunden eingebracht. Aus diesem Diagramm kann man erkennen, dass sich die Bodenreaktionskraft nach der Einführung der Muskelkraft sprungartig erhöht. Dementsprechend springt das Modell hoch und bewegt y_1 und y_2 nach oben. Während der Flugphase ist die Bodenreaktionskraft gleich null. Danach wird beim Landen eine große Bodenreaktionskraft infolge des Stoßes ausgelöst. Nach diesem Zeitpunkt schwingt das System auf dem Boden, bis die Ruhelage wieder erreicht wird.

Das Sprungverhalten eines Sprunges auf Tartan- und Schaumstoffboden wird in Abbildung 4.26 und Abbildung 4.27 dargestellt.

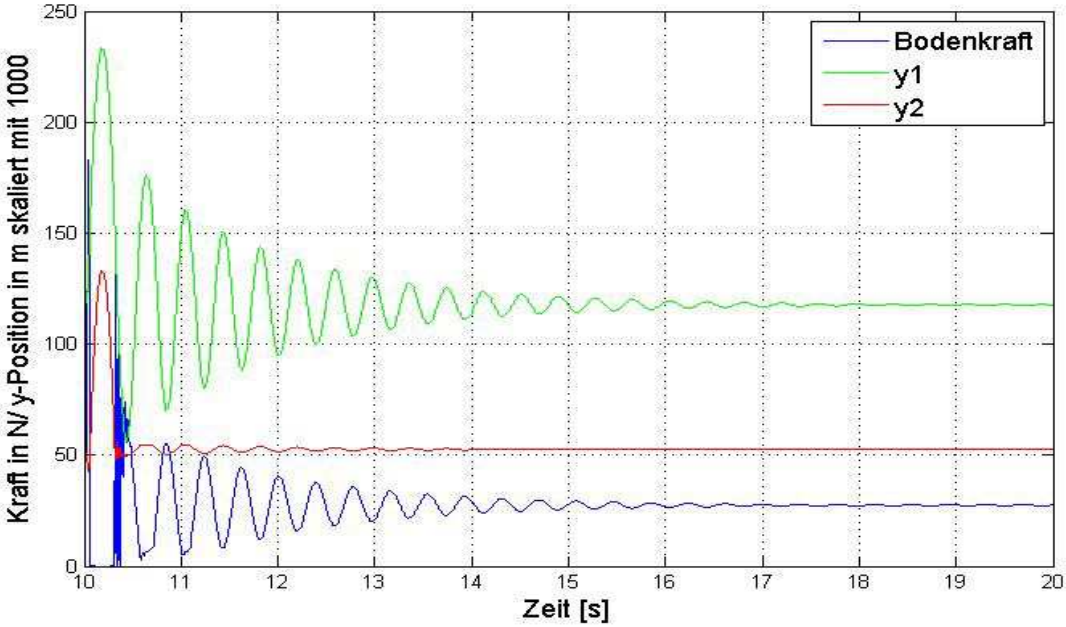


Abbildung 4.26: Einmaliges Sprungverhalten auf Tartanboden

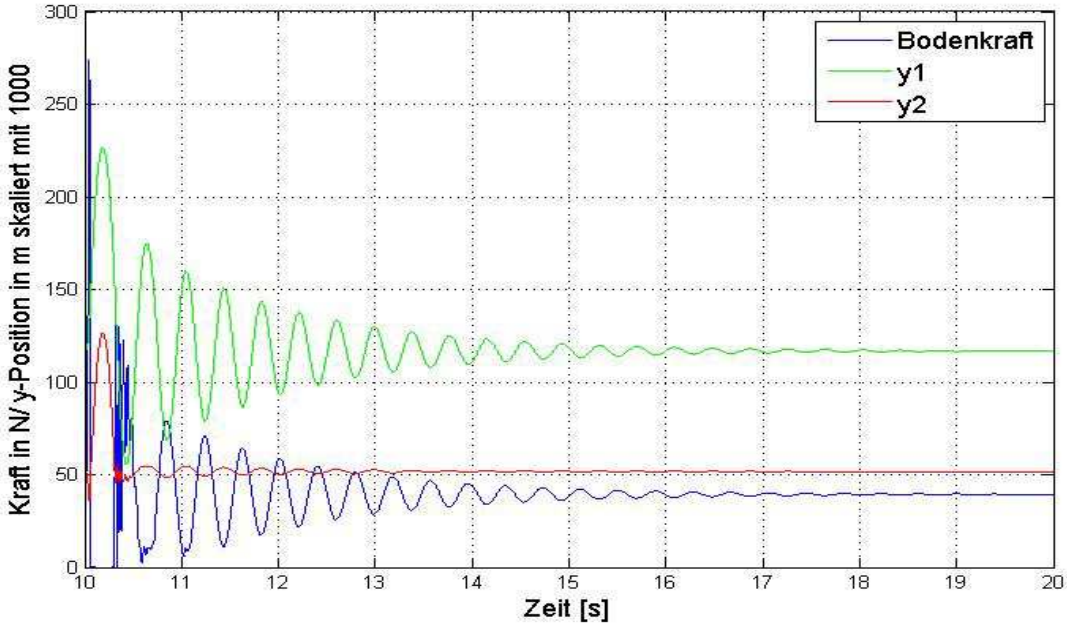


Abbildung 4.27: Einmaliges Sprungverhalten auf Schaumstoffboden

Aus diesen Diagrammen kann man auch feststellen, dass die Verläufe des Sprungverhaltens auf Tartan- und Schaumstoffboden eine ähnliche Tendenz im Vergleich zu Betonboden zeigen. Auf allen Böden springt das Modell beim ersten Sprung aus der Ruhelage hoch. Weil die statischen Ruhelagen auf allen Böden ungefähr gleich sind, erreicht das Modell beim ersten Sprung mit gleicher Sprungenergie auf allen Böden eine fast gleiche Sprunghöhe. Im Vergleich dazu kann man Unter-

schiede zwischen den drei Bodenkraftverläufen beobachten. Einerseits ist die Stoßkraft beim Landen auf Tartan- und Schaumstoffboden viel niedriger als auf Betonboden. Der Grund besteht darin, dass die Verformungsfähigkeit von Tartan und Schaumstoff besser als die von Beton ist, was die Stoßkraft durch die Verformung des Bodens reduzieren kann. Andererseits ist die Bodenreaktionskraft beim Sprung und in Ruhelage auf Schaumstoff am größten. Dies ist auf den Kraftabbaukoeffizienten zurückzuführen. Die Kraft, die im System eingeführt wird, ergibt sich aus der Multiplizierung der Bodenreaktionskraft und der Kraftabbaukoeffizienten. Da beim Sprung und in Ruhelage die Kraft im System auf allen Böden gleich ist, sind die Bodenreaktionskraft und der Kraftabbaukoeffizient zueinander umgekehrt proportional. Deswegen ist die Bodenreaktionskraft auf Schaumstoff am größten, dann folgt die auf Tartan- und zuletzt Betonboden.

4.4.2. Simulationsergebnisse einer Sprungsequenz

In diesem Abschnitt wird das kontinuierliche Sprungverhalten betrachtet. Nach der Einführung der Muskelkraft springt das System aus der Ruhelage hoch. Wenn die Länge der Fußfeder kürzer als die originale Federlänge ist, geht das System in die Kontaktphase. Das Bodenmodell wird eingeschaltet und das System schwingt auf dem Boden ein. Der nächste Sprung wird durch die Geschwindigkeit der Körpermasse hervorgerufen. Wenn sie wieder von Null nach oben steigt, wird die Muskelkraft in das System eingeführt, was zum nächsten Sprung führt.

In Abbildung 4.28 ist das kontinuierliche Sprungverhalten auf Betonboden dargestellt. Es fällt auf, dass die Koordinate y_1 und y_2 am Sprunganfang ansteigt und nach dem 5. Sprung ungefähr konstant bleibt. Dementsprechend steigt zu Beginn die Bodenreaktionskraft während des Landens an und bleibt später fast konstant. Eine mögliche Erklärung für den steigenden Verlauf wäre die Zunahme der im System hinterlassenen Energie. Da die Reibung bei der Modellierung vernachlässigt wird, wird die Energie im System völlig durch den Dämpfer vernichtet. Allerdings schwingt y_1 auf Grund der niedrigen Dämpfung nach dem ersten Sprung langsam aus. Wenn die zweite Sprungenergie in das System eingeführt wird, schwingt y_1 noch nicht aus und es bleibt Energie aus dem ersten Sprung übrig. Infolgedessen ist die gesamte Energie beim zweiten Sprung höher als beim ersten Sprung, was die höhere Sprunghöhe im zweiten Sprung zur Folge hat. Schließlich ist ein ungefähr konstanter Sprungverlauf zu beobachten, da die dissipierte Energie durch den Dämpfer und die im vorigen Sprung hinterlassene Energie sich ausgleichen. Die Koordinate y_1 fällt beim Landen ganz nach unten. Der Grund konnte darin liegen, dass die Beinsteifigkeit k_1 für die eingeführte Energie von 2.2 [J] zu klein ist. Trotzdem wird bei der Simulation so viel Energie eingesetzt, um später mit den durchgeführten Experimenten vergleichen zu können.

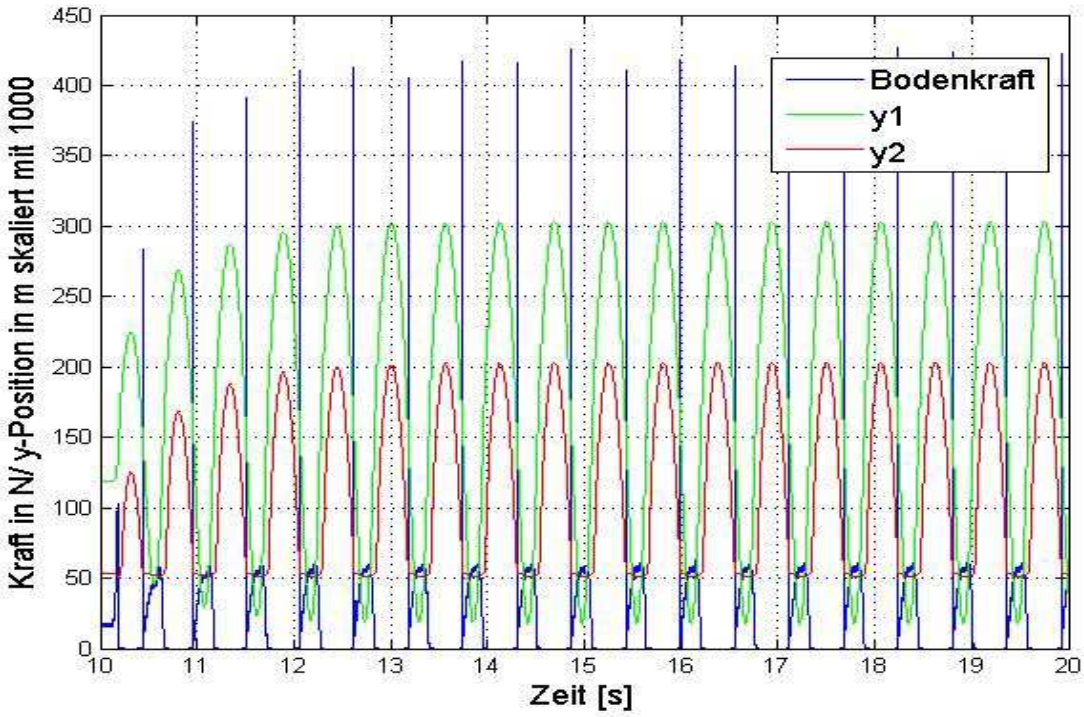


Abbildung 4.28 Kontinuierliches Sprungverhalten auf Betonboden

Auf Grund der fehlenden Informationen über die Bodeneigenschaften wird die gemittelte Bodensteifigkeit und der Kraftabbaukoeffizient aus den durchgeführten Experimenten zur Modellierung des Tartan- und Schaumstoffbodens benutzt. Die Bodenreaktionskraft, die im Sprungvorgang eingeführt wird, ergibt sich aus der Multiplikation der Bodenreaktionskraft und des Kraftabbaukoeffizienten. Das kontinuierliche Sprungverhalten auf Tartanboden ist in Abbildung 4.29 dargestellt. Aus diesem Bild ist zu erkennen, dass die Sprunghöhe auf Tartanboden verglichen mit der auf Betonboden deutlich abnimmt, was die höheren Energiedissipationen aufweist. Aufgrund der niedrigen Sprunghöhe erreicht das Sprungmodell auf Tartanboden schnell den konstanten Bereich. Die Bodenreaktionskraft auf Tartanboden ist viel niedriger als auf Betonboden. Einerseits springt das System auf Tartanboden niedriger, was eine niedrigere Kraft auf den Boden ausübt. Andererseits ist Tartan viel weicher als Beton, was die Bodenreaktionskraft während der Landung durch die Verformung des Bodens reduziert.

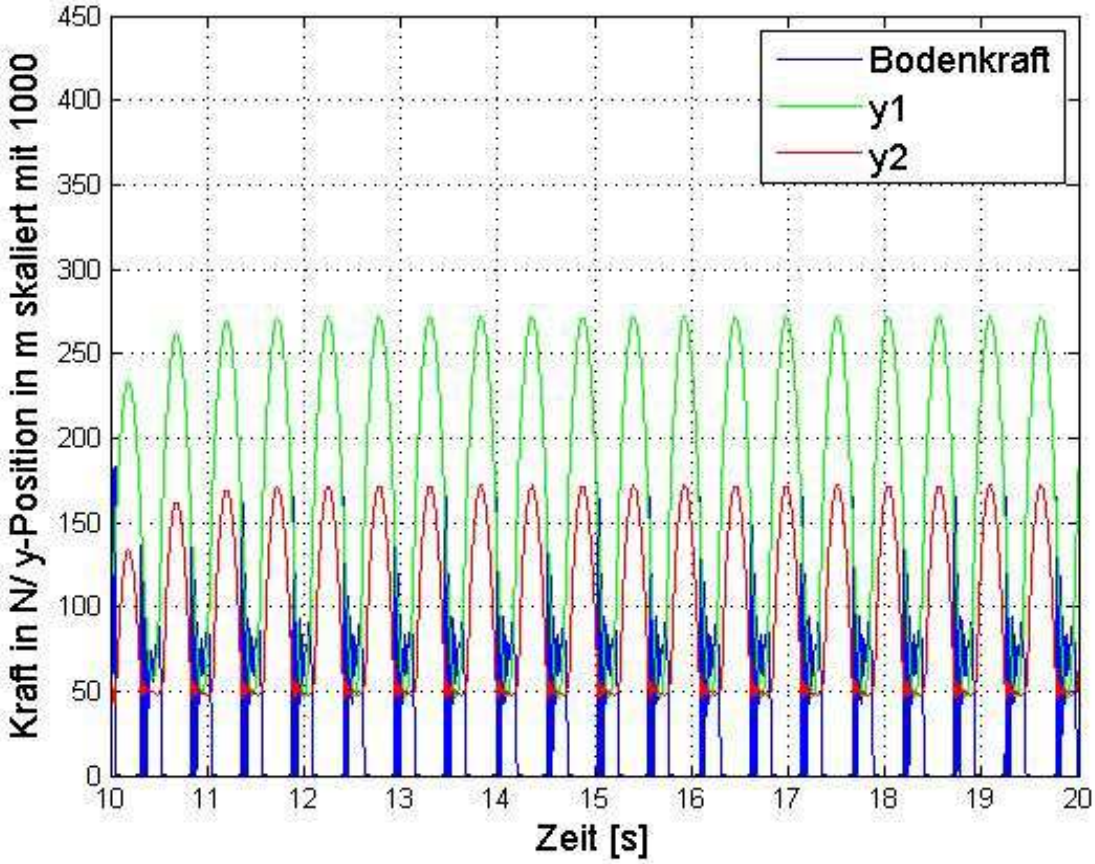


Abbildung 4.29 Kontinuierliches Sprungverhalten auf Tartanboden

In Abbildung 4.30 wird der Verlauf der Koordinate y_1 und der Bodenreaktionskraft jeweils auf Tartan- und Schaumstoffboden dargestellt. Bei der Modellierung wird die Steifigkeit von Tartan und Schaumstoff jeweils auf 24169 N/m und 19230 N/m und der Kraftabbaukoeffizient jeweils auf 0,661 und 0,461 eingestellt. Obwohl Schaumstoff weicher als Tartan ist, lässt sich eine kleine Zunahme der Sprunghöhe und demgegenüber eine große Zunahme der Bodenreaktionskraft beobachten. Der Grund dafür konnte darin bestehen, dass die Sprunghöhe im Vergleich mit dem Einfluss der Kraftabbaukoeffizienten auf die Bodenreaktionskraft wenig durch die Bodensteifigkeit beeinflusst wird. Die Abnahme der Steifigkeit von Tartan zu Schaumstoff ruft nur eine sehr kleine Abnahme der Sprunghöhe hervor. Demzufolge sind die im System eingeführten Kräfte, die sich aus der Multiplikation der Bodenreaktionskraft und des Kraftabbaukoeffizienten ergeben, bei Tartan und Schaumstoff ungefähr gleich. Allerdings ist die Bodenreaktionskraft auf Schaumstoffboden wegen der Abnahme der Kraftabbaukoeffizienten stark angestiegen, was die kleine Zunahme der Sprunghöhe ermöglicht.

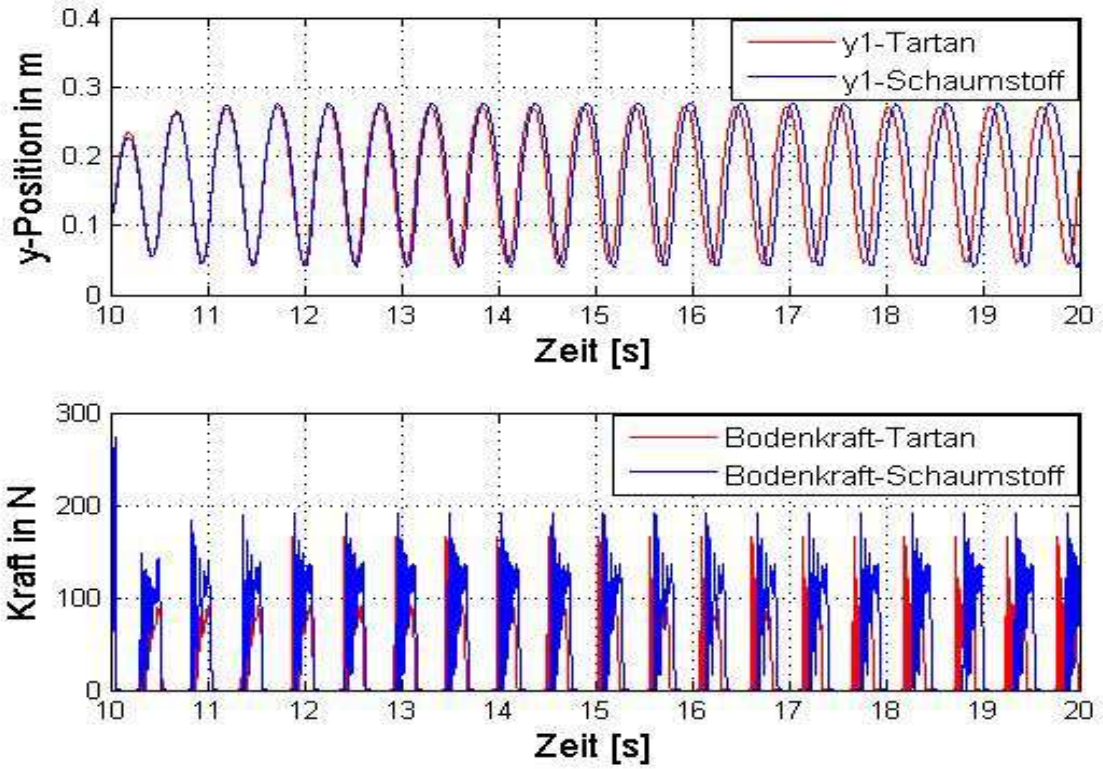


Abbildung 4.30 Vergleich zwischen dem Sprungverhalten von Tartan und Schaumstoff

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Sprunghöhe und die Bodenreaktionskraft auf Betonboden, auf Grund der Verformung wegen des großen E-Moduls nicht berücksichtigt werden kann, viel größer als auf Tartan- und Schaumstoffboden ist. Verglichen mit den Ergebnissen auf Tartanboden nimmt die Sprunghöhe und Bodenreaktionskraft auf Schaumstoffboden bei gleichzeitiger Abnahme der Bodensteifigkeit und des Kraftabbaukoeffizienten zu. Die genauen Einflüsse der Bodensteifigkeit und der Kraftabbaukoeffizienten auf das Sprungverhalten müssen weiter untersucht werden.

5. Vergleich Simulation - Experiment

Nach der Fertigstellung der Auswertungen der Experimente und der Modelle zur Simulation von Sprungbewegungen unter dem Einfluss verschiedener Bodenmaterialien sollen die Ergebnisse aus beiden Ansätzen zusammengeführt und verglichen werden. Es wird die Zuverlässigkeit von Ergebnissen aus den Simulationen geprüft um die Modelle zu validieren.

5.1. Paarvergleich qualitatives Verhalten Simulation und Experiment

Zunächst sollen allgemeine Vergleiche zwischen Ergebnissen aus den Versuchen und der Simulation gezogen werden.

In Abbildung 5.1 und Abbildung 5.3 sind die Sprungverläufe mit der resultierenden Bodenreaktionskraft dargestellt. Bei beiden soll der Boden ein ähnliches Materialverhalten vorweisen. Im Experiment wurde der Ersatzbeton aus Papier verwendet, in der Simulation ein linear-elastisches Material hoher Steifigkeit ohne Dämpfungseigenschaften. Es ist zu beobachten, dass die simulierten Verläufe des Sprunges und auch der Bodenreaktionskraft den im Experiment beobachteten ähneln. Die erreichten Sprunghöhen weichen jedoch erheblich voneinander ab. In der Simulation wird eine bis zu 0.07 m höhere Sprunghöhe erreicht. Die Abstände zwischen Fußpunkt und Körperschwerpunkt sind jedoch sowohl in der Simulation als auch im Experiment gleich. Eine weitere Abweichung ist bei der Größenordnung der Impact-Kraft zu verzeichnen. Diese liegt ca. 100 N über den im Experiment gemessenen Werten. Jedoch ist diese Zunahme schlüssig und einfach zu erklären, da die Impactkraft erwartungsgemäß mit der Sprunghöhe und damit mit der Zunahme potentieller Energie am oberen Totpunkt anwächst. Ein weiterer Parameter der an dieser Stelle einen Einfluss hat, ist die Vernachlässigung der Dämpfung in der Simulation. Der real auftretende Kraftabbau des Materials (in diesem Fall ca. 6%) senkt die maximal auftretende Bodenreaktionskraft im Versuch.

Ein Phänomen das während der Simulation auftritt, ist das Ansteigen der Sprunghöhe während der ersten Sprünge. Dieses Verhalten ist damit zu erklären, dass das System aus der „Ruhelage“ der Beinfeder startet. Mit „Ruhelage“ ist der Zustand gemeint während dem im System ein Gleichgewicht aus Gewichtskraft und der Gegenkraft aus der Beinfeder herrscht. Die anfängliche Auslenkung ist dementsprechend kleiner als die der „Feder“ im Experiment. Diese ist durch das anfängliche Aufliegen des „Körpers“ auf dem „Fuß“ vor Sprungbeginn maximal vorgespannt. Ab dem zweiten Sprung wird die maximale Auslenkung der Beinfeder kleiner und damit auch die resultierende Sprunghöhe. In der Simulation ist das Verhalten gegenläufig. Die Auslenkung der Beinfeder nimmt im Verlauf der ersten Sprünge zu und damit auch die resultierende Sprunghöhe. Ein weiterer Grund für die großen Abweichungen in der Sprunghöhe ist der Umstand, dass in der Simulation Verluste

im mechanischen System vernachlässigt wurden. Diese führen bei der realen Versuchsdurchführung zu Abnahmen in der Sprunghöhe.

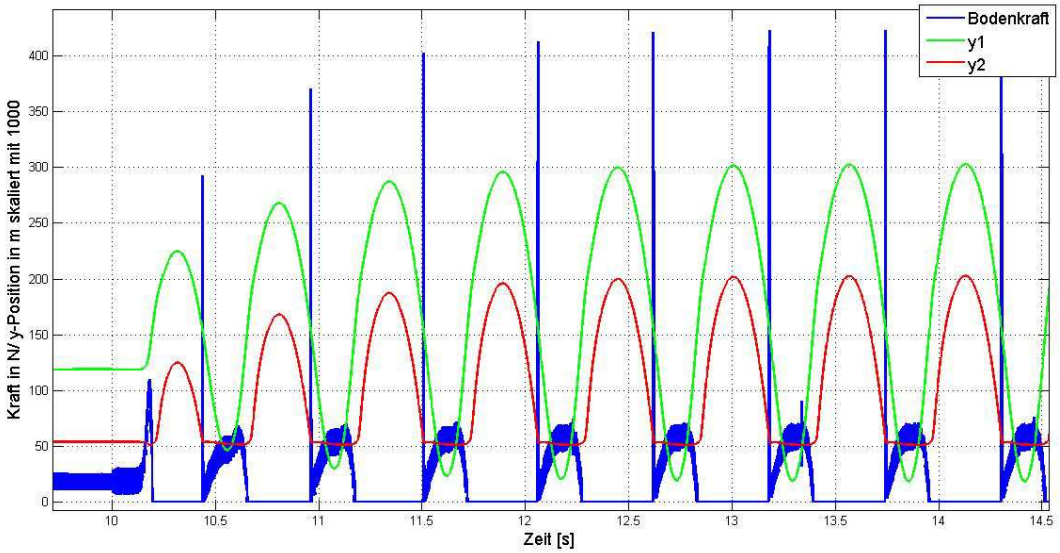


Abbildung 5.1: Verlauf der simulierten Bodenreaktionskraft in N, der Körperschwerpunktbewegung und der Fußpunktbewegung (in m skaliert mit 1000) mit Bodenmodell mit "Beton" Eigenschaften

Der Verlauf der simulierten Bodenreaktionskraft ähnelt dem realen Verlauf sehr. Es sind dieselben Phasen beim Abdrücken des Körpers zu erkennen.

Der Fuß kommt mit einer hohen Geschwindigkeit auf dem Boden auf, was in einer großen Kraft resultiert (siehe Abbildung 5.2 und Abbildung 5.4, [1]). Anschließend nähert sich der Körperschwerpunkt dem Fußpunkt an, was im Modell mit einem Zusammendrücken der „Beinfeder“ gleichzusetzen ist. Die gemessene Bodenreaktionskraft nimmt bis zum unteren Totpunkt der Bewegung der Körpermasse zu (siehe Abbildung 5.2 und Abbildung 5.4, [2]). An dieser Stelle beginnt sich der Körper wieder nach oben zu bewegen, was mit einer Abnahme der Bodenreaktionskraft einhergeht, da sich ja die „Beinfeder“ wieder entspannt. Sowohl im Modell als auch in der Steuerung des Marco Hopper wird jedoch an dieser Stelle Energie in das System eingebracht. Wie bereits erwähnt geschieht dies durch die Erhöhung der Beinsteifigkeit ($k + \Delta k$). Aus diesem Umstand resultiert ein zweiter Hochpunkt im Kraftverlauf der Bodenreaktionskraft (siehe Abbildung 5.2 und Abbildung 5.4, [3]). Nach diesem Punkt nimmt die Kraft bis zum Abheben des Fußes vom Boden stetig ab und wird schlussendlich zu null (siehe Abbildung 5.2 und Abbildung 5.4, [4]). Sowohl im Experiment als auch den Ergebnissen der Simulation sind diese Phasen gut zu erkennen.

Eine weitere Abweichung ist bei der Frequenz der Sprünge zu beobachten. Im Experiment springt der Roboter ungefähr viermal so schnell wie das Modell.

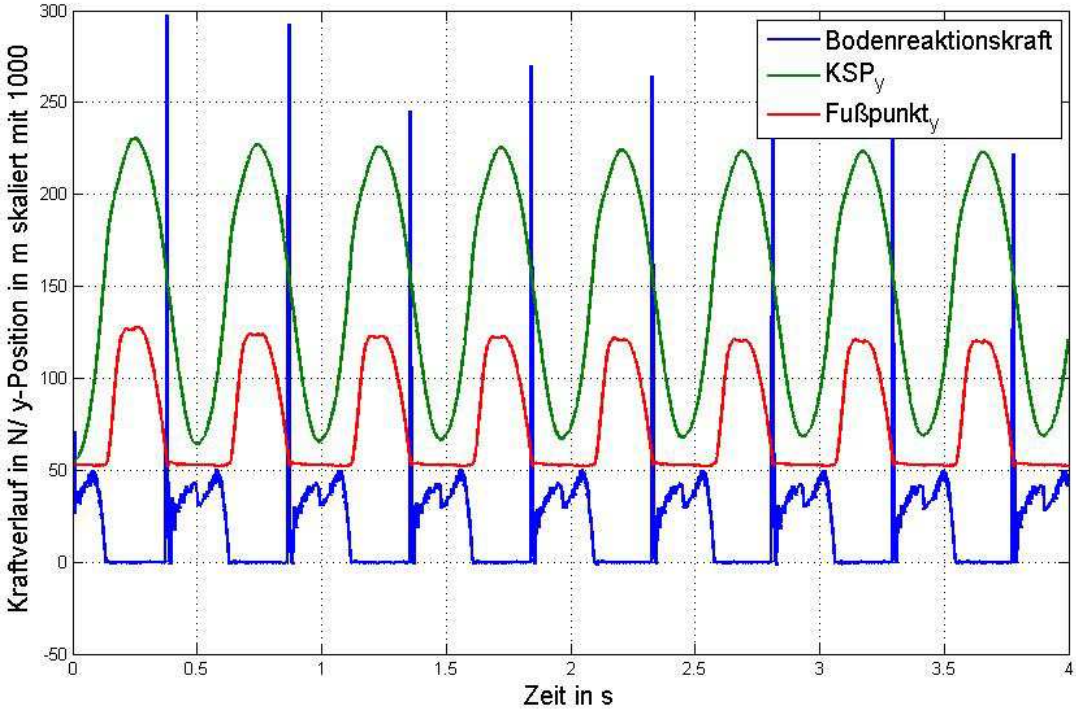


Abbildung 5.3: Verlauf der experimentell ermittelten Bodenreaktionskraft in N, der Körperschwerpunktbewegung und der Fußpunktbewegung (in m skaliert mit 1000) mit Bodenmodell mit "Beton" Eigenschaften

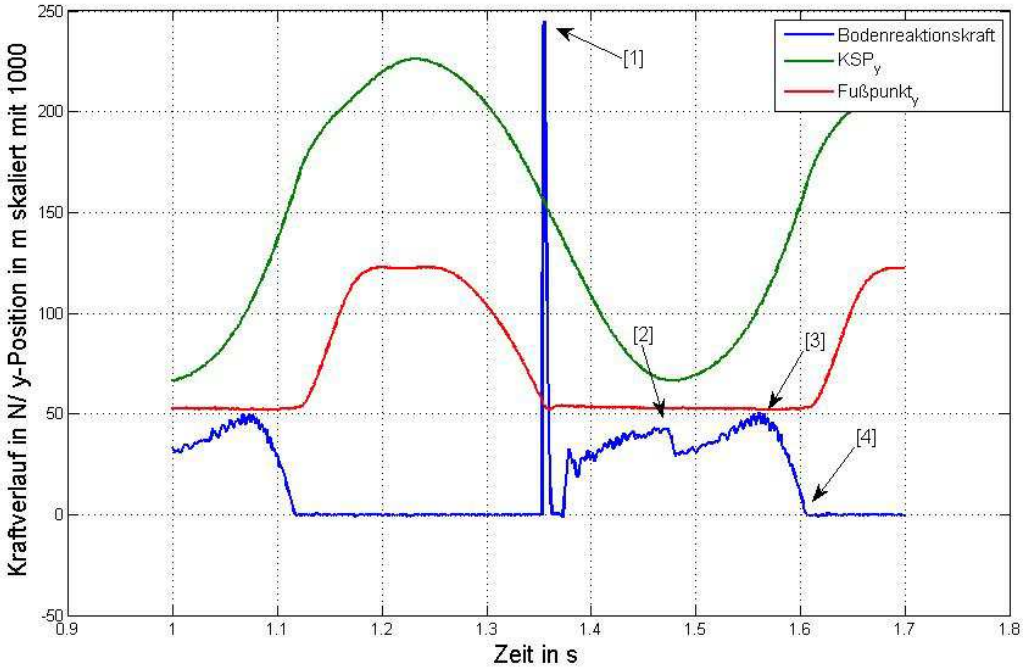


Abbildung 5.2: Experimentell ermittelter Ablauf Sprung auf Boden mit "Beton" Eigenschaften

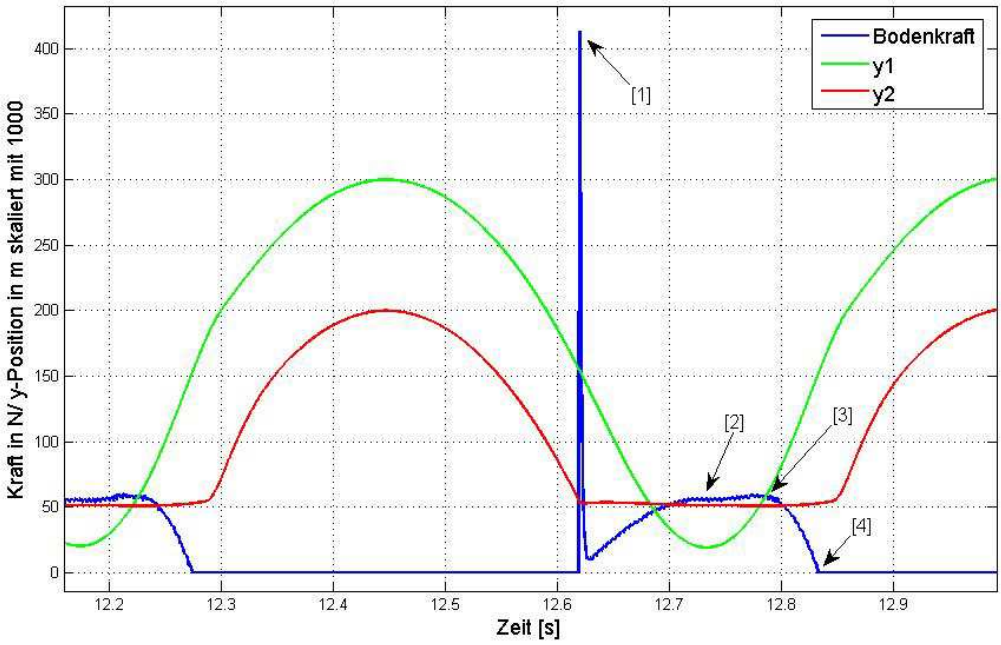


Abbildung 5.4: Simulierter Ablauf Sprung auf Boden mit „Beton"-Eigenschaften

Ein großes Problem das beim bisherigen Simulationsmodell auftritt ist, dass sich die Körpermasse tiefer als die Beinmasse bewegen kann. Das heißt, dass diese nicht in ihrer Bewegung durch einen Anschlag beschränkt wird. Dieses unphysikalische Verhalten führt zu einem zu einem weiteren Ansteigen der Bodenreaktionskraft. Diese unrealistisch hohe Kraft kann eine weitere Ursache für die überhöhte resultierende Sprunghöhe sein.

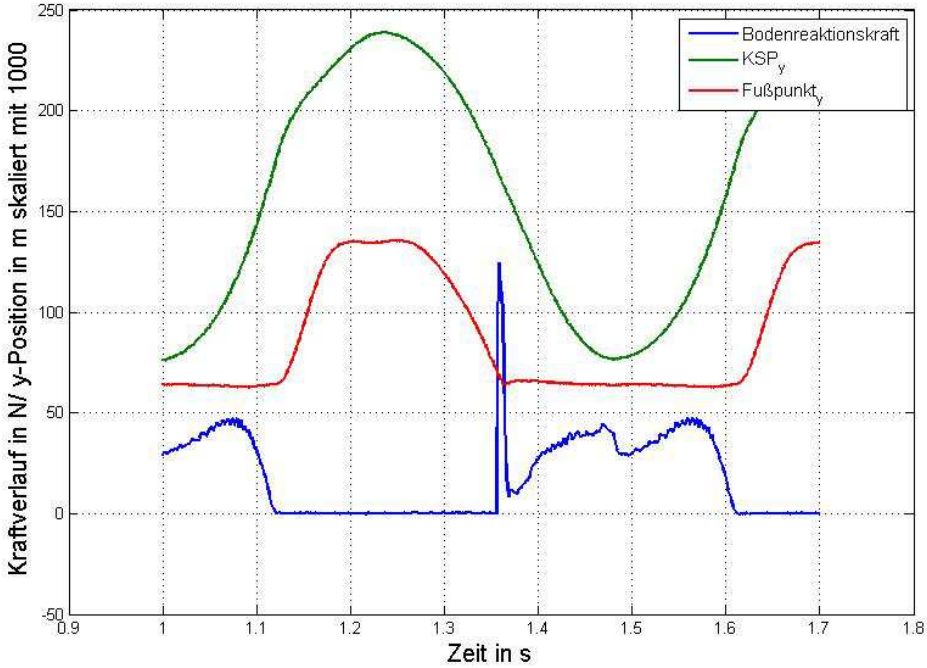


Abbildung 5.5:Experimentell ermittelter Ablauf Sprung auf Boden mit Adipren Eigenschaften

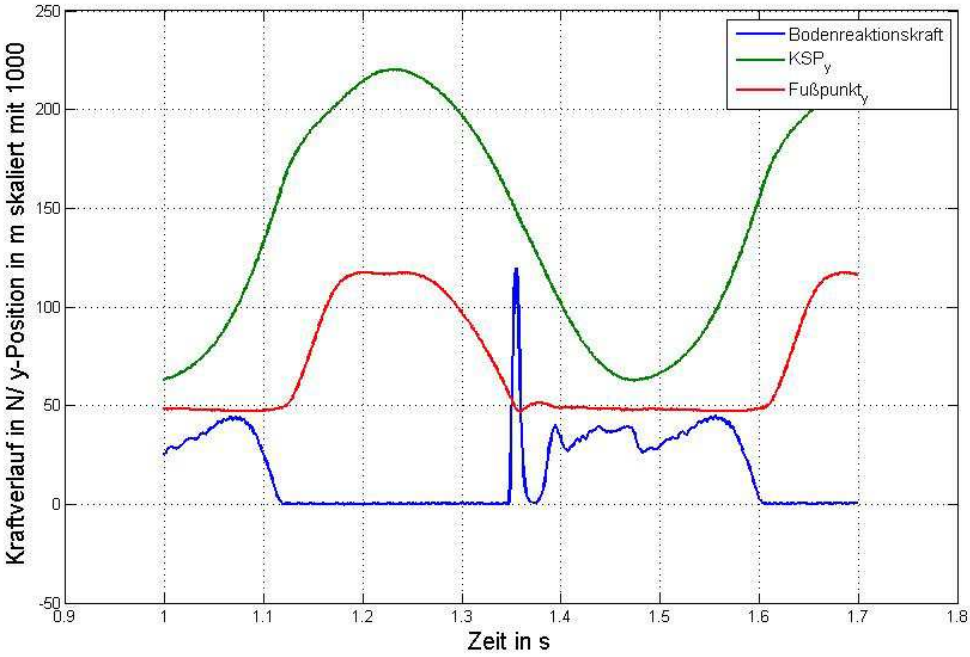


Abbildung 5.6: Experimentell ermittelter Ablauf Sprung auf Boden mit Schaumstoff Eigenschaften

Betrachtet man die experimentell ermittelten Verläufe und die real auftretenden Sprünge bei anderen Bodeneigenschaften fallen einige Dinge auf.

Der Vergleich von Abbildung 5.6 (experimentell ermittelter Verlauf bei einem Sprung auf einem Boden mit Schaumstoffeigenschaften) und Abbildung 5.7 (simulierter Sprung mit auf einem Boden mit Schaumstoffeigenschaften) soll beispielhaft einige Besonderheiten aufzeigen. Der Verlauf des Sprunges an sich kann durch das Modell gut abgebildet werden. Es verbleibt die höhere Auslenkung des Sprunges im Vergleich zum realen Sprung. Die möglichen Gründe für eine ungenaue Abbildung an dieser Stelle wurden bereits im vorigen Abschnitt erörtert. Bemerkenswert ist, dass die absolute Sprunghöhe im Vergleich zum Sprung auf Beton bei sonst gleichen Eigenschaften des Modells abnimmt. Der Boden hat also in diesem Modell eine Auswirkung auf die Sprunghöhe.

Eine zweite Beobachtung ist, dass beim realen Sprung auf Schaumstoff kurz nach dem ersten Aufsetzen des Fußes ein weiteres kurzes Abheben des Fußes auftritt (die Bodenreaktionskraft wird zu null). Dieses Verhalten ist bei allen Böden mehr oder weniger ausgeprägt zu beobachten. Besonders stark ist diese zweite Flugphase bei den Materialien Tartan (siehe Abbildung 5.9) und dem Boden mit „Schuh“-Eigenschaften (siehe Abbildung 5.8) ausgeprägt. Auch das Modellverhalten zeigt ein weiteres Abheben des Fußes nach dem ersten Bodenkontakt. Jedoch schwingt der simulierte Fuß sehr viel stärker als der reale, so dass es zum konstanten Abheben und Aufkommen des Fußes mit sinkender Amplitude kommt. Diese Schwingung des Fußes zeigt sich auch in der simulierten Bodenreaktionskraft, welche unrealistisch hohe Werte annimmt. Ein je nach Material schnelleres Abklin-

gen der Bodenschwingung würde die Aussagekraft des Modells erhöhen. Die andauernde Schwingung ist einer fehlenden Dämpfung des Bodens im bestehenden Modell zu zuschreiben. Die Modellierung der dämpfenden Eigenschaften des Bodens mittels einer Kraftabbau-Konstante, welche die Impact-Kraft begrenzt ist also nicht ausreichend um den Boden korrekt zu beschreiben.

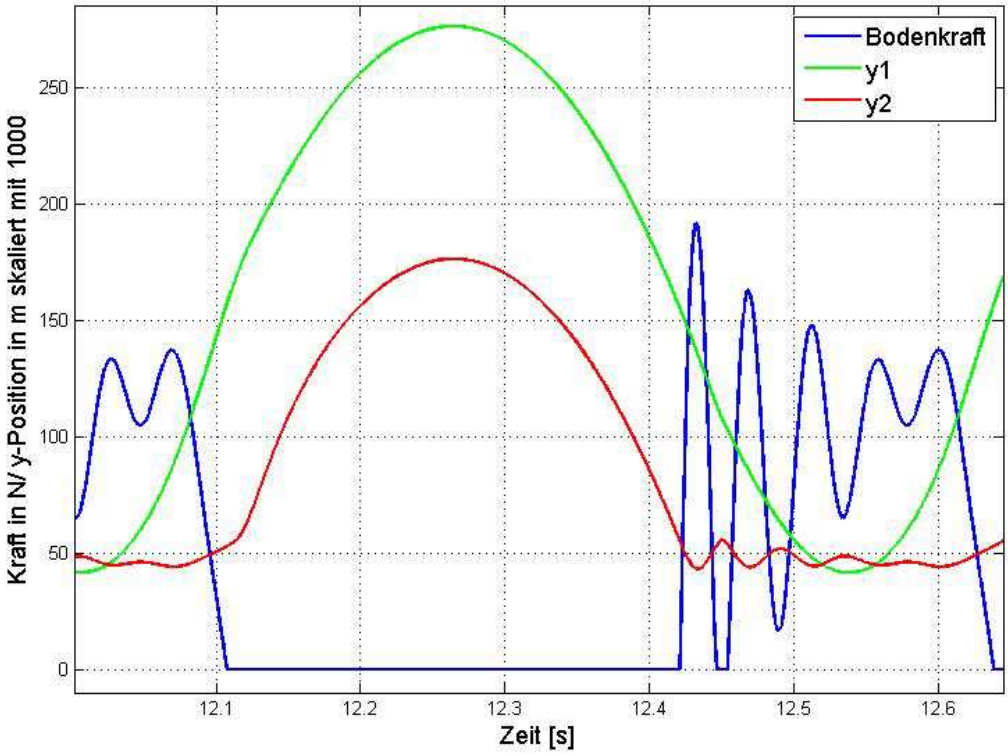


Abbildung 5.7: Simulierter Ablauf Sprung auf Boden mit Schaumstoff Eigenschaften

Betrachtet man die Versuchsergebnisse des Sprungs auf dem Schuhmaterial (siehe Abbildung 5.8) wird deutlich, dass das Modell im quantitativen Verhalten zwar unrealistisch hohe Werte annimmt das qualitative Verhalten mancher Materialien jedoch abbilden kann. Die Schwingung des Fußes zeigt wiederholtes Abheben des Fußes mit einer daraus resultierenden ebenfalls schwingenden Bodenreaktionskraft. Das Abklingen der Schwingung erfolgt jedoch weitaus schneller als es beim Modell erzielt wird. Eine mögliche Konsequenz aus dieser Beobachtung ist also, in das Modell des Bodens eine zusätzliche Dämpfungskomponente zu integrieren, die ein schnelleres Abklingen der Schwingung bewirkt.

5.2. Quantitativer Vergleich Modell - Experiment

Um weitere Aussagen zur Genauigkeit und Verwendbarkeit des Modells machen zu können sollen beispielhafte Werte aus beiden Herangehensweisen verglichen werden.

Tabelle 5.1: Sprunghöhen für Experiment und Modell

Material	Sprunghöhe Experiment (höchster Wert KSP - Beispielsprung)	Sprunghöhe Modell (höchster Wert KSP - Beispielsprung)
Tartan (ScopeData_15)	0.221 m	0.269 m
Schaumstoff (ScopeData_14)	0.220 m	0.276 m
Beton (ScopeData_12)	0.226 m	0.300 m

In Tabelle 5.1 wurden dafür einige Werte zusammen getragen. Der Vergleich der maximalen Sprunghöhen zeigt, dass die durch die Simulation gewonnenen Werte weit von den experimentellen Werten abweichen. Mehrere mögliche Ursachen, wie die Vernachlässigung von Verlusten durch Reibung im System, das Überschwingen der Körpermasse unter den Fußpunkt, die zu hoch gewählten energieerhaltenden Eigenschaften der Boden-Materialien und das Überschwingen des Bodens wurden bereits erwähnt. Allerdings bleiben die Tendenzen die die Sprunghöhen für verschiedene Materialien aufweisen auch im Modell erhalten. Man kann schließen, dass die Effekte die verschiedene Bodenmaterialien auf den Sprung haben in ihrer Tendenz durch die Modellierung korrekt beschrieben werden, die Amplitude der Effekte jedoch im Modell überschätzt werden.

5.3. Konsequenzen aus dem Vergleich

Es können verschiedene Konsequenzen aus den gewonnenen Erkenntnissen gezogen werden.

Zunächst wurde klar, dass das gewählte Bodenmodell es nicht schafft den realen, experimentellen Sprung in einer zufriedenstellenden Weise darzustellen. Die im Modell gewonnenen Werte können nur Tendenzen aufzeigen, sobald der experimentell bekannte Rahmen verlassen wird. Schon bei der Modellierung eines Sprungs auf einem als sehr steif angenommenen Boden ohne dissipative Effekte kann die Realität nicht zufriedenstellend dargestellt werden. Nimmt nun das Bodenmodell in seiner Komplexität zu, um weitere real auftretende Effekte zu berücksichtigen vermischen sich Fehler des Sprungmodells und des Bodenmodells. Diese können nicht mehr klar getrennt werden und senken somit die Aussagekraft weiter.

Es muss darauf geachtet werden, dass ein Sprungmodell zur Verfügung steht, welches bei sehr einfachen Bodenmodellen (linear-elastische Zusammenhänge) korrekte Ergebnisse liefert um bei komplexeren Bodenmodellen auftretende Fehler zuordnen zu können.

Es wurde versucht im entwickelten Bodenmodell beobachtete und vermutete Effekte die bei Bodenkontakt auftreten (Energiedissipation und Rückführung von Energie in den Sprung) zu berücksichtigen und

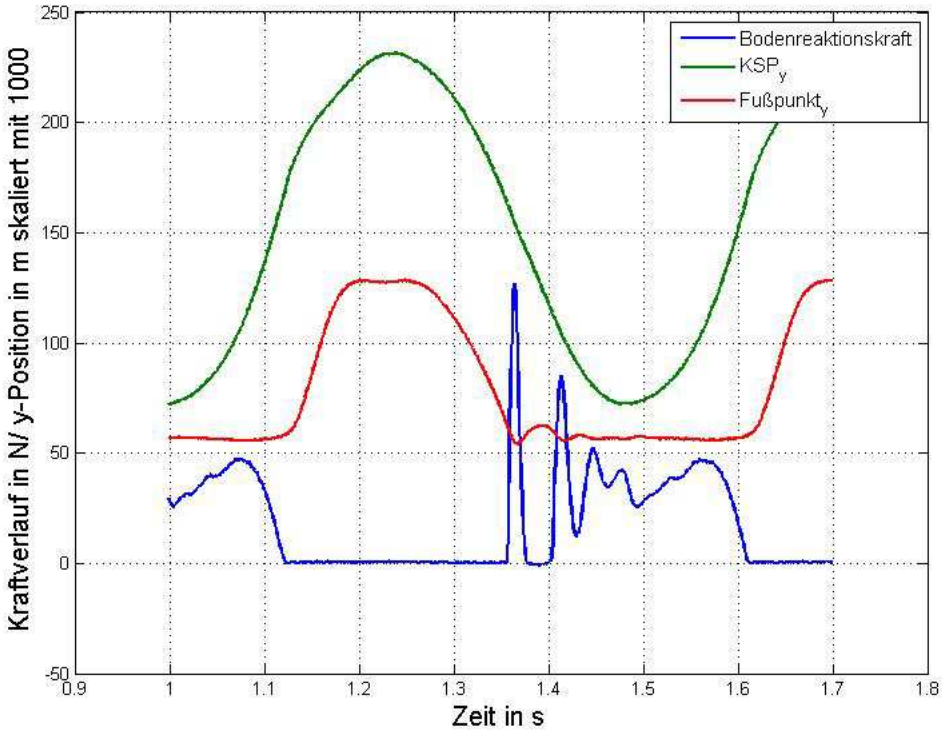


Abbildung 5.8: Experimentell ermittelter Ablauf Sprung auf Boden mit "Schuh" Eigenschaften

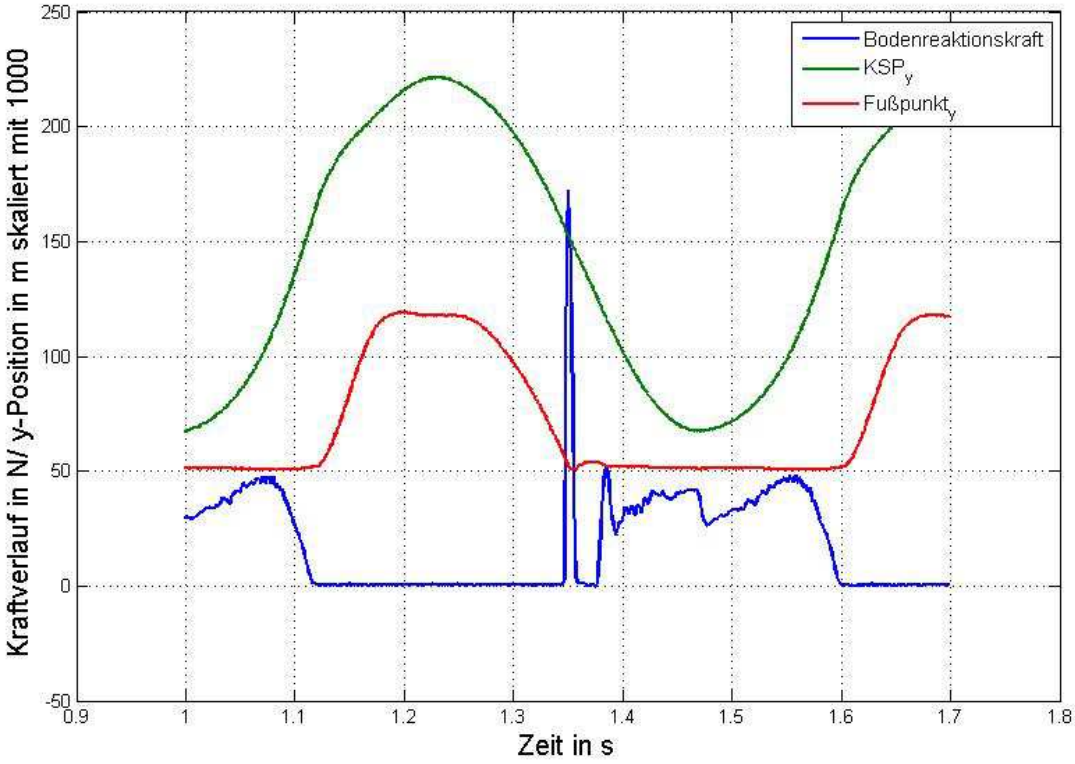


Abbildung 5.9: Experimentell ermittelter Ablauf Sprung auf Boden mit "Tartan" Eigenschaften

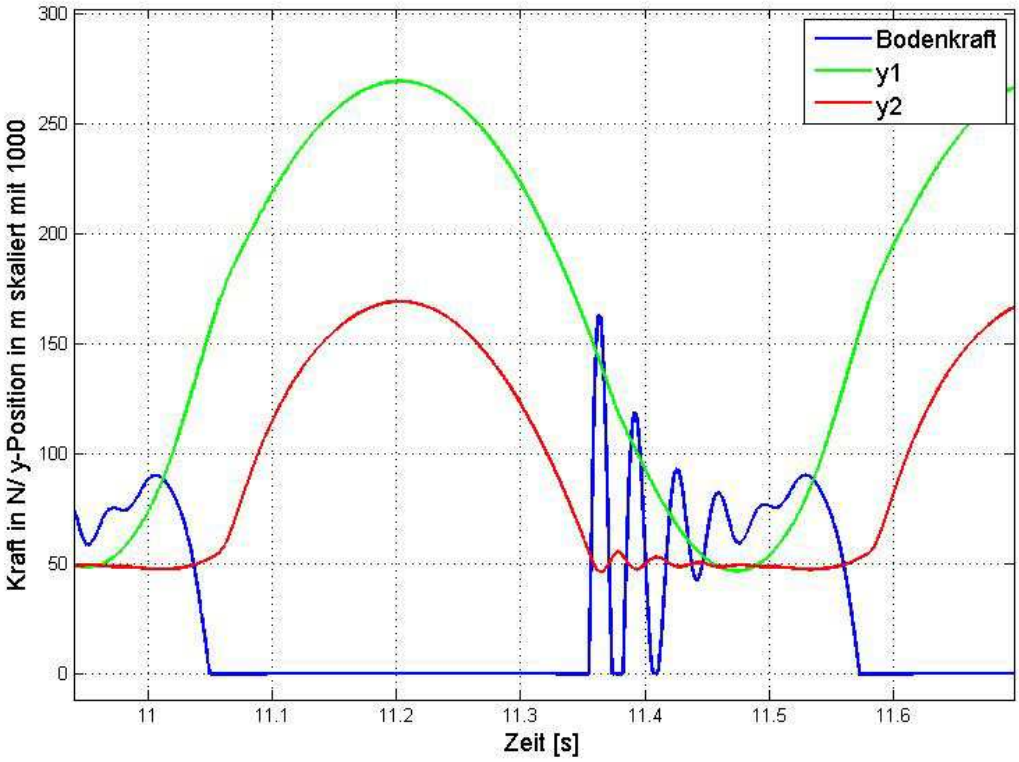


Abbildung 5.10: Simulierter Ablauf Sprung auf Boden mit "Tartan" Eigenschaften

6. Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend sollen noch einmal die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst werden, um Konsequenzen aufzuzeigen und auf mögliche weiterführende Arbeiten hinzuweisen.

6.1. Bewertung der Ergebnisse

Mittels der durchgeführten experimentellen Untersuchungen konnten Eigenschaften von Böden identifiziert werden, die einen Einfluss auf Sprungverläufe haben und deren Einfluss in den beschreibenden Größen des Sprungs erkennbar sind. Allerdings konnte aufgrund der Auswahl der Probekörper keine exakte mathematische Beschreibung der Bodenmaterialien erfolgen. Für weiterführende Untersuchungen ist es notwendig Materialien zu verwenden, deren Eigenschaften im Parameterbereich der Experimente exakt bestimmbar sind. Nur so kann ein Zusammenhang zwischen Bodeneigenschaften und Sprungergebnissen bestimmt werden, der auch Vorhersagen für andere, quantifizierte Materialien ermöglicht. Im Rahmen dieses Projekts wurde nur auf den Einfluss von verschiedenen Böden eingegangen. Der überlagerte Einfluss von Schuhmaterialien konnte nicht ermittelt werden. Es ist möglich die Ergebnisse die für variierende Bodeneigenschaften erzielt wurden als variierende Eigenschaften des Materials zu betrachten, mit dem der Mensch beim Sprung in Kontakt kommt (also Schuh oder Boden, bei jeweils starrem Anteil von Boden oder Schuh). Die Ergebnisse können also auch für die Untersuchung von Sprüngen bei variierenden Schuhmaterialien auf einem starren Boden verwendet werden.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen korrekte Tendenzen auf und können die Grundlage für weiterführende Arbeiten bilden. Es ist eine weitere Verfeinerung der Modellierung von Sprung und Boden notwendig um realistische Ergebnisse erzielen zu können. Die gewonnenen Daten können verwendet werden um weitere Modelle auf ihre Realitätsnähe zu prüfen. Das erarbeitete Bodenmodell weist korrekte Tendenzen auf, kann aber noch nicht alle in der Realität auftretenden Effekte abbilden. Gerade bei den Dämpfungseigenschaften realer Böden schafft es das Modell noch nicht ein korrektes Verhalten abzubilden. Gelingt es einen Parameter des Bodens zu quantifizieren der eine Aussage zur Dämpfung modellhaft greifbar macht, könnte die Implementierung in das Modell eine korrekte Beschreibung der Realität ermöglichen.

6.2. Weiterführende Arbeiten

Aufbauend auf die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse können weitere Untersuchungen folgen um die beobachteten Effekte besser erklären und vorhersagen zu können. Wie bereits erwähnt, ist es notwendig Experimente auf Böden mit exakt quantifizierbarem Verhalten durchzuführen. Da-

zu ist es unter Umständen notwendig eine Arbeit auf das Ziel hin auszurichten die Quantifizierung von Böden zu ermöglichen und auch eine Versuchsplattform zu entwickeln, in der diese Böden unter Ausschluss von möglichen Randeffekten im Marco Hopper getestet werden können. Um Fehler in den Ergebnissen durch die Streuung von Bodeneigenschaften oder durch Fehler bei der Versuchsdurchführung auszuschließen muss ein statistisch abgesicherter Versuchsplan entworfen werden, der diese Dinge berücksichtigt. Auch die Versuchsplattform Marco Hopper ist für Untersuchungen nicht ideal, da hier der menschliche Sprung nur angenähert wird und dadurch systematische Fehler auftreten können. Diese Fehler könnten zu Aussagen führen, welche sich bei menschlichen Sprüngen als falsch erweisen. Versuche mit realen Sprüngen auf variierenden Bodenmaterialien könnten diese systematischen Fehler aufzeigen und somit auch die Interpretation von Ergebnissen, die aus Experimenten mit Marco Hopper gewonnen werden, verbessern.

Stehen durch die weiteren Untersuchungen valide Werte für Boden Parameter zur Verfügung ist es möglich das Simulationsmodell zu verbessern bzw. zu erweitern. Zum einen wurde das in dieser Arbeit verwendete Modell so gestaltet, dass es den Experimenten mit Marco Hopper nahe kam. Werden reale Versuche durchgeführt muss das Sprung-Modell angepasst werden, kann dann aber die Realität besser beschreiben. Wie bereits beschrieben ist es notwendig das bestehende Bodenmodell zu erweitern um eine korrekte Bodenmodellierung zu ermöglichen. Auch an dieser Stelle ist also der Übergang zu realen Versuchen ein vielversprechender Weg um genauere Aussagen zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

ASM GmbH. (2004). *POSIMAG® Magnetic Scale Position Sensors*. Zugriff am: 23.01.2015 unter: http://www.asm-sensor.com/asm/pdf/pro/pm_kat_en.pdf

Blickhan, R. (1989). The spring-mass model for running and hopping. *Journal of biomechanics, 22*(11), 1217-1227.

Farley, C. T., Blickhan, R., Saito, J., & Taylor, C. R. (1991). Hopping frequency in humans: a test of how springs set stride frequency in bouncing gaits. *J Appl Physiol, 71*(6), 2127-2132.

Farley, C. T., Glasheen, J., & McMahon, T. A. (1993). Running springs: speed and animal size. *Journal of experimental Biology, 185*(1), 71-86.

Farley, C. T., Houdijk, H. H., Van Strien, C., & Louie, M. (1998). Mechanism of leg stiffness adjustment for hopping on surfaces of different stiffnesses. *Journal of Applied Physiology, 85*(3), 1044-1055.

Farley, C. T., & Morgenroth, D. C. (1999). Leg stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. *Journal of biomechanics, 32*(3), 267-273.

Ferris, D. P., & Farley, C. T. (1997). Interaction of leg stiffness and surface stiffness during human hopping. *Journal of applied physiology, 82*(1), 15-22.

Haeufle, D., Günther, M., Blickhan, R., & Schmitt, S. (2012). Can quick release experiments reveal the muscle structure? A bionic approach. *Journal of Bionic Engineering, 9*(2), 211-223.

Henning, B. (2006). *Analyse und Vergleich von Muskelmodellen zum Einsatz in der Mehrkörperdynamiksimulation.* (Diplom), TU Darmstadt, Darmstadt.

J.-N. Burbach, P. E., F. Hoitz, F. Stuhlenmiller, Z. Xiaoguang, C. Zimmermann, F. Zwetsch. (2013). *Hopping*. Zugriff am: unter: http://wiki.ifs-tud.de/adp_laufrobotik/adp_2012_ws_group1

Kalveram, K. T., Haeufle, D., Grimmer, S., & Seyfarth, A. (2010). Energy management that generates hopping. Comparison of virtual, robotic and human bouncing *Proc. Int. Conf. on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous Robots 2010*.

Kloberdanz, H. (2013). Vorlesungsskript Produktinnovation. Darmstadt: Technische Universität.

Kuitunen, S., Komi, P. V., & Kyrolainen, H. (2002). Knee and ankle joint stiffness in sprint running. *Medicine and science in sports and exercise, 34*(1), 166-173.

Linthorne, N. P. (2001). Analysis of standing vertical jumps using a force platform. *American Journal of Physics, 69*(11), 1198-1204.

McMahon, T. A., & Cheng, G. C. (1990). The mechanics of running: how does stiffness couple with speed? *Journal of biomechanics, 23*, 65-78.

Risch, T. (2009). *Das Modell des EinMassenSchwingers*. Zugriff am: 20.01.2015 unter: http://www.vibrationsfoerdertechnik.de/schwingfoerdertechnik/schwingsysteme/einmassenschwinger.php

Seyfarth, A., Kalveram, K. T., & Geyer, H. (2007). Simulating muscle-reflex dynamics in a simple hopping robot *Autonome Mobile Systeme 2007* (S. 294-300): Springer.

Stinger Labs. (2009). *Spring-Mass-Damper System*. Zugriff am: 20.01.2015 unter: http://stinger.wpi.edu/courses/me4322/matlab.php

Thiele, H. (2010). *Fortbewegung (Bipedie) bei Kängurus*. Zugriff am: 15.02.2013 unter: http://www.hansthiele.de/australia/new-south-wales/nsw-bild-27.htm

Thienel, K.-C. (2006). Werkstoffe des Bauwesens: Frühjahrstrimester.

Tings, B. (2010). *Matlab Simulink am Beispiel schwingender mechanischer Systeme.* (Seminararbeit), RWTH Aachen, Aachen.

Ziermann, S. (2006). *Energiesparmechanismen und Stoßdämpferfunktionen am Bewegungsapparat des Pferdes.* lmu.

Zimmermann, C. (2012). *Simulation eines biologischen Muskels und die Entwicklung eines mechanischen Konzepts.* TU Darmstadt, Darmstadt.

A. Wichtigste Matlab-Skripte zur Auswertung der Versuche

An dieser Stelle sind die wichtigsten in der Ausarbeitung verwendeten Matlab-Skripte dargestellt. Diese können je nach Anwendungsfall in leicht veränderter Form verwendet worden sein, stellen aber die Grundlage für alle wichtigen Auswertungen dar.

A.1 Bestimmung des Kraftabbaus

```
%Bestimmung des Kraftabbaus der Böden
clear all
%Versuch aufgrund dessen der Kraftabbau des Bodens bestimmt werden soll
load ScopeData_12
T=ScopeData(:,1);
stance=ScopeData(:,8);
%Bestimmung der Zeitpunkte Take Off und Touch Down
Kanten=diff(stance);
TO_Sprung=find(Kanten==0.1);
TD_Sprung=find(Kanten==-0.1);
laenge_TO=length(TO_Sprung);
laenge_TD=length(TD_Sprung);
%Bestimmung der Impactkraft
for i=1:laenge_TD
    BRK_TD(i)=1000*max(ScopeData(TD_Sprung(i)-10:TD_Sprung(i)+10,6));
end
% Ermittlung der durchschnittlichen Impactkraft während der Sprünge 8:14,
% außerhalb der Einspringzeit und vor der Stufe bei Papier
mean_BRK_TD=mean(BRK_TD(8:14))
```

A.2 Bestimmung der Steifigkeit der verschiedenen Bodenproben

```
%Bestimmung der dynamischen Steifigkeit mittels k=delta_F/delta_s
%liefert die besten Ergebnisse; Bestätigung der Steifigkeit des Adiprens
```

```
clear all
%hier die Datei angeben mittels bei der die Steifigkeit der Unterlage
%bestimmt werden soll
load ScopeData_12;
%Ablegen der Bodenreaktionskraft in einem Vektor BRK, 6.Spalte der
%Messdaten
BRK=ScopeData(:,6);
laenge=length(BRK)-1;
%Bestimmen der durch Gewichtskraft entstehenden BRK
BRK_G=BRK(1);
%Filterung der BRK
 sampling_frequency = 1000;
  cut_off_frequency = 50;
  [B, A] = butter(4,cut_off_frequency/(sampling_frequency/2));
  BRK_filt = filtfilt(B,A,BRK);
  for i=1:length(BRK_filt)
     if BRK_filt(i)<=0
         BRK_filt(i)=0;
     end
 end
%Bestimmen der Differenz zwischen der durch die Gewichtskraft eingeprägten
%BRK und der BRK durch das Abdrücken
for i=1:laenge
    delta_BRK(i)=BRK(i)-BRK_G;
end
%Skalierung der Kraft auf N
delta_BRK=delta_BRK*1000;
%Ablegen der Auslenkung des Bodens in Vektor y_Boden, 4.Spalte der
%Messdaten
y_Boden=ScopeData(:,4);
```

```
laenge2=length(y_Boden)-1;
%Filterung von y_Boden
 sampling_frequency = 1000;
  cut_off_frequency = 10;
  [B, A] = butter(4,cut_off_frequency/(sampling_frequency/2));
  y_Boden_filt = filtfilt(B,A,y_Boden);
%Berechnen der Ausgangsauslenkung des Bodens durch das Gewicht von Marco
%--> Nulllage
y_Boden_0=y_Boden(1);
%Auslenkung des Bodens durch zusätzlich aufgebrachte Kraft, abdrücken des
%Fußes
for i=1:laenge2
    delta_y(i)=y_Boden(i)-y_Boden_0;
end
%Auslenkung des Bodens bei Abzug der Auslenkung des Fußes
delta_y_fuss=delta_BRK/15000;
for i=1:laenge2
    delta_y_2(i)=delta_y(i)+delta_BRK(i)/15000;
end
%Bestimmen der dynamischen Steifigkeit im Bereich vor dem ersten Absprung,
%delta_y>0
k_dyn=delta_BRK(1:140)./delta_y(1:140);
T=ScopeData(1:140,1);
%bestimmen der durchschnittlichen Steifigkeit in diesem Bereich
k_dyn2=k_dyn(20:100); %Auswahl des Bereiches in dem die Steifigkeit nahezu
konstant ist
mean_k_dyn=mean(k_dyn2(isfinite(k_dyn2))); %Funktion die unendliche oder nan
Werte ignoriert
%Ermittlung der Bodensteifigkeit aus Reihenschaltung Boden und Fuß
k_fuss=15000;
k_boden=mean_k_dyn*k_fuss/(k_fuss-mean_k_dyn);
```

```
plot(T,delta_BRK(1:140),T,10000*delta_y(1:140))

legend('Bodenreaktionskraft in N','Bodenauslenkung in m [*10^4]');

grid on
```

A.3 Darstellung der Verläufe des Sprunges und der Bodenreaktionskraft

```
%Darstellung Sprungbewegung KSP, Fuss und BRK

clear all

load ScopeData_12;

KSP_y=ScopeData(:,2);

Fuss_y=ScopeData(:,4);

BRK=1000*ScopeData(:,6);

T=ScopeData(:,1);

anfang=1000;

ende=1700;

plot(T(anfang:ende),BRK(anfang:ende),T(anfang:ende),1000*KSP_y(anfang:ende),T(an
fang:ende),1000*Fuss_y(anfang:ende))

xlabel('\fontsize{15}Zeit in s');

ylabel('\fontsize{15}Kraftverlauf in N/ y-Position in m skaliert mit 1000');

legend('\fontsize{11}Bodenreaktionskraft','\fontsize{11}KSP_y','\fontsize{11}Fuß
punkt_y');

grid on
```

A.4 Bestimmung der mittleren Sprunghöhen jedes Materials

```
%Bestimung der Sprunghöhen zum Vergleich des Verlaufes dieser

%Auslesen der KSP Bewegung und Sammlung in einer Matrix

clear all

%1 ScopeData_11, Standardunterlage, k=k0, Stufe ein

%2 ScopeData_12 Papierunterlage, k=k0

%3 ScopeData_13 Schaumstoff, dicke= 1.3cm, k=k0

%4 ScopeData_14 Schaumstoff, dicke= 2.6cm, k=k0

%5 ScopeData_15 Tartan, k=k0

%6 ScopeData_16 Standardunterlage, k=k0
```

```
%7 ScopeData_17 Standard,k=350

%8 ScopeData_18 Standard, k=300

%9 ScopeData_19 Tartan, k=450

%10 ScopeData_20 Tartan, k=500

%11 ScopeData_21 direkt auf Sensor, k=450

%12 ScopeData_22 Schuh, k=k0

%13 ScopeData_23 Schuh, k=k0

%14 ScopeData_24 Adipren, k=k0

%15 ScopeData_25 Adipren, k=450

%16 ScopeData_26 Adipren, k=350

%17 ScopeData_27 Schuh, k=350

%18 ScopeData_28 Schuh, k=450

%Einlesen der experimentellen Daten

Dateinamen={'ScopeData_11','ScopeData_12','ScopeData_13','ScopeData_14','ScopeDa
ta_15',...

'ScopeData_16','ScopeData_17','ScopeData_18','ScopeData_19','ScopeData_20',...

'ScopeData_21','ScopeData_22','ScopeData_23','ScopeData_24','ScopeData_25',...

    'ScopeData_26','ScopeData_27','ScopeData_28'};

%Anzahl der eingelesenen Dateien

laenge=length(Dateinamen);

%aus den einzelnen eingelesenen Dateien werden die KSP_y Daten ausgelesen

%und in einer neuen Matrix KSP_y gespeichert, es wird die Nullauslenkung
ScopeData(1,2) im

%Stillstand abgezogen um Kurven vergeleichen zu können

for i = 1:laenge

    load(Dateinamen{i});

    KSP_y(:,i)=ScopeData(:,2)-ScopeData(1,2);

    stance(:,i)=ScopeData(:,8);

end
```

```
%Workaround für die Dateien die sich mittels der Schleife nicht erfassen
%lassen
load ScopeData_12;
KSP_y(:,2)=ScopeData(:,2)-ScopeData(1,2);
stance(:,2)=ScopeData(:,8);
load ScopeData_13;
KSP_y(:,3)=ScopeData(:,2)-ScopeData(1,2);
stance(:,3)=ScopeData(:,8);

load ScopeData_14;
KSP_y(:,4)=ScopeData(:,2)-ScopeData(1,2);
stance(:,4)=ScopeData(:,8);
load ScopeData_15;
KSP_y(:,5)=ScopeData(:,2)-ScopeData(1,2);
stance(:,5)=ScopeData(:,8);
load ScopeData_16;
KSP_y(:,6)=ScopeData(:,2)-ScopeData(1,2);
stance(:,6)=ScopeData(:,8);
%Erstellung einer Zeitmatrix KSP_y_T die in der Dimension mit KSP_y
%übereinstimmt
%Filterung der KSP_y
 sampling_frequency = 1000;
  cut_off_frequency = 50;
  [B, A] = butter(4,cut_off_frequency/(sampling_frequency/2));
  KSP_y_filt = filtfilt(B,A,KSP_y);
KSP_y_T=ScopeData(:,1);
for i=1:18
    Kanten=diff(stance(:,i));
    TO_Sprung=find(Kanten==0.1);
    TD_Sprung=find(Kanten==-0.1);
```

```
    for ii=1:length(TD_Sprung)
        h_max(ii,i)=max(KSP_y(TO_Sprung(ii):TD_Sprung(ii),i));
    end
    clear Kanten
    clear TO_Sprung
    clear TD_Sprung
end
x=linspace(1,42,42);
plot(x(1:length(h_max(:,2))),h_max(:,2),'-
',x(1:length(h_max(:,4))),h_max(:,4),':',x(1:length(h_max(:,5))),h_max(:,5),'-
.',x(1:length(h_max(:,6))),h_max(:,6),'--
',x(1:length(h_max(:,12))),h_max(:,12),'-
',x(1:length(h_max(:,14))),h_max(:,14),':')
legend('Papier','Schaumstoff','Tartan','Holz','Schuh','Adipren');
xlabel('Anzahl Sprung N');
ylabel('Sprunghöhe des Fußes in m (Nulllage ist Höhe zum Zeitpunkt 0)');
axis([1 8.5 0.165 0.178]); %Lage der ersten 8 Sprünge
grid on
%Bestimmung der mittleren Sprunghöhen jedes Materials
for i=1:18
    mean_h_max(i)=mean(h_max(:,i));
end
%Bestimmung der mittleren Sprunghöhe ab dem 8. Sprung
for i=1:18
    mean_h_max_2(i)=mean(h_max(8:length(h_max(:,i)),i));
end
mean_h_max(2)=(mean(h_max(1:14,2))+mean(h_max(27:length(h_max(:,2)))))/2;
mean_h_max_2(2)=(mean(h_max(8:14,2))+mean(h_max(27:length(h_max(:,2)))))/2;
```