

# Anwendung einer Homotopie-Optimierungsmethode zur Identifikation der Modellparameter eines Roboterprototyps

Y. Luo<sup>1</sup>, U.J. Römer<sup>1</sup>, S. Riegraf<sup>1</sup>, M. Zirkel<sup>2</sup>, L. Zentner<sup>2</sup>, A. Fidlin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Technische Mechanik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland

<sup>2</sup> Fachgebiet Nachgiebige Systeme, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Deutschland

## Kurzfassung

Bei der Entwicklung eines Roboter Prototyps mit fünf Segmenten sind die Systemparameter zu identifizieren, die für den modellbasierten Regelungsentwurf notwendig sind. Die periodische Gehbewegung bei konstanter Geschwindigkeit wird durch die geregelten Schwingungen der Beine erzeugt. Das dynamische Experiment in Form eines Doppelpendels wird auf der Hälfte des Prototyps inklusive einem Oberschenkel und einem Unterschenkel durchgeführt. Die Rotationswinkel in der Hüfte- und Kniegelenke wird durch zwei Winkelsensoren aufgenommen. Das Parameteridentifikationsprozess wird als ein Homotopie-Methode basiertes Optimierungsproblem formuliert, das die Abweichung zwischen der gemessenen Zeitreihe und der simulierten Winkel-Trajektorie minimiert. Währenddessen werden die Anfangsbedingungen der Simulation, Sensorkalibrierung und Systemparameter variiert, bis ein globales Minimum erreicht ist. Die vorgestellte Methode zeigt eine zuverlässige und reproduzierbare Abschätzung der Parameter auf das reale System.

## 1 Einleitung

Die experimentelle Identifikation von Parametern in Modellen nichtlinearer dynamischer Systeme ist ein wichtiger Schritt bei der Verwendung modellbasierter Reglerkonzepte und bei der Validierung von Simulationsergebnissen. Während zur Parameteridentifikation bei linearen Systemen Methoden zur experimentellen Modalanalyse genutzt werden können [1], existiert für nichtlineare Systeme keine vergleichbare allgemeine Methodik. Vielmehr gibt es eine Vielzahl an Methoden und Varianten, die je nach System besser oder weniger gut zur Identifikation der interessierenden Parameter geeignet sind.

Im Folgenden sollen die Parameter eines zweibeinigen Roboterprototyps identifiziert werden, um diese sowohl in einer modellbasierten Regelung, als auch zur Validierung von Simulationsergebnissen zu nutzen. Als besondere Anforderung ergibt sich hierbei die Notwendigkeit, einen automatisierten Prozess zur Parameteridentifikation für das Prototypsystem zu entwickeln: im Rahmen der geplanten Experimente sollen viele Modifikationen des Systems vorgenommen werden, die jeweils eine erneute Identifikation erforderlich machen. Eine Möglichkeit, die Parameter eines Systems gewöhnlicher Differentialgleichungen zu identifizieren, ist die Formulierung als Optimierungsproblem [2]. Hierbei wird das Residuum zwischen gemessenen und simulierten Zeitreihen des Systems als

Zielfunktional durch ein geeignetes Optimierungsverfahren wie die Gauss-Newton-Methode oder die Levenberg-Marquardt-Methode [3] minimiert. Das Ergebnis bei diesem Vorgehen ist jedoch abhängig von den Anfangswerten für die gesuchten Parameter, da das Optimierungsproblem im Allgemeinen lokale Minima besitzt und das Optimierungsverfahren mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht das globale Minimum ermittelt. Andererseits eignet sich dieser Ansatz gut, um den Prozess zur Parameteridentifikation durch einen Algorithmus zu automatisieren, der lediglich gemessene Zeitreihen des jeweiligen Systems benötigt, deren Erzeugung und Aufzeichnung ggf. auch automatisiert werden kann.

In [4] wird vorgeschlagen, die Formulierung als Optimierungsproblem mit einem Homotopie-Verfahren zu kombinieren, um das Problem der Konvergenz zu lokalen Minima zu reduzieren. Das System wird zur Simulation der Zeitreihen zunächst um einen Beobachter mit hoher Verstärkung erweitert, der verhindert, dass aufgrund der Parameterabweichungen große Abweichungen zwischen Messung und Simulation auftreten. Durch das Homotopie-Verfahren wird die Beobacherverstärkung immer weiter reduziert, bis schließlich das ursprüngliche System ohne Beobachter simuliert wird. Innerhalb jedes Homotopie-Schrittes wird das entsprechende Optimierungsproblem gelöst, womit sich am Ende wieder die Lösung des ursprünglichen Problems ergibt. Das Verfahren wurde bisher vor allem theoretisch unter Verwendung simulierter Messdaten untersucht und zeigt dabei die gewünschte Konvergenz zum globalen Optimum [4, 5]. Eine tatsächliche Anwendung zur Identifikation der Parameter eines realen Systems auf Basis tatsächlicher Messdaten ist nach unserem Kenntnisstand jedoch bisher nicht bekannt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Anwendung der Homotopie-Optimierungs-Methode zur Identifikation der Parameter eines Roboterprototyps. Dabei werden in Abschnitt 2 zunächst das Modell, das zugehörige Prototypsystem und die zu identifizierenden Parameter vorgestellt. In Abschnitt 3 werden die verwendete Homotopie-Optimierungs-Methode eingeführt und die algorithmische Implementierung beschrieben. Auf den Aufbau und die Durchführung der Experimente mit einem Roboterbein zur Aufzeichnung von Messdaten wird in Abschnitt 4 eingegangen. Die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 5. In Abschnitt 6 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

## 2 Robotermodell und Prototyp

Das Robotermodell und der darauf basierende Prototyp sind in Abb. 1 dargestellt. Das Modell in Abb. 1a besteht aus fünf Starrkörpersegmenten: einem Oberkörper ( $OK$ ), zwei Oberschenkeln ( $OS$ ) und zwei Unterschenkeln ( $US$ ), die in den aktuierten Hüft- und Kniegelenken drehbar miteinander verbunden sind. Dieses mechanische Modell wird durch die jeweiligen Parameter Segmentlänge<sup>1</sup>  $l_{OK}, l_{OS}, l_{US}$ , Schwerpunktsabstand  $r_{OK}, r_{OS}, r_{US}$ , Segmentmasse  $m_{OK}, m_{OS}, m_{US}$  und -massenträgheitsmoment  $J_{OK}, J_{OS}, J_{US}$  beschrieben. Dem Modell liegt die Annahme zugrunde, dass die Antriebsstränge starr mit dem jeweils angetriebenen Segment verbunden sind. Die Trägheit der Antriebsstränge kann also auf die jeweilige Abtriebswelle reduziert und dem angetriebenen

---

<sup>1</sup>Die Segmentlänge des Oberkörpers  $l_{OK}$  hat keinen Einfluss auf die Dynamik des Systems; sie taucht nicht als Parameter in den Systemgleichungen auf und muss daher nicht genau bestimmt werden.

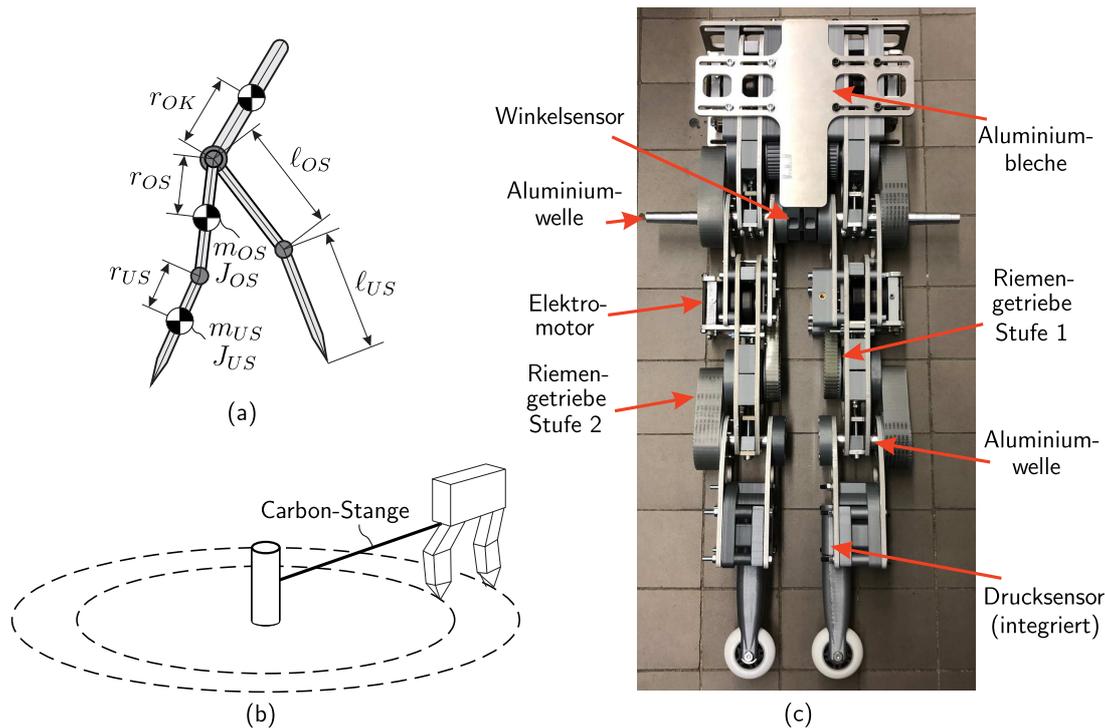


Abb. 1: (a) Mechanische Parameter des Robotermodells, (b) Konzept zum Realisieren der ebenen Laufbewegung des Prototyps und (c) der Prototyp aus fünf starren Segmenten (ohne Verkabelung).

Segment aufgeschlagen werden.

Auf Grundlage dieses Modells wurde in Vorarbeiten [6, 7, 8] durch Simulationen und mittels numerischer Optimierung untersucht, wie die Energieeffizienz beim Gehen durch die Verwendung von nachgiebigen Mechanismen gesteigert werden kann. Diese sollen als nichtlineare Torsionsfedern zwischen benachbarten Robotersegmenten angebracht werden, um die Dynamik des unregulierten Systems so zu gestalten, dass die freien Schwingungen der späteren Gehbewegung möglichst ähnlich sind. Durch ein Regelungskonzept auf Basis der hybriden Nulldynamik [9, 10] können Gehbewegungen erzeugt und stabilisiert werden, die die passive Dynamik des mechanischen Systems ausnutzen, um eine hohe Energieeffizienz zu erreichen. Die Kennlinien der elastischen Kopplungen werden gemeinsam mit den Referenzbewegungen der Regelung für verschiedene Durchschnittsgeschwindigkeiten und Untergründe durch numerische Optimierung bestimmt. Ergebnis dieses Optimierungsprozesses ist eine periodische Gehbewegung, die der Resonanzbewegung des mechanischen Systems entspricht und damit eine hohe Energieeffizienz erreicht [11]. Die Resonanzbewegung besteht im Wesentlichen aus den freien Schwingungen der Roboterbeine, die durch die Aktoren lediglich leicht modifiziert werden, um Energieverluste während eines Schritts auszugleichen und dadurch einen Grenzzyklus als Lösung des geregelten Systems zu erzeugen.

Das Ziel der Prototypentwicklung ist die experimentelle Validierung der Simulationsergebnisse aus den Vorarbeiten. Das Konzept in Abb. 1b, dessen erfolgreiche Umsetzung bereits mehrfach in der Literatur dokumentiert ist [13, 14, 15], dient als Basis für die konstruktive Gestaltung des Roboterprototyps in Abb. 1c. Dieser soll das in den Simulationen zugrunde gelegte Modell möglichst gut

widerspiegeln. Ziel der beabsichtigten Experimente ist die Untersuchung und Optimierung der Energieeffizienz bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Untergründen. Hierfür ist der Einsatz vieler unterschiedlicher nachgiebiger Mechanismen für die elastische Kopplung der Robotersegmente vorgesehen, um die passive Dynamik entsprechend anzupassen. Um schnelle und einfache Modifikationen des Prototyps zu ermöglichen, werden hauptsächlich wasserstrahlgeschnittene Aluminiumbleche und 3D-gedruckte PLA-Teile zum Aufbau der Segmente verwendet. Ein seitliches Umkippen des Prototyps wird durch eine Führung mittels einer Carbon-Stange auf Höhe der Hüfte verhindert. Dadurch läuft der Prototyp auf einer Kreisbahn, was Experimente mit beliebiger Wegstrecke ohne ein Laufband erlaubt. Die Winkel in den Hüft- und Kniegelenken sowie der Winkel zwischen Führungsstange und Oberkörper werden durch kontaktlose Hallsensorarrays gemessen. Weiterhin sind in den Unterschenkeln zwei resistive Drucksensoren integriert um den Kontaktzustand der Beine mit dem Boden zu detektieren. Die Aktuierung aller Gelenke erfolgt durch identische Antriebsstränge, die jeweils aus einem elektronisch kommutierten Synchronmotor und einen zweistufigen Riemengetriebe bestehen. Die Antriebsstränge für die Hüftgelenke befinden sich im Oberkörper, die für die Kniegelenke in den jeweiligen Oberschenkeln. Da sie keine Antriebsstränge enthalten, haben die Unterschenkel eine wesentlich geringere Masse im Vergleich zu den anderen Segmenten. Eine detaillierte Beschreibung des Entwicklungsprozesses wird in [12] gegeben.

Ziel der beabsichtigten Experimente ist die Untersuchung und Optimierung der Energieeffizienz bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Untergründen. Hierfür ist der Einsatz vieler unterschiedlicher nachgiebiger Mechanismen für die elastische Kopplung der Robotersegmente vorgesehen, um die passive Dynamik entsprechend anzupassen. Nach jeder Modifikation des Prototypsystems muss hierbei eine erneute Identifikation der Modellparameter erfolgen, da diese sowohl für die modellbasierte Regelung auf Basis der hybriden Nulldynamik, als auch für die Validierung mit den Simulationen erforderlich sind. Zur Inbetriebnahme des Prototypsystems und für eine erste Validierung mit den Simulationen aus den Vorarbeiten wird zunächst eine Version des Prototyps ohne elastische Kopplungen aufgebaut.

Eine erste Schätzung der Modellparameter dieses Systems kann aus dem CAD-Modell des Prototyps extrahiert werden. Die Genauigkeit dieser Schätzung ist jedoch für den beabsichtigten Einsatz bei der Regelung und Validierung nicht ausreichend, da im CAD-Modell einige Vereinfachungen vorhanden sind. So ist keine Verkabelung modelliert und die Parameter einiger Komponenten wie Elektromotoren, Sensoren und Zahnriemen sind nicht oder nur unzureichend bekannt. Von den gesuchten Parametern werden lediglich die Segmentlängen  $l_{OK}$ ,  $l_{OS}$  und  $l_{US}$  aus dem CAD-Modell entnommen, da die Fertigung der Stützstruktur aus wasserstrahlgeschnittenen Aluminiumblechen mit vernachlässigbaren Toleranzen einher geht. Zur Ermittlung der Segmentmassen und Schwerpunktlagen wird der Prototyp an den Hüft- und Kniegelenken, an den Fußspitzen und am oberen Ende des Oberkörpers gelagert, sodass er horizontal gestreckt ist. Aus den statischen Lagerreaktionskräften und den Kräfte- und Momentenbilanzen des Systems können direkt die Parameter  $m_{OK}$ ,  $r_{OK}$ ,  $m_{OS}$ ,  $r_{OS}$ ,  $m_{US}$  und  $r_{US}$  bestimmt werden. Die Durchführung dieser statischen Messung und die automatisierte Auswertung zur Identifikation dieser Parameter ist mit geringem Aufwand automatisiert möglich. Lediglich die Lagerung des Prototyps muss manuell erfolgen.

Die verbleibenden unbekannt Parameter des Systems müssen aus dynamischen Experimenten mittels der Homotopie-Optimierungs-Methode bestimmt werden. Dies sind zum einen die Massenträgheitsmomente der Segmente  $J_{OK}$ ,  $J_{OS}$  und  $J_{US}$ , zum anderen wirken in den Gelenken Widerstandsmomente aufgrund von Energiedissipation, die in den Vorarbeiten bisher nicht modelliert wurden. Um diese möglichst einfach zu parametrisieren, wird für die Widerstandsmomente in den Hüft- und Kniegelenken der Ansatz

$$M_{W,i} = -(p_{R,i} \text{sign}(\dot{\varphi}_i) + p_{D,i} \dot{\varphi}_i), \quad i \in \{H, K\} \quad (1)$$

verwendet, der aus einem konstanten und einem geschwindigkeitsproportionalen Term mit den Parametern  $p_{R,i}, p_{D,i} \geq 0$  besteht und der Bewegung im jeweiligen Gelenk entgegen gerichtet ist.

### 3 Homotopie-Optimierungs-Methode

Das Parameteridentifikationsproblem wird, wie in [4] beschrieben, als Optimierungsproblem formuliert. Das System wird durch eine gewöhnliche Differentialgleichung in Zustandsform

$$\dot{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{f}}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) \quad (2)$$

mit den Zuständen  $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_{2n}]^\top$  und zu bestimmenden Parametern  $\mathbf{p} = [p_1, \dots, p_m]^\top$  modelliert. Für das mechanische System des Roboterprototyps mit den generalisierten Koordinaten  $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]^\top$  ergibt sich mit den Zuständen  $\mathbf{x} = [\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}]^\top$  ein Differentialgleichungssystem der Form

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{p}, t) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Aus einem dynamischen Experiment mit dem realen System liegen zu den Zeitpunkten  $t[k] = k T_A$ ,  $k = 0, \dots, K$  gemessene Zeitreihen mit der konstanten Abtastzeit  $T_A$  vor. Die Messwerte  $\hat{q}_j[k]$  liegen dabei zu allen Zeitpunkten  $t[k]$ , jedoch nicht notwendigerweise für alle generalisierten Koordinaten vor.<sup>2</sup> Zur Bestimmung der unbekannt Parameter  $\mathbf{p}$  und der ebenfalls nicht genau bekannten Anfangsbedingungen  $\mathbf{x}_0$  des Experiments, wird das Residuum

$$V(\mathbf{x}_0, \mathbf{p}) = \frac{1}{2} \sum_j \sum_{k=1}^K (\hat{q}_j[k] - q_j[k])^2 \left( \approx \frac{1}{2} \sum_j \left( \int_0^T (\hat{q}_j - q_j)^2 dt \right) \right) \quad (4)$$

minimiert.

Das globale Minimum entspricht den optimalen Systemparametern  $\mathbf{p}^*$ , mit denen die größte Übereinstimmung zwischen Modell und realem Systemverhalten erreicht wird. Daneben existieren jedoch im Allgemeinen noch viele lokale Minima, zu denen ein Optimierungsverfahren je nach Anfangsbedingungen  $\mathbf{x}_0$  und Anfangsparametern  $\mathbf{p}_0$  konvergieren kann. Um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, dass das Optimierungsverfahren auch bei schlechter Initialisierung zum globalen Optimum und damit zu den gewünschten Parameterwerten  $\mathbf{p}^*$  konvergiert, wird das ursprüngliche Problem (3) um

<sup>2</sup>Im Folgenden wird der in [4] beschriebene Sonderfall behandelt, dass lediglich generalisierte Koordinaten, jedoch keine generalisierten Geschwindigkeiten gemessen werden. Im allgemeinen Fall, bei dem beliebige Zustände gemessen werden, kann anstatt (5) ein entsprechender Beobachter direkt für das Modell (2) entworfen werden.

einen Beobachter ergänzt:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \hat{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} + \lambda K_1 (\hat{\mathbf{q}} - \mathbf{q}) \\ \mathbf{f}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{p}, t) + \lambda K_2 (\hat{\mathbf{q}} - \mathbf{q}) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Dabei ist  $\lambda \in [0, 1]$  der Homotopie-Parameter, und die Verstärkungsfaktoren  $K_1$  und  $K_2$  sind konstant, jedoch vom konkreten Problem abhängig zu wählen. Die Fehlerterme  $(\hat{\mathbf{q}} - \mathbf{q}) = [(\hat{q}_1 - q_1), \dots, (\hat{q}_n - q_n)]^\top$  werden dabei zu null gesetzt, falls für eine Koordinate keine Messung vorliegt. Der Homotopie-Parameter  $\lambda$  gibt den Verstärkungsfaktor des Beobachters vor: bei  $\lambda = 1$  dominiert der Beobachter die Systemdynamik und das Residuum  $V(\mathbf{x}_0, \mathbf{p})$  ist selbst bei schlechter Initialisierung der Parameter  $\mathbf{p}_0$  klein. Durch das Optimierungsverfahren kann eine bessere Schätzung für die Parameter  $\mathbf{p}$  ermittelt werden. Anschließend wird der Homotopie-Parameter  $\lambda \leftarrow \lambda - \Delta\lambda$  mit  $\Delta\lambda = 0,2$  Schritt für Schritt reduziert, wodurch der Einfluss des Beobachters auf die Systemdynamik immer geringer wird. In jedem Schritt wird die Minimierung des Residuums mit den optimalen Parametern aus dem vorherigen Homotopie-Schritt initialisiert und die Schätzung für die Parameter aktualisiert. Im letzten Homotopie-Schritt liegt mit  $\lambda = 0$  wieder das ursprüngliche Systemmodell ohne Beobachter vor, womit schließlich die eigentliche Identifikation der Modellparameter durchgeführt wird. Durch die vorherigen Homotopie-Schritte wird eine gute Initialisierung für dieses Optimierungsproblem generiert, wodurch mit hoher Wahrscheinlichkeit das globale Optimum gefunden werden kann. Die ebenfalls nicht genau bekannten Anfangsbedingungen  $\mathbf{x}_0$  werden wie zusätzliche Parameter behandelt und ebenfalls in jedem Schritt durch das Optimierungsverfahren angepasst.

Zur Implementierung der Homotopie-Optimierungs-Methode wird die Open-Source-Programmiersprache Julia verwendet, da hiermit ein einfacher und effizienter Prozess von der Systemmodellierung über den Beobachterentwurf bis hin zur numerischen Optimierung möglich ist. Es werden zunächst mittels der Packages<sup>3</sup> „ModelingToolkit.jl“ und „Symbolics.jl“ die Systemgleichungen symbolisch hergeleitet. Dadurch kann mit geringem Aufwand ein an die vorliegenden Messreihen angepasster Beobachter auf der rechten Seite addiert werden. Zur numerischen Zeitintegration der Differentialgleichung mit konstanter Zeitschrittweite wird das Verfahren „SHLDDRK64“ aus dem Package „DifferentialEquations.jl“ verwendet und schließlich das Residuum  $V(\mathbf{x}_0, \mathbf{p})$  berechnet. Zur Minimierung des Residuums wird das im Package „LsqFit.jl“ enthaltene Levenberg-Marquardt-Verfahren genutzt, das den benötigten Gradienten des Residuums durch automatisches Differenzieren mit dem Package „ForwardDiff.jl“ bestimmt. Der Aufwand bei der Implementierung ist durch die Nutzung der vorhandenen Algorithmen überschaubar. Da zu Beginn die Systemgleichungen in symbolischer Form erzeugt werden, das Verfahren von der Systemdimension unabhängig ist und die benötigten Ableitungen für das gradientenbasierte Levenberg-Marquardt-Verfahren ebenfalls automatisch erzeugt werden, kann der Algorithmus mit geringem Aufwand für nahezu beliebige mechanische Systeme genutzt werden.

---

<sup>3</sup>Bibliotheken werden in Julia als Packages bezeichnet.

#### 4 Aufbau und Durchführung der Experimente

Zur Anwendung der Homotopie-Optimierungs-Methode werden Experimente zur Aufzeichnung von Messdaten in Form von Zeitreihen mit einem Roboterbein durchgeführt. Bei den theoretischen Untersuchungen in der Literatur [4] werden simulierte Zeitreihen verwendet, und geprüft, ob die Werte der Systemparameter, mit denen diese erzeugt wurden, durch die Homotopie-Optimierungs-Methode wieder ermittelt werden können. Im Gegensatz dazu sind die „wahren“ Parameter bei einem realen System nicht bekannt, es kann also kein solcher Vergleich durchgeführt werden. Stattdessen werden Experimente mit verschiedenen Systemkonfigurationen durchgeführt, und anhand der Abweichungen zwischen Messdaten und der zugehörigen Simulation entschieden, ob das Ergebnis verwendet wird und der Prozess grundsätzlich für eine automatische Identifikation im Rahmen der geplanten Versuchsreihen geeignet ist. Dazu wird die Systemkomplexität schrittweise gesteigert, indem zunächst nur ein Unterschenkel in Form eines Pendels, und anschließend ein Bein in Form eines Doppelpendels betrachtet wird. Bei der Durchführung und Auswertung der Experimente hat sich gezeigt, dass die Energiedissipation in den Antriebssträngen (Elektromotoren mit zweistufigen Riemengetrieben) so groß ist, dass das System nicht zu nennenswerten freien Schwingungen in der Lage ist. Es werden daher Varianten ohne Antriebsstrang (beide Riemen demontiert), und solche mit halbem Antriebsstrang (nur Riemen der Stufe 2 montiert, vgl. Abb. 1c) betrachtet, die freie Schwingungen ausführen können.<sup>4</sup>

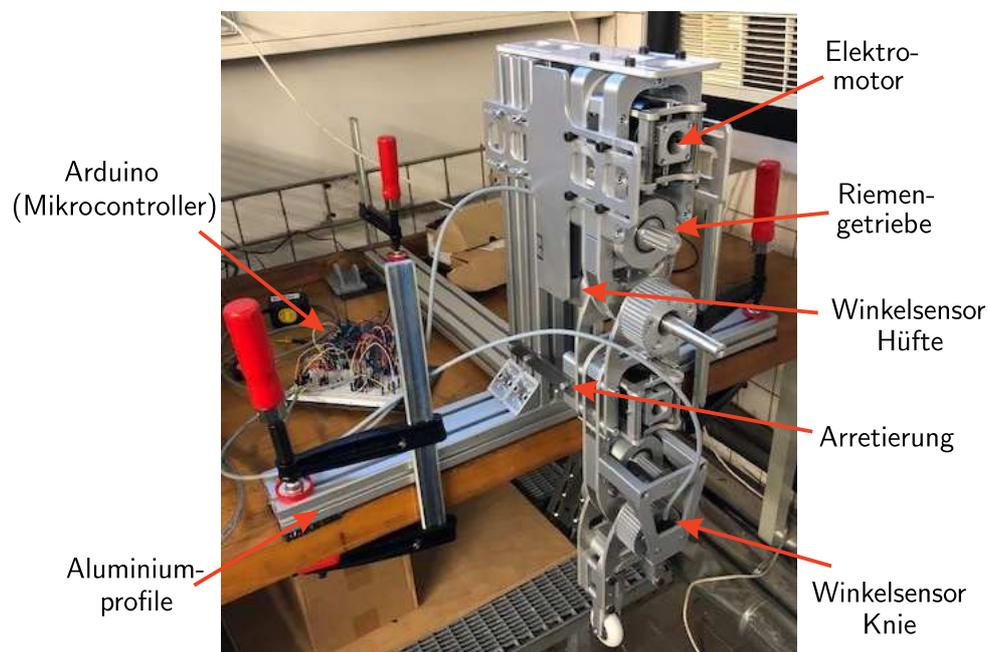


Abb. 2: Versuchsaufbau zur Durchführung von Schwingungsexperimenten mit Messung der Gelenkwinkel für ein Bein des Prototyps.

<sup>4</sup>Um mit dem Prototyp die Simulationsergebnisse zu validieren muss dieser zu freien Schwingungen in der Lage sein. Dazu werden im weiteren Entwicklungsprozess konstruktive Änderungen vorgenommen und anschließend wieder die Systemparameter identifiziert. Nach entsprechender Überarbeitung soll eine Parameteridentifikation für das Gesamtsystem durchgeführt werden.

Zur Aufzeichnung von Messdaten in Form von Zeitreihen wird der Aufbau in Abb. 2 verwendet. Eine Hälfte des Prototyps wird am Oberkörper fest eingespannt, sodass Hüft- und Kniegelenk des Beins beweglich sind und die Schenkel wie ein Doppelpendel schwingen können. Durch eine optionale Arretierungsvorrichtung kann zusätzlich der Oberschenkel fixiert werden, sodass lediglich der Unterschenkel Pendelbewegungen ausführen kann. Durch einen Arduino-Mikrocontroller werden die Winkelsensorsignale  $\hat{\varphi}_H$  und  $\hat{\varphi}_K$  im Hüft- und Kniegelenk ausgelesen und zur zentralen Datenverarbeitung an eine dSpace MicroLabBox übermittelt. Die Abtastfrequenz der Sensorsignale beträgt 1,1 kHz. Der kleinste auflösbare Winkel der 14-Bit Sensoren beträgt ca.  $0,02^\circ$ , für die Wiederholgenauigkeit wurden  $0,1^\circ$  ermittelt.

Zur Aufzeichnung von Zeitreihen wird das Pendel oder das Doppelpendel von Hand ausgelenkt und losgelassen, um freie Schwingungen auszuführen. Da die Anfangsbedingungen ebenso wie unbekannte Parameter durch den in Abschnitt 3 beschriebenen Algorithmus bestimmt werden, werden keine definierte Anfangslage und -geschwindigkeit benötigt. Die Nulllage der Winkelsensoren, die von der jeweiligen Montageorientierung abhängig ist, kann als unbekannter Parameter ebenfalls mitbestimmt werden, sodass hier keine Kalibrierung notwendig ist. Aus den aufgezeichneten Zeitreihen werden für die Parameteridentifikation automatisch die Zeitbereiche ausgewählt, in denen das System frei schwingt und nicht durch den Experimentator manipuliert wird. Da durch die sequentielle Kommunikation mit den Sensoren ein Zeitversatz zwischen den Daten für den Hüft- und den Knie-sensor vorliegt, werden die Signale bei Experimenten mit dem Doppelpendel linear interpoliert, um für alle Signale Daten zu identischen Zeitpunkten zu betrachten.

## 5 Ergebnisse

Vor der Durchführung der dynamischen Experimente werden durch Auslesen aus dem CAD-Modell und mittels der in Abschnitt 2 beschriebenen statischen Versuche die in Tab. 1 angegebenen Segmentlängen, -massen und Schwerpunktsabstände identifiziert. Zur Identifikation der verbleibenden Parameter werden zwei Methoden betrachtet: zum einen die von [4] vorgeschlagene und in Abschnitt 3 beschriebene Homotopie-Optimierungs-Methode, bei der eine Messreihe verwendet wird, um die Identifikation durchzuführen. Allerdings liegen bei manchen Versuchskonfigurationen zu kurze Datenreihen vor, die keine sinnvolle Auswertung zulassen. Zum Beispiel, ist das bei zu großer Reibung im Gelenk der Fall. Bei dieser „Original-Methode“ ergeben sich, abhängig davon, welcher Zeitausschnitt aus den Messdaten gewählt wird, unterschiedliche Werte für die identifizierten Parameter. Daher wird ihr eine „Erweiterte Methode“ gegenübergestellt, bei der aus den Zeitverläufen der freien Schwingungen zufällige Samples mit einer Dauer von je 4 s extrahiert werden. Es wird dann nicht für jedes Sample einzeln, sondern für alle Samples gemeinsam ein Satz von Parametern  $\mathbf{p}^*$  bestimmt, der die Summe aller Abweichungen in allen Samples minimiert. Die Samples können dabei aus einer langen Zeitreihe, oder aus verschiedenen Messungen desselben Systems stammen. Zusätzlich werden für  $i = 1, \dots, S$  Samples die jeweils unbekanntenen Anfangsbedingungen  $\mathbf{x}_{0,i}$  bestimmt, sodass sich für die „Erweiterte Methode“ die Unbekannten  $[\mathbf{p}, \mathbf{x}_{0,1}, \dots, \mathbf{x}_{0,S}]^\top$  ergeben. Eine weitere Motivation die aufgenommenen Daten in gleich große Zeitabschnitte zu teilen liegt darin,

verschiedene Versuchskonfigurationen mit dem gleichen Beinsegment miteinander zu kombinieren. Die Gültigkeit der „Erweiterte Methode“ wird in den folgenden Untersuchungen diskutiert.

	Oberschenkel ( <i>OS</i> )	Unterschenkel ( <i>US</i> )
Segmentmasse $m_i$ (in kg)	2,455	1,015
Segmentlänge $\ell_i$ (in m)	0,300	0,262
Schwerpunktsabstand $r_i$ (in m)	0,123	0,075

Tab. 1: Modellparameter aus der statischen Messung.

Mit dem beschriebenen Versuchsaufbau werden Messungen für drei Systemkonfigurationen durchgeführt: in Abschnitt 5.1 wird das Einzelpendel (Unterschenkel) ohne Antriebsstrang (alle Riemen demontiert) identifiziert; in Abschnitt 5.2 wird das Doppelpendel (gesamtes Bein) ohne Antriebsstränge identifiziert; und in Abschnitt 5.3 wird das Doppelpendel mit der Hälfte des Antriebsstrangs (nur Riemen der Stufe 2 montiert) identifiziert.

### 5.1 Einzelpendel ohne Riemen

Zunächst werden freie Schwingungen des Unterschenkels gemessen, wobei beide Riemen im Knie-Antriebsstrang demontiert sind. Da die Schwingungen nur sehr langsam abklingen, wird für das Widerstandsmoment lediglich der Parameter  $p_{R,K}$  und  $p_{D,K} = 0$  gesetzt, um ein Overfitting zu vermeiden. Die beiden Methoden („Original-Methode“ in Abb. 3 und „Erweiterte Methode“ in Abb. 4) führen zu fast identischen Systemparametern und ähnlichen Differenzen zwischen simulierten und gemessenen Zeitverläufen. Die Qualität der Identifikation wird nicht durch das zufällige Ausschneiden verschlechtert. In Abb. 4 oben sind alle verwendeten Messdatenausschnitte  $\hat{\varphi}_K$  und die entsprechenden simulierten Zeitverläufe  $\varphi_K$ , die aus den identifizierten optimalen Parametern resultieren, in grün grafisch dargestellt. Dabei gehört zu jedem gestrichelten, simulierten Verlauf eine gemessene, durchgezogene Linie. Eine beispielhafte Messung und zugehörige Simulation sind in rot und schwarz hervorgehoben. Die Abweichungen dieser beiden Verläufe sind im unteren Schaubild dargestellt.

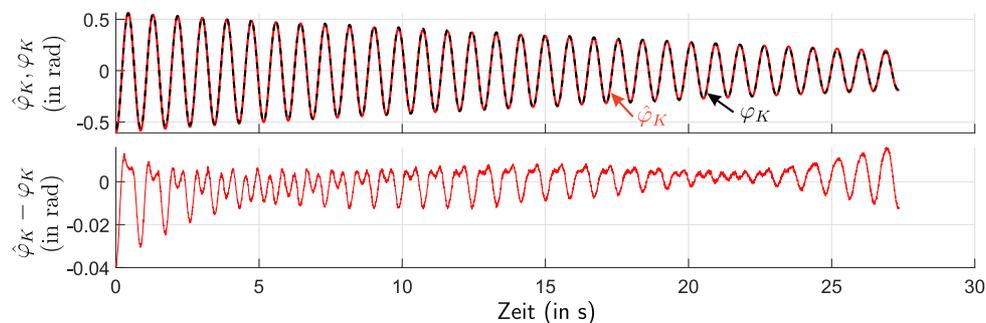


Abb. 3: Die gemessenen  $\hat{\varphi}_K$  (durchgezogene Linien) und simulierten  $\varphi_K$  (gestrichelte Linien) Zeitverläufe des Kniewinkels (oben) und deren Differenzen (unten).

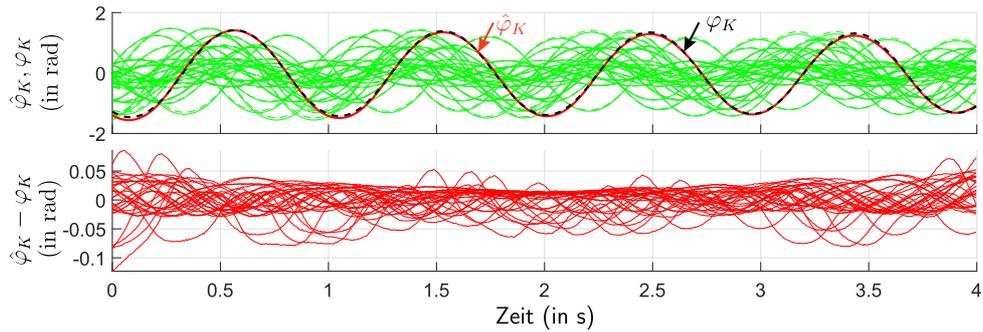


Abb. 4: Die gemessenen  $\hat{\varphi}_K$  (durchgezogene Linien) und simulierten  $\varphi_K$  (gestrichelte Linien) Zeitverläufe des Kniewinkels (oben) und deren Differenzen (unten).

## 5.2 Doppelpendel ohne Riemen

Die Komplexität des Systems wird dadurch erhöht, dass die Arretierung des Oberschenkels gelöst wird und Schwingungen des Beins als Doppelpendel untersucht werden. Dabei werden zunächst noch keine Riemen in den Antriebssträngen verwendet. Wie im vorigen Abschnitt wird nur je ein Parameter  $p_{R,H}$  bzw.  $p_{R,K}$  zur Beschreibung des Widerstandsmoments verwendet, um ein Overfitting zu verhindern. Durch Anwendung der Homotopie-Methode in „Original-Methode“ (Abb. 5) wird für die lange Messreihe gute Systemparameter identifiziert. Die „Erweiterte Methode“ in Abb. 6 verbessert den Identifikationsprozess, der kleinere Differenzen zwischen gemessenen und simulierten Daten ermittelt. Die grafische Darstellung in Abb. 6 ist analog zu Abb. 4, wobei hier zwei Messgrößen mit ihrer zugehörigen Simulation verglichen werden.

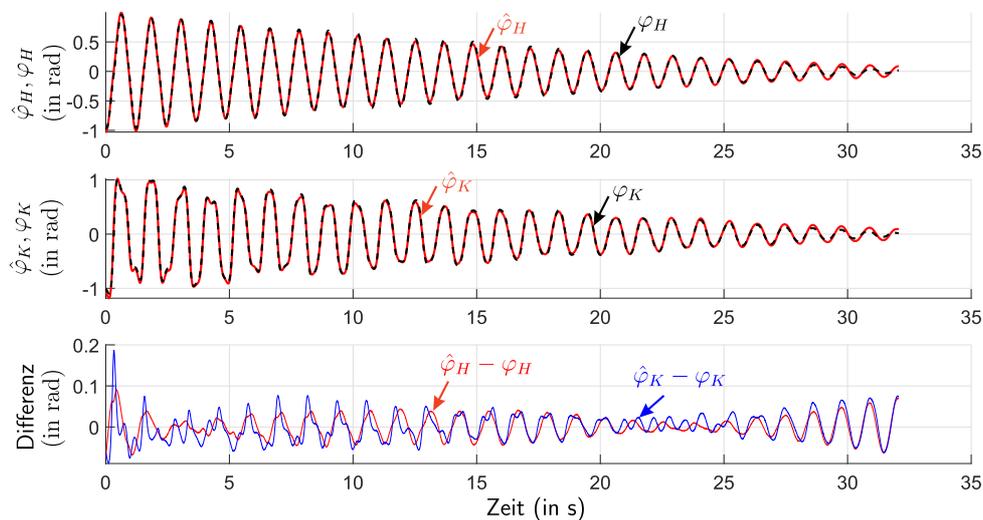


Abb. 5: Die gemessene (durchgezogene Linie) und simulierte Zeitverläufe (gestrichelte Linie) vom Hüftwinkel (Oben) und Kniewinkel (Mitte) und ihre Differenzen (Unten).

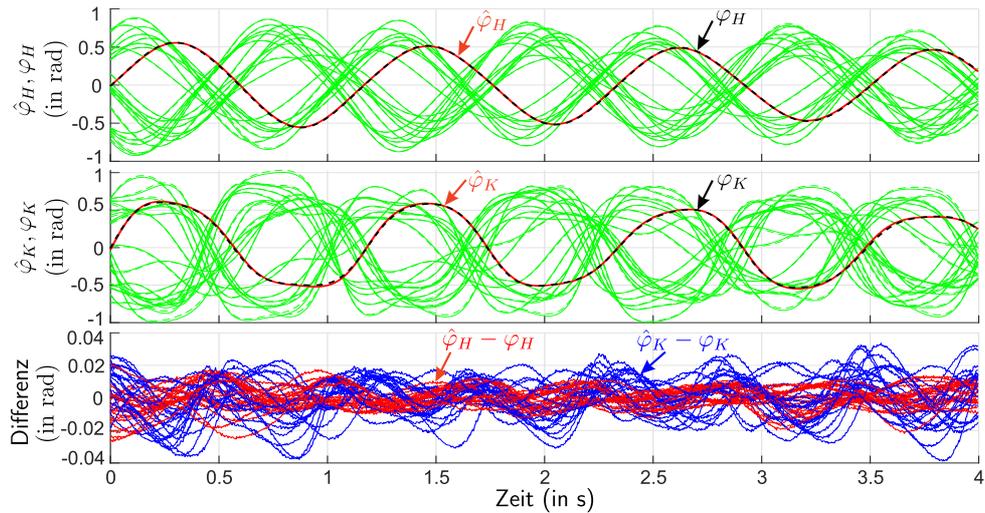


Abb. 6: Die gemessene (durchgezogene Linie) und simulierte Zeitverläufe (gestrichelte Linie) vom Hüftwinkel (Oben) und Kniewinkel (Mitte) und ihre Differenzen (Unten).

### 5.3 Doppelpendel mit Riemen

Zuletzt werden die Riemen der Stufe 2 in die beiden Antriebssträngen des Doppelpendels eingebaut, um die Komplexität weiter zu erhöhen. Da sich dadurch deutlich größere Widerstandsmomente als in den vorherigen Versuchen ergeben, werden je zwei Parameter zu deren Beschreibung verwendet, wie in (1) angegeben. Aufgrund der kürzeren Schwingungsdauern wird nur die „Erweiterte Methode“ für diese Versuchskonfiguration angewendet. Eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment der ausgeschnittenen Messreihe wird gefunden.

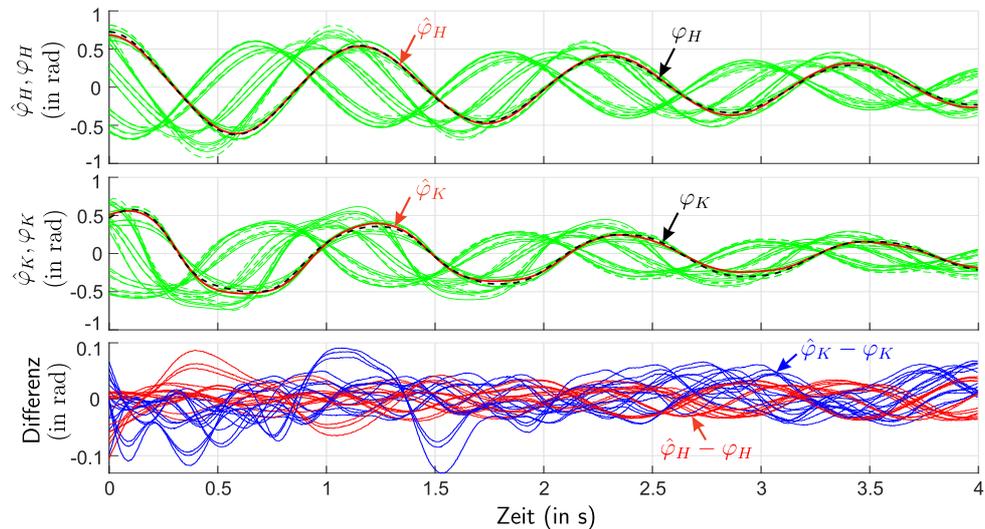


Abb. 7: Die gemessene (durchgezogene Linie) und simulierte Zeitverläufe (gestrichelte Linie) vom Hüftwinkel (Oben) und Kniewinkel (Mitte) und ihre Differenzen (Unten).

## 6 Zusammenfassung

Als Teil des Entwicklungsprozesses eines Roboterprototyps wird eine Methode zur Parameteridentifikation auf Basis einer Homotopie-Optimierungs-Methode entwickelt, um die Systemparameter experimentell zu bestimmen. Die bisher nur theoretisch beschriebene Methode wird für die praktische Anwendung dahingehend erweitert, dass mehrere Messreihen gleichzeitig verwendet werden, um eine bessere Parameterschätzung zu erzielen. Außerdem werden die benötigten Anfangsbedingungen durch die Methode mitbestimmt, ebenso wie die Sensor-Nulllage. Die ursprüngliche Methode wird also dahingehend erweitert, dass gleichzeitig zur Parameteridentifikation auch die Kalibrierung der Sensoren vorgenommen wird. Möglich ist die einfache Erweiterung der ursprünglichen Methode durch die effiziente Implementierung als Algorithmus in Julia. Die Verwendung von Standard-Packages ermöglicht hier die Herleitung symbolischer Ausdrücke für die Systemgleichungen und die spätere Berechnung von Ableitungen durch automatisches Differenzieren, womit die Verwendung des gradientenbasierten Levenberg-Marquardt-Verfahrens sehr flexibel möglich ist.

Die erweiterte Methode wird zur Parameteridentifikation eines Beins des Roboterprototyps verwendet, wobei die Elektromotoren bei der Durchführung der Experimente entkoppelt werden. Die Untersuchungen zeigen, dass die Qualität der Parameteridentifikation nicht durch mehrere ausgeschnittene Messreihen in der erweiterten Methode verschlechtert wird. Der erste Vorteil von solchen kürzeren Ausschnitten liegt daran, dass die Methode auch bei solchen Versuchen angewendet werden können, bei denen keine langen Messreihen vorhanden sind und somit die ursprüngliche Methode zu starker Streuung der zu identifizierenden Parameter führt. Der zweite Vorteil ist die Möglichkeit, die gemessenen Zeitverläufe von verschiedenen Versuchskonfigurationen mit dem gleichen Beinsegment miteinander zu kombinieren. Dadurch wird ein globales Optimierungsproblem formuliert, das alle Versuchsdaten für die Identifikation der gleichen Systemparameter berücksichtigt.

Für die beabsichtigte Verwendung der Homotopie-Optimierungs-Methode zur automatisierten Identifikation der Parameter des Roboterprototyps nach konstruktiven Veränderungen sind noch weitere Anpassungen notwendig. Eine Automatisierung der Versuchsdurchführung kann durch die Verwendung der Elektromotoren in den Antriebssträngen umgesetzt werden, wobei dann nicht mehr freie, sondern erzwungene Schwingungen des Systems betrachtet werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine genaue Modellierung des Übertragungsverhaltens der Elektromotoren, die noch nicht zur Verfügung steht. Andernfalls kann bei der Parameteridentifikation des Modells nicht unterschieden werden, ob eine geringere Beschleunigung in einem Zeitintervall durch große Massenträgheitsmomente, große Widerstandsmomente (Energiedissipation) oder kleine Motormomente verursacht wird. Zur experimentellen Charakterisierung der Elektromotoren wird in Zukunft ein separater Versuch aufgebaut. Anschließend wird die Identifikation des Gesamten Prototyps fortgesetzt.

**Förderung:** Diese Arbeit wurde durch den DFG-Grant FI 1761/4-1 | ZE 714/16-1 gefördert.

## Literatur

[1] Jimin He, Zhi-Fang Fu (2001). Modal Analysis, Boston, MA:Butterworth-Heinemann.

- [2] Abarbanel, H., Creveling, D., Farsian, R. et al. (2009). Dynamical State and Parameter Estimation. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems* 8(4), S. 1341–1381.
- [3] Nocedal, J., and Wright, S. (1999). *Numerical Optimization*. New York: Springer, S. 259–266.
- [4] Vyasarayani, C.P., Uchida, T., Carvalho, A. et al. (2011). Parameter identification in dynamic systems using the homotopy optimization approach. *Multibody System Dynamics* 26, S. 411–424.
- [5] Vyasarayani, C.P., Uchida, T., and McPhee, J. (2011). Nonlinear Parameter Identification in Multibody Systems Using Homotopy Continuation. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics* 7(1), 011012.
- [6] Bauer, F., Römer, U.J., Fidlin, A. et al. (2016). Optimal elastic coupling in form of one mechanical spring to improve energy efficiency of walking bipedal robots. *Multibody System Dynamics* 38(3), S. 227–262.
- [7] Bauer, F., Römer, U.J., Fidlin, A. et al. (2016). Optimization of energy efficiency of walking bipedal robots by use of elastic couplings in the form of mechanical springs. *Nonlinear Dynamics* 83, S. 1275–1301.
- [8] Römer, U.J., Kuhs, C., Krause, M. et al. (2016). Simultaneous optimization of gait and design parameters for bipedal robots. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 1374–1381.
- [9] Westervelt, E., Grizzle, J., and Koditschek, D. (2003). Hybrid zero dynamics of planar biped walkers. *IEEE Transactions on Automatic Control* 48(1), S. 42–56.
- [10] Sadeghian, H., Ott, C., Garofalo, G. et al. (2017). Passivity-based Control of Underactuated Biped Robots within Hybrid Zero Dynamics Approach. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 4096–4101.
- [11] Luo, Y., Römer, U.J., Zentner, L. et al. (2021). Improving energy efficiency of a bipedal walker with optimized nonlinear elastic coupling. *NODYCON conference proceedings series*. (zur Veröffentlichung angenommen)
- [12] Luo, Y., Römer, U.J., Zirkel, M. et al. (2021). Design of a robot prototype to investigate and improve bipedal walking efficiency. 1st International Conference on Machine Design. (eingereicht)
- [13] Christine, C., Abba, G., Aoustin, Y. et al. (2003). RABBIT: A testbed for advanced control theory. *IEEE Control Systems Magazine* 23(5), S. 57–79.
- [14] Grizzle, J.W., Hurst, J., Morris, B. et al. (2009). MABEL, a new robotic bipedal walker and runner. 2009 American Control Conference, S. 2030–2036.
- [15] Hubicki, C., Grimes, J., Jones, M. et al. (2016). ATRIAS: Design and validation of a tether-free 3D-capable spring-mass bipedal robot. *The International Journal of Robotics Research* 35(12), S. 1497–1521.