

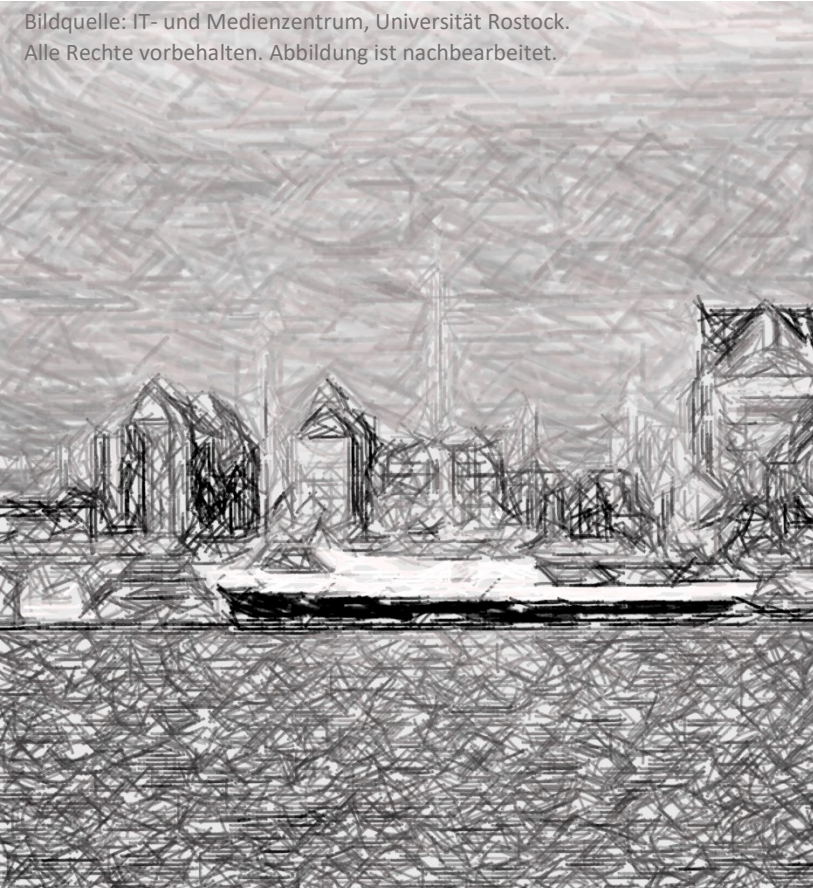


10. IFToMM D-A-CH

Konferenz 2024

05./06. März 2024, Universität Rostock

Bildquelle: IT- und Medienzentrum, Universität Rostock.
Alle Rechte vorbehalten. Abbildung ist nachbearbeitet.



Biomechanische Systeme
Kinematische Analyse und Synthese
Getriebetechnik
Regelung von Mechanismen und Maschinen
Mikromechanische Systeme
Mehrkörpersysteme
Sicherheit und Zuverlässigkeit
Robotik und Mechatronik
Rotordynamik
Nachhaltigkeit, Ressourcen- und
Energieeffizienz
Fahrzeug- und Transportsysteme
Tribologie
Schwingungstechnik und Maschinendynamik
Nachgiebige Mechanismen

IFToMM D-A-CH Konferenz 2024

der IFToMM Member Organizations
Austria, Germany, Switzerland

05.-06. März 2024, Rostock, Deutschland

TAGUNGSBAND

Organisation

Lokale Organisation:

Christoph Woernle
Jens Falkenstein

Dachorganisation und Veranstalter:

IFToMM Member Organizations Austria, Germany, Switzerland

Komitee:

- Maik Berger, TU Chemnitz
- Torsten Bertram, TU Dortmund
- Bertold Bongardt, TU Braunschweig
- Torsten Brix, TU Ilmenau
- Tobias Bruckmann, Universität Duisburg-Essen
- Burkhard Corves, RWTH Aachen
- Francisco Geu Flores, Universität Duisburg-Essen
- Mathias Hüsing, RWTH Aachen
- Manfred Husty, Universität Innsbruck
- Andrés Kecskeméthy, Universität Duisburg-Essen
- Jörn Malzahn, Neura Robotics GmbH
- Martin Pfurner, Universität Innsbruck
- Georg Rauter, Universität Basel
- Ulrich Römer, Karlsruher Institut für Technologie
- Jan Sender, Fraunhofer IGP, Rostock
- Jürg Schiffmann, EPFL Lausanne
- Andreas Scholz, Universität Magdeburg
- Lena Zentner, TU Ilmenau

Publications Chair:

- Tobias Bruckmann, Universität Duisburg-Essen

Publicity and Technical Chair:

- Mathias Hüsing, RWTH Aachen

Impressum

Zehnte IFToMM D-A-CH Konferenz 2024: 05.-06. März 2024, Universität Rostock.

2024

ISBN 979-3-940402-67-7

DOI [10.17185/dupublico/81581](https://doi.org/10.17185/dupublico/81581)

Herausgeber: Universität Duisburg-Essen

Veröffentlichende Institution:
Universität Duisburg-Essen
Universitätsbibliothek, DuEPublico
Universitätsstraße 9-11
45141 Essen
<https://dupublico2.uni-due.de>

© 2024 Die Autorinnen und Autoren.

Es gelten die in den einzelnen Tagungsbeiträgen genannten Rechte/Lizenzen.

Vorwort

Mehr als 45 Teilnehmerinnen und Teilnehmer trafen sich am 5. und 6. März 2024 in Rostock auf der 10. IFToMM D-A-CH Konferenz. Die International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science, kurz IFToMM, ist eine der größten internationalen Vereinigungen im Bereich der theoretischen und praktischen Erforschung von Mechanismen und Maschinen. Deutschland, Österreich und die Schweiz haben traditionell stets eine aktive Rolle auf allen Ebenen der Forschungsgebiete der IFToMM eingenommen.

Die Konferenz bietet vor allem jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus dem deutschsprachigen Raum eine Plattform, auf der sie in kollegialer Atmosphäre ihre Forschungsergebnisse präsentieren und diskutieren können. Die Beiträge der diesjährigen Veranstaltung kamen unter anderem aus den Bereichen Robotik, Mehrkörperdynamik, Biomechanik sowie Anwendungen von künstlicher Intelligenz und neuronalen Netzen in mechatronischen Systemen.

Flankiert wurde das Vortragsprogramm durch eine Besichtigung des Fraunhofer-Instituts für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP in Rostock. Die Tagungsleiter danken Prof. Wilko Flügge und Prof. Jan Sender für die Möglichkeit, die Konferenz in Räumen des Fraunhofer IGP durchführen zu können.

Jens Falkenstein

Christoph Woernle



Programm 10. IFToMM D-A-CH Konferenz 2024

Tag 1: Dienstag, 05.03.2024		
Fraunhofer IGP, Albert-Einstein-Straße 30, 18059 Rostock		
8:15	8:30	Registrierung
8:45	9:00	Begrüßung (Christoph Woernle, Jan Sender)
9:00	10:40	David Herrmann, Leon Schaeffer, Lukas Schmitt, Wolfgang Körber, Lukas Merker, Lena Zentner und Valter Böhm Design, test and comparison of two manipulators based on compliant tensegrity-structures Malte Grube und Robert Seifried Einige Aspekte zur Steuerung von Softrobotern Erik Hildebrandt, Vinzenz Birr und Christoph Woernle Aktive Dämpfung von Lastpendelschwingungen bei automatisierten Mehrseil-Krananlagen durch lineare Zustandsrückführung Patrick Gust, Christian Hürten, Roland Boumann und Tobias Bruckmann Methoden des maschinellen Lernens als Notfallstrategie nach Seilrissen bei parallelen Seilrobotern Markus Huber, Simon Laudahn, Franz Irlinger und Tim Lüth Einsatzmöglichkeit eines Low-Cost Roboters in der Lehre am Beispiel der Denavit-Hartenberg-Konvention
Session 1: Robotik		
Leitung: Martin Pfunner		
10:40	11:10	Kaffeepause
11:10	12:30	Simon Schläger, Sören Walther, Mathias Hüsing und Burkhard Corves Eine Erweiterung für die konsistente Implementierung von Sensorik und Wahrnehmung im Plansys2 Framework Heiko Renz und Torsten Bertram Effiziente Berechnung eines voxelbasierten Umgebungsmodells für eine echtzeitfähige Informationsverteilung in der Robotik Sophie Charlotte Keunecke, Shuai Qiao, Mathias Hüsing und Burkhard Corves Intelligente Fertigung 4.0: Digitale Zwillinge, Autonome Roboter und Anomalieerkennung im Fokus der Zukunftstechnologien Jan Wiartalla, Markus Schmitz, Mark Witte, Ruben Grunau, Wilko Natzel, Burkhard Corves, Mathias Huesing und Georg Jacobs Realisierung eines funktional determinierten Produktentstehungsprozesses für die roboterbasierte additive Fertigung
Session 2: Robotik		
Leitung: Ulrich Römer		
12:30	13:20	Mittag vor Ort
13:20	14:40	Steffen Dryba, Alexander Jentsch, Wilko Flüge und Jan Sender Großrobotik in der maritimen Fertigung Jan Sender, Alexander Zych, Steffen Dryba und Wilko Flüge Planung von Robotersystemen im Schiffbau Erik Möllmann, Michael Bühren und Tobias Bruckmann Analytische Bestimmung der Handlingart für die Konzeptfindung von automatischen Be- und Entladeprozessen von Einzelpackstücken Jonathan Uihlein, Manuel Schulz, Timo Hufnagel und Dieter Schramm Assembly concept for lithium-ion cells and its gripping system
Session 3: Robotik		
Leitung: Jan Sender		
14:40	15:00	Kaffeepause
Fortsetzung nächste Seite		



Fortsetzung Tag 1		
15:00	16:20	<p>Daniel Huczala, Martin Pfulner und Hans-Peter Schröcker Python-based Toolbox for Generating Rational Single-loop Linkages</p> <p>Karsten Gerlach und Maik Berger Verifikation einer Methodik zur Bestimmung von Bewegungsaufgaben für Fadenlängenkompensationseinheiten an Textilmaschinen</p> <p>Marten Zirkel, Yinnan Luo, Ulrich Römer, Alexander Fidlin und Lena Zentner Bestimmung der natürlichen Krümmung eines Balkens für eine bestimmte charakteristische Kennlinie mit Hilfe Neuronaler Netze</p> <p>Peter Krönes, Adrian Brune und Lars Mikelsons Design and Optimization of a Steering Geometry for a Micromobility Vehicle</p>
<p>Session 4: Mechanismen</p> <p>Leitung: Francisco Geu Flores</p>		
16:20	17:50	Besichtigung Fraunhofer IGP

Tag 2: Mittwoch, 06.03.2024 Fraunhofer IGP, Albert-Einstein-Straße 30, 18059 Rostock		
8:25	8:30	Eröffnung Tag 2
8:30	10:10	<p>Fabian Finkbeiner, Timo Hufnagel und Tobias Bruckmann Dynamic modeling of closed loop mechanism based on URDF description</p> <p>Marc Guillem Zamora Agustí und Andrés Kecskeméthy Einschätzung der Wahrscheinlichkeit von reibungsinduzierten selbsterregten Vibrationen in Achterbahnfahrten</p> <p>Jeffrey Stegink, Wintermeyer-Kallen Thorben, Andreas Klein, Julia Kersten, Reik Bockhahn, Maximilian Basler, Dirk Abel und Janos Zierath Anforderung und Durchführung von Feldtest an realen Windenergieanlagen mit moderner Regelung</p> <p>Thomas Knobloch, Luca Freiwald, Mathias Hüsing und Burkhard Corves Eine integrierte Anwendung zur Untersuchung energieeffizienter, ungleichmäßig übersetzender Getriebe</p> <p>Nils Brückmann, Christian Mirz, Mathias Hüsing und Burkhard Corves Interaktive Lehre von Maschinendynamik mit Jupyter Notebooks</p>
<p>Session 5: Dynamik</p> <p>Leitung: Andreas Scholz</p>		
10:10	10:30	Kaffeepause
10:30	12:10	<p>Yinnan Luo, Ulrich J. Römer, Marten Zirkel, Lena Zentner und Alexander Fidlin Optimierte Energieeffizienz des zweibeinigen Gehens auf nachgiebigem Untergrund durch elastische Kopplung</p> <p>Paul Henke, Johanna Meier, Leo Ruehrmund, Saskia Brendle, Sven Krueger, Thomas Grupp, Christoph Woernle, Christoph Lutter, Rainer Bader und Maeruan Kebbach Generierung eines muskuloskelettalen Mehrkörpermodells des Tibiofemoralgelenks basierend auf experimentellen Untersuchungen am Humanpräparat mittels 6-Freiheitsgrad Gelenksimulator</p> <p>Leon Schaeffer, David Herrmann, Theresa Schmausser, Melanie Liebrecht, Felix Rambach und Valter Böhm Theoretical studies on a new type of dynamic hand orthosis</p> <p>Sebastian Kurz und Harold Schreiber Entwicklung einer Handprothese hinsichtlich verbesserter Nachbildung der natürlichen Bewegung</p> <p>Maximilian Schmitz, Thomas Neff und Lena Zentner Identifikation von Lösungsräumen ergonomischer Anforderungen an das Fahrzeugmaßkonzept in der frühen Fahrzeugkonzeptphase</p>
<p>Session 6: Biomechanik, Ergonomie</p> <p>Leitung: Georg Rauter</p>		
12:10	12:20	Verabschiedung (Christoph Woernle)

Beiträge

- Herrmann, David; Schaeffer, Leon; Schmitt, Lukas; Körber, Wolfgang; Merker, Lukas;
Zentner, Lena; Böhm, ValterSeite 7
Design, Erprobung und Vergleich von zwei Manipulatoren auf Basis von nachgiebigen Tensegrity-Strukturen
DOI: [10.17185/dupublico/81587](https://doi.org/10.17185/dupublico/81587)
- Grube, Malte; Seifried, Robert Seite 9
Einige Aspekte zur Steuerung von Softrobotern
DOI: [10.17185/dupublico/81611](https://doi.org/10.17185/dupublico/81611)
- Hildebrandt, Erik; Birr, Vinzenz; Woernle, Christoph..... Seite 11
Aktive Dämpfung von Lastpendelschwingungen bei automatisierten Mehrseil-Krananlagen durch lineare Zustandsrückführung
DOI: [10.17185/dupublico/81589](https://doi.org/10.17185/dupublico/81589)
- Gust, Patrick; Hürten, Christian; Boumann, Roland; Bruckmann, Tobias Seite 12
Methoden des maschinellen Lernens als Notfallstrategie nach Seilrissen bei parallelen Seilrobotern
DOI: [10.17185/dupublico/81705](https://doi.org/10.17185/dupublico/81705)
- Huber, Markus; Laudahn, Simon; Parhofer, Christoph; Irlinger, Franz; Lüth, Tim Seite 19
Einsatzmöglichkeit eines Low-Cost Roboters in der Lehre am Beispiel der Denavit-Hartenberg-Konvention
DOI: [10.17185/dupublico/81588](https://doi.org/10.17185/dupublico/81588)
- Schläger, Simon; Walther, Sören; Hüsing, Mathias; Corves, Burkhard..... Seite 23
Eine Erweiterung für die konsistente Implementierung von Sensorik und Wahrnehmung im Plansys2 Framework
DOI: [10.17185/dupublico/81692](https://doi.org/10.17185/dupublico/81692)
- Renz, Heiko; Bertram, Torsten Seite 25
Effiziente Berechnung eines voxelbasierten Umgebungsmodells für eine echtzeitfähige Informationsverteilung in der Robotik
DOI: [10.17185/dupublico/81614](https://doi.org/10.17185/dupublico/81614)
- Keunecke, Sophie Charlotte; Qiao, Shuai; Hüsing, Mathias; Corves, Burkhard Seite 27
Intelligente Fertigung 4.0: Digitale Zwillinge, Autonome Roboter und Anomalieerkennung im Fokus der Zukunftstechnologien
DOI: [10.17185/dupublico/81612](https://doi.org/10.17185/dupublico/81612)
- Witte, Mark; Schmitz, Markus; Grunau, Ruben; Wiartalla, Jan; Corves, Burkhard; Hüsing, Mathias;
Natzel, Wilko; Zerwas, Thilo; Nehring-Wirxel, Julius; Kobbelt, Leif Seite 30
Realisierung eines funktional determinierten Produktentstehungsprozesses für die roboterbasierte additive Fertigung
DOI: [10.17185/dupublico/81584](https://doi.org/10.17185/dupublico/81584)
- Dryba, Steffen; Jentsch, Alexander; Flügge, Wilko; Sender, Jan Seite 38
Großrobotik in der maritimen Fertigung
DOI: [10.17185/dupublico/81690](https://doi.org/10.17185/dupublico/81690)
- Sender, Jan; Zych, Alexander; Dryba, Steffen; Flügge, Wilko Seite 40
Planung von Robotersystemen im Schiffbau
DOI: [10.17185/dupublico/81616](https://doi.org/10.17185/dupublico/81616)

- Möllmann, Erik; Bühnen, Michael; Bruckmann, Tobias Seite 42
Analytische Bestimmung der Handlingart für die Konzeptfindung von automatischen Be- und Entladeprozessen von Einzelpackstücken
 DOI: [10.17185/dupublico/81696](https://doi.org/10.17185/dupublico/81696)
- Uihlein, Jonathan; Schulz, Manuel; Hufnagel, Timo; Schramm, Dieter Seite 45
Montagekonzept für Lithium-Ionen-Zellen und dessen Greifsystem
 DOI: [10.17185/dupublico/81583](https://doi.org/10.17185/dupublico/81583)
- Huczala, Daniel; Pfüner, Martin; Schröcker, Hans-Peter Seite 47
Python-based Toolbox for Generating Rational Single-loop Linkages
 DOI: [10.17185/dupublico/81656](https://doi.org/10.17185/dupublico/81656)
- Gerlach, Karsten; Berger, Maik Seite 49
Verifikation einer Methodik zur Bestimmung von Bewegungsaufgaben für Fadenlängenkompensationseinheiten an Textilmaschinen
 DOI: [10.17185/dupublico/81691](https://doi.org/10.17185/dupublico/81691)
- Zirkel, Marten; Luo, Yinnan; Römer, Ulrich; Fidlin, Alexander; Zentner, Lena Seite 52
Bestimmung der natürlichen Krümmung eines Balkens für eine bestimmte charakteristische Kennlinie mit Hilfe Neuronaler Netze
 DOI: [10.17185/dupublico/81585](https://doi.org/10.17185/dupublico/81585)
- Krönes, Peter; Brune, Adrian; Mikelsons, Lars Seite 54
Design and Optimization of a Steering Geometry for a Micromobility Vehicle
 DOI: [10.17185/dupublico/81695](https://doi.org/10.17185/dupublico/81695)
- Finkbeiner, Fabian; Hufnagel, Timo; Bruckmann, Tobias Seite 59
Dynamische Modellierung geschlossener kinematischer Ketten anhand von URDF-Beschreibungen
 DOI: [10.17185/dupublico/81610](https://doi.org/10.17185/dupublico/81610)
- Zamora Agustí, Marc Guillem; Kecskeméthy, Andrés Seite 61
Einschätzung der Wahrscheinlichkeit von reibungsinduzierten selbsterregten Vibrationen in Achterbahnfahrten
 DOI: [10.17185/dupublico/81657](https://doi.org/10.17185/dupublico/81657)
- Stegink, Jeffrey; Wintermeyer-Kallen, Thorben; Klein, Andreas; Kersten, Julia; Bockhahn, Reik; Machost, Dirk; Basler, Maximilian; Abel, Dirk; Zierath, Janos Seite 67
Anforderung und Durchführung von Feldtests an realen Windenergieanlagen mit moderner Regelung
 DOI: [10.17185/dupublico/81698](https://doi.org/10.17185/dupublico/81698)
- Knobloch, Thomas; Freiwald, Luca; Hüsing, Mathias; Corves, Burkhard Seite 69
Eine integrierte Anwendung zur Untersuchung energieeffizienter, ungleichmäßig übersetzender Getriebe
 DOI: [10.17185/dupublico/81613](https://doi.org/10.17185/dupublico/81613)
- Brückmann, Nils; Mirz, Christian; Hüsing, Mathias; Corves, Burkhard Seite 76
Interaktive Lehre von Maschinendynamik mit Jupyter Notebooks
 DOI: [10.17185/dupublico/81605](https://doi.org/10.17185/dupublico/81605)
- Luo, Yinnan; Römer, Ulrich J.; Zirkel, Marten; Zentner, Lena; Fidlin, Alexander Seite 78
Optimierte Energieeffizienz des zweibeinigen Gehens auf nachgiebigem Untergrund durch elastische Kopplung
 DOI: [10.17185/dupublico/81582](https://doi.org/10.17185/dupublico/81582)

Henke, Paul; Meier, Johanna; Ruehrmund, Leo; Brendle, Saskia; Krueger, Sven; Grupp, Thomas M.;
Woernle, Christoph; Lutter, Christoph; Bader, Rainer; Kebbach, Maeruan Seite 80
*Generierung eines muskuloskelettalen Mehrkörpermodells des Tibiofemoralgelenks basierend auf
experimentellen Untersuchungen am Humanpräparat mittels 6-Freiheitsgrad Gelenksimulator*
DOI: [10.17185/dupublico/81693](https://doi.org/10.17185/dupublico/81693)

Schaeffer, Leon; Herrmann, David; Schmausser, Theresa; Liebrecht, Melanie; Rambach, Felix;
Böhm, Valter Seite 82
Theoretische Untersuchungen zu einer neuartigen Handorthese
DOI: [10.17185/dupublico/81586](https://doi.org/10.17185/dupublico/81586)

Kurz, Sebastian; Schreiber, Harold Seite 85
Entwicklung einer Handprothese hinsichtlich verbesserter Nachbildung der natürlichen Bewegung
DOI: [10.17185/dupublico/81615](https://doi.org/10.17185/dupublico/81615)

Design, Erprobung und Vergleich von zwei Manipulatoren auf Basis von nachgiebigen Tensegrity-Strukturen

Design, test and comparison of two manipulators based on compliant tensegrity-structures

David Herrmann, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, david.herrmann@st.oth-regensburg.de

Leon Schaeffer, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, leon.schaeffer@oth-regensburg.de

Lukas Schmitt, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, lukas.schmitt@st.oth-regensburg.de

Wolfgang Körber, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, wolfgang.koerber@st.oth-regensburg.de

Lukas Merker, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, 98693 Ilmenau, lukas.merker@tu-ilmenau.de

Lena Zentner, TU Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, 98693 Ilmenau, lena.zentner@tu-ilmenau.de

Valter Böhm, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, valter.boehm@oth-regensburg.de

Kurzfassung

Die Entwicklung von Robotern, basierend auf nachgiebigen Tensegrity-Strukturen, ist insbesondere unter dem Themengebiet „Soft Robotics“ ein aktuelles Forschungsthema [1–3]. Der Einsatz von diesen mechanisch vorgespannten nachgiebigen Strukturen ermöglicht es, die Systemsteifigkeit gezielt und gegebenenfalls reversibel variabel einzustellen. Die daraus resultierende Formänderung kann nur durch wenige Aktuatoren realisiert werden, was die Systemkomplexität reduziert. Zudem ermöglichen in weichen Robotern eingesetzte Tensegrity-Strukturen mehrere vorteilhafte Eigenschaften wie z. B. Faltbarkeit/Entfaltbarkeit, geringe Masse, hohes Festigkeits-Gewichts-Verhältnis und stoß-dämpfende Fähigkeiten [4]. Die in diesem Zusammenhang eingesetzten Tensegrity-Strukturen bestehen aus einer Reihe von getrennten starren Drucksegmenten, die mit einem kontinuierlichen Netz von Zugsegmenten verbunden sind. Die Form dieser Strukturen wird durch die Vorspannung des Systems bestimmt. Aktuelle Arbeiten konzentrieren sich auf die Entwicklung von mobilen Robotern [5–10] und Manipulatoren, die auf diesen Strukturen basieren [11–13]. Diese Arbeit legt den Fokus auf den Bereich Manipulatoren.

Bei der Entwicklung von Tensegrity-Manipulatoren kann in planare und räumliche unterschieden werden [13]. Bei der Realisierung von räumlichen Tensegrity-Manipulatoren werden zwei Konstruktionsprinzipien verwendet: entweder ein modularer Aufbau, der auf Modulen mit identischer Topologie basiert oder der Einsatz eines spezifischen Designs für jedes einzelne funktionale Systemteil [11, 14, 15]. Das Design der meisten bekannten räumlichen Tensegrity-Manipulatoren basiert auf einer Kaskadierung von gleichartigen Modulen, die nach dem Tensegrity-Prinzip identisch miteinander verbunden werden. Die elementaren Einheiten sind entweder selbst konventionelle Tensegrity-Strukturen oder einteilige planare bzw. räumliche Strukturen. In klassischen Tensegrity-Manipulatoren werden starre Drucksegmente und nicht elastische Zugsegmente verwendet. Die Formänderung dieser Systeme wird durch Änderung der Längen ausgewählter Zugsegmente realisiert und ist durch die Geometrie sowie Verbindung der Module untereinander begrenzt. Aufgrund ihrer komplexen räumlichen Geometrie und der großen Anzahl von Spanngliedern, die diese Module miteinander verbinden, ist die Formänderungsfähigkeit der bekannten Systeme limitiert. Durch die Verwendung planarer Module in 3D-Tensegrity-Manipulatoren kann der Bewegungsbereich potenziell vergrößert werden. Außerdem können die Konstruktion und die Aktuierung einfach gehalten werden.

Aufgrund dieser vorteilhaften Eigenschaften werden in diesem Beitrag zwei nachgiebige Tensegrity-Manipulatoren auf der Basis von planaren, auf Druck belasteten, X-Modulen gegenübergestellt. Das Design der Manipulatoren und die Topologie sind inspiriert von der Skulptur „Early X-Piece“ von Kenneth Snelson aus dem Jahr 1948 [16] und wurden in früheren Arbeiten [17] für den Einsatz als Gelenk in einem Manipulator charakterisiert. Die Aktuierung der Systeme wird durch die Längenänderung ausgewählter aktiver Zugsegmente induziert. Die Vorspannung wird durch intrinsisch nachgiebige passive Zugsegmente garantiert und eingestellt. Ausgehend von grundlegenden theoretischen Überlegungen zur Topologie, zur Konnektivität der Elemente und zur Kinematik der individuellen X-Module werden diese Erkenntnisse auf kaskadierte Strukturen übertragen und deren resultierende Gesamtkinematik theoretisch verglichen. Weiterhin wird das Systemverhalten für quasi-statische Anwendungsfälle mittels eines inkrementellen-iterativen Verfahrens auf Basis der Finite-Element-Methode [18, 19] beschrieben. Anschließend wird das Design mit zwei unterschiedlichen Aktuierungsvarianten vorgestellt. Die theoretischen Erkenntnisse werden mittels Demonstratoren der beiden Varianten durch bildgebende Verfahren experimentell verifiziert und deren Vor- und Nachteile diskutiert. Abschließend werden Weiterentwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Literatur

- [1] Liu, Y., Bi, Q., Yue, X., Wu, J., Yang, B. & Li, Y. A review on tensegrity structures-based robots. *Mechanism And Machine Theory*. 168, S. 104571, 2022. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104571.
- [2] Gomez-Jauregui, V., Carrillo-Rodriguez, A., Machado, C. & Lastra-Gonzalez, P. Tensegrity Applications to Architecture, Engineering and Robotics: A Review. *Applied Sciences*. 13, 2023. doi: 10.3390/app13158669.
- [3] Böhm, V., Schorr, P., Schale, F., Kaufhold, T., Zentner, L. & Zimmermann, K. Worm-Like Mobile Robot Based on a Tensegrity Structure. *2021 IEEE 4th International Conference On Soft Robotics (RoboSoft)*. S. 358-363, 2021. doi: 10.1109/RoboSoft51838.2021.9479193.
- [4] Rieffel, J. & Mouret, J. Adaptive and Resilient Soft Tensegrity Robots. *Soft Robotics*. 5, S. 318-329, 2018. doi: 10.1089/soro.2017.0066.
- [5] Vespignani, M., Friesen J. M., SunSpiral V. & Bruce J., Design of SUPERball v2, a Compliant Tensegrity Robot for Absorbing Large Impacts. *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. S. 2865-2871, 2018. doi: 10.1109/IROS.2018.8594374.
- [6] Lu, Y., Xu, X. & Luo, Y. Path Planning for Rolling Locomotion of Polyhedral Tensegrity Robots Based on Dijkstra Algorithm. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. Jg. 60, Nr. 4, S.273-286, 2019. ISSN: 1996-9015. doi: 10.20898/j.iass.2019.202.037.
- [7] Kim K., Agogino A. K. & Agogino A. M. Rolling Locomotion of Cable-Driven Soft Spherical Tensegrity Robots. *Soft robotics*. Jg. 7, Nr. 3, S. 346-361, 2020. doi: 10.1089/soro.2019.0056.
- [8] Shintake, J., Zappetti, D., Peter, T., Ikemoto, Y. & Floreano, D., Bio-inspired Tensegrity Fish Robot. *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. S. 2887-2892, 2020. ISBN: 2577-087X. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9196675.
- [9] Schorr, P., Schale, F., Otterbach, J. M., Zentner, L., Zimmermann, K. & Boehm, V., Investigation of a Multistable Tensegrity Robot applied as Tilting Locomotion System. *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. S. 2932-2938, 2020. ISBN: 978-1-7281-7395-5. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9196706.
- [10] Boehm, V., Schorr, P., Schale, F., Kaufhold, T., Zentner, L. und Zimmermann, K., Worm-Like Mobile Robot Based on a Tensegrity Structure. *2021 IEEE 4th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)* S. 358-363, 2021. doi: 10.1109/RoboSoft51838.2021.9479193.
- [11] Lessard, S., Castro, D., Asper, W. u. a., A bio-inspired tensegrity manipulator with multi-DOF, structurally compliant joints. /em 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). S. 5515-5520, 2016, ISBN: 978-1-5090-3762-9. doi: 10.1109/IROS.2016.7759811.
- [12] Fadeyev, D., Zhakatajev, A., Kuzdeuov, A. & Varol, H. A., Generalized Dynamics of Stacked Tensegrity Manipulators. *IEEE Access*. Jg. 7, S. 63472-63484, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2916681.
- [13] Fasquelle, B., Furet, M., Khanna, P., Chablat, D., Chevallereau, C. & Wenger, P., A bio-inspired 3-DOF light-weight manipulator with tensegrity X-joints. *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. S. 5054-5060, 2020. ISBN: 978-1-7281-7395-5. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9196589.
- [14] Jung, E., Ly, V., Cessna, N., Ngo, M., Castro, D., SunSpiral, V. & Teodorescu, M. Bio-Inspired Tensegrity Flexural Joints. *2018 IEEE International Conference On Robotics And Automation (ICRA)*. S. 5561-5566, 2018, doi: 10.1109/ICRA.2018.8461027.
- [15] Li, W., Nabae, H., Endo, G. & Suzumori, K. New Soft Robot Hand Configuration With Combined Bio-tensegrity and Thin Artificial Muscle. *IEEE Robotics And Automation Letters*. 5, 4345-4351, 2020. doi: 10.1109/LRA.2020.2983668.
- [16] Snelson, K. Art and Ideas, 2013. <http://kennethsnelson.net/>.
- [17] Herrmann, D., Schaeffer, L., Zentner, L. & Böhm, V., Theoretical considerations on 3D tensegrity joints for the use in manipulation systems. *Engineering for a Changing World: Proceedings*. 60th ISC, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, September 04-08, 2023, Ilmenau, 2023. doi: 10.22032/dbt.58888.
- [18] Böhm, V., Sumi, S., Kaufhold, T. & Zimmermann, K. Compliant multistable tensegrity structures. *Mechanism And Machine Theory*. 115, S. 130-148, 2017. ISSN: 0094-114X. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.04.013.
- [19] Zhang, L., Li, Y., Cao, Y. & Feng, X. Stiffness matrix based form-finding method of tensegrity structures. *Engineering Structures*. 8, S. 36-48, 2014. ISSN: 0141-0296. doi: 10.1016/j.engstruct.2013.10.014.

Einige Aspekte zur Steuerung von Softrobotern

Some Aspects on the Control of Soft Robots

Malte Grube, Technische Universität Hamburg, Institut für Mechanik und Meerestechnik, Deutschland, malte.grube@tuhh.de;

Prof. Robert Seifried, Technische Universität Hamburg, Institut für Mechanik und Meerestechnik, Deutschland, robert.seifried@tuhh.de

Kurzfassung

Softroboter sind ein aufstrebendes und schnell wachsendes Forschungsgebiet mit potenziellen Anwendungen in verschiedenen Bereichen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Robotern, die aus starren Materialien wie Stahl bestehen, werden Softroboter aus weichen Materialien wie Silikon mit einer Steifigkeit von $10^4 \dots 10^9$ Pa hergestellt. Dies führt zu großen Verformungen, die neue Modellierungsmethoden und Regelungs- und Steuerungskonzepte erfordern. In der Softrobotik haben dabei Steuerungsverfahren eine besondere Bedeutung, da die Integration von Sensoren, die für die Regelung benötigt werden, aufgrund des weichen Aufbaus und der großen auftretenden Verformungen oft aufwändig ist.

In der Softrobotik wird zwischen sogenannten kinematischen und dynamischen Regelungs- und Steuerungsverfahren unterschieden. Kinematische Verfahren vernachlässigen die Dynamik des Softroboters und betrachten diesen quasistatisch, dynamische Verfahren berücksichtigen die Dynamik. Bisher werden in der Soft-Robotik hauptsächlich kinematische Regelungs- und Steuerungsverfahren eingesetzt. Vor allem datenbasierte Verfahren und Verfahren, die auf datenbasierten Modellen basieren, sind sehr verbreitet. Mit ihnen lassen sich Effekte aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten und unbekanntem Materialeigenschaften leicht kompensieren. Fortgeschrittene Anwendungen von Softrobotern erfordern jedoch immer schnellere und genauere Bewegungen. Hier reichen kinematische Steuerungen nicht aus, da die Dynamik des Softroboters nicht vernachlässigt werden kann [1].

In diesem Beitrag werden verschiedene Steuerungskonzepte für die Trajektorienverfolgung mit Softrobotern vorgestellt. Die verschiedenen Ansätze werden dabei sowohl in der Simulation als auch im Experiment verglichen. Der dafür verwendete Softroboter ist in Abb. 1 dargestellt. Er mittels Sehnen von drei Servos aktuiert. Für Referenzmessungen wird ein optisches Kameratrackingsystem auf Basis von AprilTags verwendet.

In Abb. 2 ist exemplarisch die Trajektorienverfolgung einer dreieckigen Trajektorie mit einer kinematischen und einer dynamischen Steuerung im Experiment gezeigt. Die kinematische Steuerung basiert auf der mittels Neuronalen Netzen gelernten inversen Kinematik des Softroboters. Die dynamische Steuerung verwendet eine Kombination aus einer datenbasierten inversen Kinematik und der Modellinversion der Dynamik mittels Servobindungen. Für langsame Bewegungen, hier mit einer Periodendauer für einen Umlauf um das Dreieck von $T = 5$ s, kann bereits mit einem kinematischen Regler ein sehr gutes Ergebnis erzielt werden. Für schnelle Bewegungen, hier mit einer Periodendauer von $T = 1$ s, ist die kinematische Steuerung hingegen ungeeignet, diese kann der Trajektorie nicht folgen. Dies kann damit erklärt werden, dass hier die aus der Dynamik resultierenden Kräfte gegenüber den aus der Kinematik resultierenden Kräften nicht mehr vernachlässigbar klein sind. Mit der dynamischen Steuerung können jedoch auch für schnelle Bewegungen gute Ergebnisse erzielt werden.

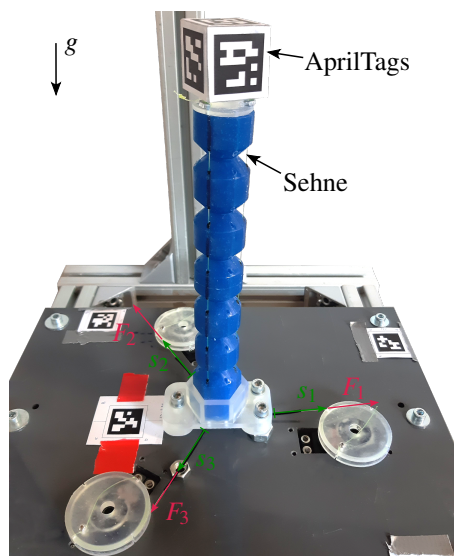


Bild 1 Softroboter.

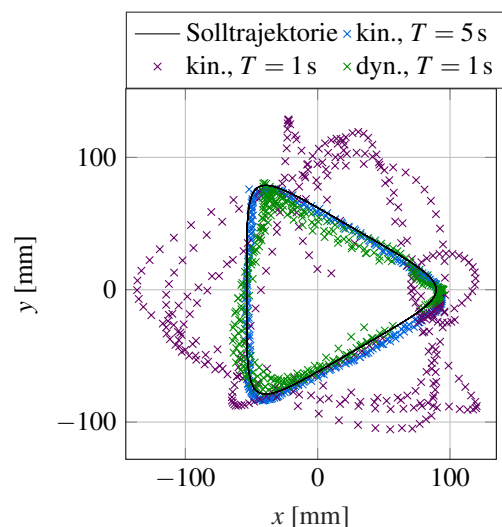


Bild 2 Trajektorienverfolgung mit einer kinematischen (kin.) und einer dynamischen (dyn.) Steuerung bei unterschiedlichen Verfahrensgeschwindigkeiten im Experiment.

Literatur

- [1] M. Grube, J.C. Wieck, R.Seifried, Comparison of Modern Control Methods for Soft Robots. Sensors 2022, 22, 9464.
<https://doi.org/10.3390/s22239464>

Aktive Dämpfung von Lastpendelschwingungen bei automatisierten Mehrseil-Krananlagen durch lineare Zustandsrückführung

Active Damping of Load Oscillations in Automated Multi-Cable Cranes by Linear Feedback Control

E. Hildebrandt, V. Birr & C. Woernle - Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl für Technische Mechanik / Dynamik, 18059 Rostock, Deutschland

Kurzfassung

Bei Mehrseil-Krananlagen ist eine Nutzlast durch mehrere räumlich angeordnete Seile aufgehängt. Durch koordinierte Bewegungen aller Antriebe kann nicht nur die Position, sondern auch die Orientierung der Nutzlast gezielt gesteuert werden. Wie bei klassischen Kranen tritt bei der Automatisierung das Problem auf, dass wegen der kinematisch unbestimmten Aufhängung das Anfahren und Bremsen der Antriebe sowie Störeinflüsse zu unerwünschten Lastpendelbewegungen führen. Die Schwingungen klingen wegen der geringen Eigendämpfung der Systeme nur langsam ab, was den Positionier- und Orientierungsvorgang der Last erschwert und verzögert. Da ein wirtschaftlicher Betrieb wesentlich von der Genauigkeit und Schnelligkeit eines Arbeitszyklus abhängt, ist es von Interesse, durch geeignete regelungstechnische Maßnahmen Nutzlastschwingungen zu verhindern oder zumindest auf ein vertretbares Maß zu reduzieren.

Zur Entwicklung von Steuerungs- und Regelungskonzepten für Mehrseil-Krananlagen steht an der Universität Rostock das in der Abbildung gezeigte Prototypsystem CABLEV zur Verfügung. Bei CABLEV wird die Nutzlast durch drei Seile im Raum geführt, deren Winden jeweils auf einer Laufkatze montiert sind. Die Laufkatzen bewegen sich auf parallelen Führungsbahnen einer gemeinsamen Kranbrücke. Durch die Aufhängung an drei Seilen ist die Nutzlast kinematisch unvollständig geführt, wodurch translatorische Schwingungen in zwei horizontale Richtungen und eine Drehschwingung um die vertikale Achse auftreten können. Um die Pendelbewegungen der Nutzlast zu erfassen, werden die Positionen der Antriebe sowie die Neigungswinkel der Seile mittels präziser Absolutwertgeber gemessen.

Wie in Experimenten mit CABLEV erfolgreich nachgewiesen wurde, führt eine flachheitsbasierte Vorsteuerung die Nutzlast unter idealen Bedingungen entlang gewünschter Trajektorien [1-2]. Sind die idealen Bedingungen nicht erfüllt, z. B. durch Parameterunsicherheiten oder äußerer Störkräfte, treten Lastpendelbewegungen auf. Zur Dämpfung der Schwingungen wird im Rahmen des Beitrags eine überlagerte Bahnregelung durch lineare Zustandsrückführung vorgestellt. Die hierzu erforderlichen aktuellen Bewegungsgrößen werden durch einen nichtlinearen Zustands- und Störbeobachter fortlaufend geschätzt. Ein Blockschaltbild des Gesamtkonzepts zeigt die Abbildung. Um ein gleichartiges und stabiles Regelverhalten trotz der sich im Kranbetrieb ständig ändernden Parameter sicherzustellen, werden die Regler- und Beobacherverstärkung in jedem Zeitschritt durch Lösen der algebraischen Riccati-Gleichung adaptiert. Die Grundlage hierfür bildet ein nichtlineares Entwurfsmodell der mechanischen Regelstrecke, welches für die Systemanalyse und die Echtzeitfähigkeit durch ein effizientes Linearisierungs- und Kondensationsverfahren vereinfacht wird. Die Wirksamkeit des Konzepts bestätigen experimentelle Ergebnisse vom Prototypsystem CABLEV.

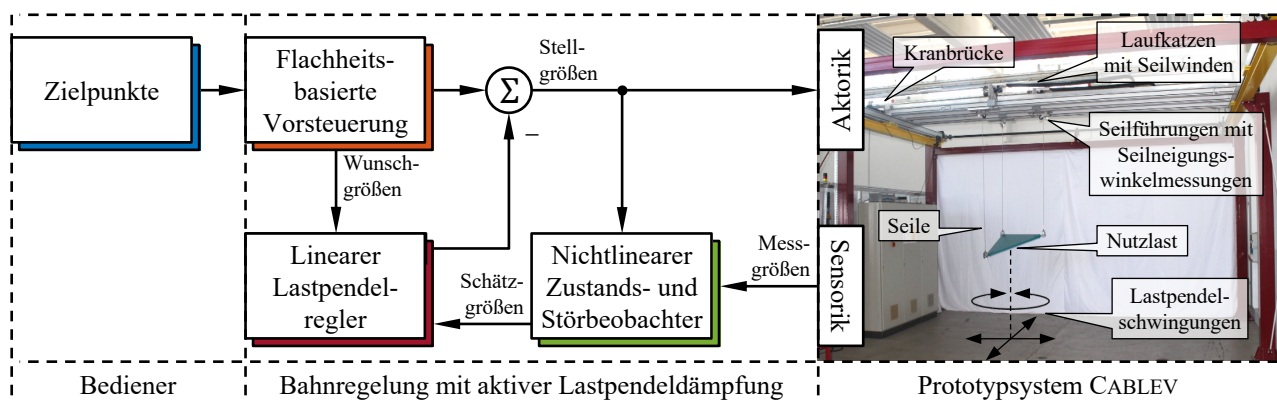


Abbildung: Blockschaltbild der dezentralen Bahnregelung mit aktiver Lastpendeldämpfung für das Prototypsystem CABLEV.

Literatur

- [1] Heyden, T.; Woernle, C.: *Dynamics and Flatness-Based Control of a Kinematically Undetermined Cable Suspension Manipulator*. In *Multibody System Dynamics*. 2006. Bd. 16, Nr. 2. S. 155-177.
- [2] Maier, T.; Woernle, C.: *Flachheitsbasierte Bahnsteuerung von seilgeführten Handhabungssystemen*. In *at-Automatisierungstechnik*. 2003. Bd. 51, Nr. 6. S. 265-273.

Methoden des maschinellen Lernens als Notfallstrategie nach Seilrissen bei parallelen Seilrobotern

Machine Learning Methods as an Emergency Strategy after Cable Breaks of Cable-Driven Parallel Robots

Patrick Gust*, Christian Hürten, Roland Boumann, Tobias Bruckmann

Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Mechatronik, 47057 Duisburg, Deutschland

*Kontakt: patrick.gust@uni-due.de

Kurzfassung

In einem aktuellen Projekt der Universität Duisburg-Essen, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), werden *Strategien zur Schadensvermeidung nach Seilrissen in parallelen Seilrobotern* entwickelt. Die zunehmend anwendungsorientierten Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Seilrobotik, beispielsweise der automatische Mauerroboter CARLO oder die weltweit in Stadien eingesetzte SkyCam, werfen die Frage nach der Sicherheit von Seilrobotern auf. Die sehr kritische Fehlerquelle eines Seilrisses ist bereits mehrmals bei bekannten Seilrobotern aufgetreten. Um das Risiko für Mensch und Maschine zu reduzieren, sind aus der Literatur einige Notfallstrategien nach Seilrissen bekannt. Diese Ansätze sind in der Simulation analysiert und experimentell validiert worden, müssen aber Einschränkungen in Kauf nehmen, um die Echtzeitfähigkeit zu erreichen. In diesem Beitrag wird einen Ansatz aus dem Bereich des maschinellen Lernens vorgestellt.

Abstract

In a current project at the University of Duisburg-Essen, funded by the German Research Foundation (DFG), *Strategies for Damage Prevention after Cable Breaks in Parallel Cable Robots* are being developed. The increasingly application-oriented research work in the field of cable robots, for example the automatic wall building robot CARLO or the SkyCam used in stadiums worldwide, raises the question of safety for cable robots. The very critical source of error caused by a cable break has already occurred several times with well-known cable robots. In order to reduce the risk for man and machine, several emergency strategies after cable breaks are known from the literature. These approaches have been analysed in simulation and experimentally validated, but must accept limitations in order to achieve real-time capability. This article presents an approach from the field of machine learning.

1 Einleitung

Ein Seilroboter ist ein parallelkinematischer Roboter, der als Endeffektor eine mobile Plattform besitzt, die über Seile mit computergesteuerten Winden aktuiert wird [1]. Die Forschung zu Seilrobotern veränderte zuletzt den Fokus von der Grundlagenforschung [2] hin zu anwendungsorientierteren Projekten [3, 4]. Der Seilroboter CARLO nutzt den Vorteil der großen Arbeitsräume seilbasierter Robotersysteme aus, um automatisch Steine für den Bau eines Hauses zu setzen [3]. Ein anderes Beispiel ist die weltweit in Stadien eingesetzte Skycam, welche an Seilen befestigt über Sportevents schwebt und die Athleten filmt [4]. Der Wechsel zu anwendungsorientierten Forschungsarbeiten wirft die Frage nach der Sicherheit seilbasierter Robotersystem auf. Im Jahr 2011 stürzte beispielsweise eine Skycam wegen eines gerissenen Seils auf das Spielfeld und verfehlte einen Spieler nur knapp [5]. Ein weiteres Beispiel ist der Einsturz des baufälligen Arecibo-Teleskops im Jahr 2020 [6].

Aus der Literatur sind einige Ansätze für Notfallstrategien nach Seilrissen bekannt [7–10].

In [7] wird eine Notfallstrategie für einen Seilroboter mit drei Freiheitsgraden präsentiert, in der eine sichere Halte-

position mit Hilfe einer geradlinigen Trajektorie angefahren wird. Die Autoren wählen diesen relativ simplen Ansatz aufgrund der Echtzeitfähigkeit dieser Methode [8].

Boumann et al. stellen in [9] zwei modellbasierte Methoden zur Schadensvermeidung nach Seilrissen bei einem Seilroboter mit sechs Freiheitsgraden vor und validieren diese experimentell in [10]. Eine der Methoden ist eine einschrittige nichtlineare modellprädiktive Regelung (Nonlinear Model Predictive Control, NMPC) [9]. Diese NMPC minimiert die kinetische Energie des Endeffektors bei Detektion eines Seilrisses und verfolgt so das Ziel, den Endeffektor schnellstmöglich anzuhalten.

Modellprädiktive Regelungen vereinen das vorausschauende Modellwissen mit dem Vorteil der Rückführung einer klassischen Regelung und reagieren somit auf Prozessstörungen [11]. Ein Nachteil ist die notwendige Rechenzeit des Optimierungsalgorithmus [11].

In der Literatur finden sich alternative Ansätze, um NMPCs durch Verfahren des maschinellen Lernens zu ersetzen.

Sieberg et al. zeigen in [13], dass sich mithilfe eines Co-Active Neuro-Fuzzy Inference System (CANFIS) die Rechenzeit im Vergleich zu einer NMPC für die aktive Wankstabilisierung [12] um den Faktor 8.85 reduzieren lässt.

CANFIS ist eine Weiterentwicklung des Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS, [14]) und besonders für MIMO Systeme geeignet [15]. Erste Untersuchungen im Vorfeld dieses Beitrages ergaben, dass ein CANFIS als Lösung für den hier beschriebenen Anwendungsfall nicht praktikabel ist.

Ein weiterer Ansatz aus dem Bereich des maschinellen Lernens wird von Wang et. al in [16] vorgestellt. Die Autoren bilden das Verhalten einer modellprädiktiven Regelung in einem Stromrichter durch ein künstliches neuronales Netz ab. Damit wird der Rechenaufwand deutlich reduziert und es werden genauere Systemmodelle höherer Ordnung verwendet.

In diesem Beitrag wird die NMPC zur Schadensvermeidung nach Seilrissen [9] durch ein künstliches neuronales Netz ersetzt. Die durch Boumann et. al präsentierte NMPC dient als Grundlage zur simulativen Generierung von Trainingsdaten.

Der Beitrag stellt zunächst die Modellierung und Simulation paralleler Seilroboter vor. Dabei wird die NMPC als Notfallstrategie nach Seilrissen vorgestellt. Anschließend wird die angewandte Methodik erläutert, welche auf den Grundlagen von künstlichen neuronalen Netzen basiert. Die Ergebnisse des Trainings und der Simulation werden präsentiert und diskutiert. Abschließend folgt eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf die nächsten Forschungsarbeiten.

2 Modellierung und Simulation paralleler Seilroboter

Ein paralleler Seilroboter (*engl.* Cable Driven Parallel Robot, CDRP) verbindet eine mobile Plattform, auch Endeffektor, über Seile und Umlenkrollen mit aktuierten Winden und ist beispielhaft in **Bild 1** abgebildet. Ein redundanter Seilroboter hat mehr Seile m als Freiheitsgrade n des Endeffektors, was zu einer Redundanz r führt. [1]

$$r = m - n \quad (1)$$

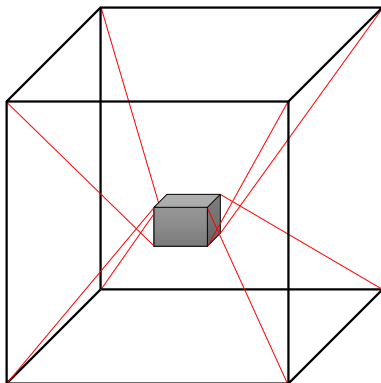


Bild 1 Paralleler Seilroboter mit $m = 8$ Seilen und $n = 6$ Freiheitsgraden

Der in diesem Beitrag betrachtete Seilroboter gehört mit einer Redundanz von $r = 2$ nach Verhoeven zu den sogenannten Redundantly Restrained Position Mechanisms

(RRPMs) [17]. Es handelt sich um den Seilroboter SEGESTA der Universität Duisburg-Essen [2].

2.1 Modellierung

Im folgenden werden die grundlegenden Ansätze und Gleichungen zur Simulation eines CDRPs nach Boumann et. al beschrieben [18]. **Bild 2** skizziert die Modellparameter eines CDRPs.

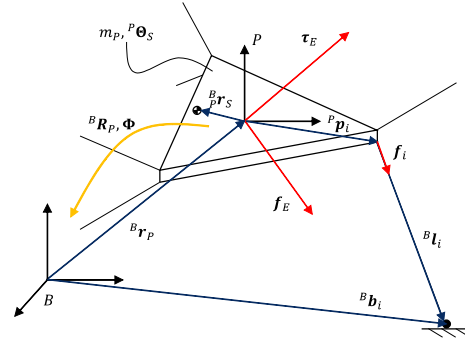


Bild 2 Skizze der geometrischen Zusammenhänge eines Seilroboters, angelehnt an [18]

Es wird das körperfeste Koordinatensystem P des Endeffektors und das raumfeste Koordinatensystem B des Rahmens eingeführt. Die Pose ${}^B \mathbf{x}_P$ des Endeffektors besteht aus der Position des Endeffektors ${}^B \mathbf{r}_P$ und der Orientierung Φ mit Bezug auf das Koordinatensystem B .

$${}^B \mathbf{x}_P = [{}^B \mathbf{r}_P \quad \Phi]^\top \quad (2)$$

Die Rotationsmatrix ${}^B \mathbf{R}_P$ beschreibt die Orientierung des Endeffektors bzw. des Koordinatensystems P mit Bezug auf das Koordinatensystem B .

Die Geometrie des Seilroboters wird durch die Anknüpfungspunkte ${}^P \mathbf{p}_i$ der Seile am Endeffektor sowie der Ausgangspunkte der Seile an den Umlenkrollen ${}^B \mathbf{b}_i$ am Rahmen beschrieben. Hier wird zur Vereinfachung von einem punktförmigen Seilaustritt ausgegangen. Die Seilvektoren ${}^B \mathbf{l}_i$ lassen sich, unter der Annahme gespannter, masseloser und linienförmig verlaufender Seile, aus der inversen Kinematik des Roboters ableiten:

$${}^B \mathbf{l}_i = {}^B \mathbf{b}_i - ({}^B \mathbf{r}_P + {}^B \mathbf{R}_P {}^P \mathbf{p}_i), \quad 1 \leq i \leq m \quad (3)$$

Die Seilkräfte f_i , die von den Motoren erzeugt werden, ziehen in Richtung der Seilvektoren am Endeffektor. Es wird der Richtungsvektor der Seilkraft \mathbf{v}_i eingeführt.

$${}^B \mathbf{f}_i = f_i \frac{{}^B \mathbf{l}_i}{\|{}^B \mathbf{l}_i\|_2} = f_i {}^B \mathbf{v}_i, \quad 1 \leq i \leq m \quad (4)$$

Der Index des Koordinatensystems wird im Folgenden der Einfachheit halber weggelassen.

Mit den eingepägten Kräften \mathbf{f}_E und Momenten $\boldsymbol{\tau}_E$, die auf den Endeffektor einwirken, wird das Kräftegleichgewicht gebildet.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} -\mathbf{f}_E \\ -\boldsymbol{\tau}_E \end{bmatrix}}_{-\mathbf{w}_E} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 & \dots & \mathbf{v}_m \\ \mathbf{p}_1 \times \mathbf{v}_1 & \dots & \mathbf{p}_m \times \mathbf{v}_m \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}^\top} \underbrace{\begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_m \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}} \quad (5)$$

Vereinfacht wird der Zusammenhang durch die Strukturmatrix des Roboters $\mathbf{A}^\top \in \mathbb{R}^{n \times m}$ sowie dem Seilkraftvektor $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ und dem Kraftwinder $\mathbf{w}_E \in \mathbb{R}^{n \times 1}$.

Es ist zu beachten, dass die Seile am Endeffektor nur ziehen und niemals drücken. Um ein Erschlaffen der Seile zu verhindern, wird neben einer maximal erzeugbaren Seilkraft f_{max} eine minimale Seilkraft f_{min} definiert. Das überbestimmte Gleichungssystem (5) wird somit bei gegebenem Kraftwinder \mathbf{w}_E , einer Redundanz $r = 2$ und gesuchter Seilkraftverteilung \mathbf{f} mit $f_i \in [f_{min}, f_{max}]$ zu einem Optimierungsproblem [19].

Die dynamischen Bewegungsgleichungen des Seilroboters finden sich durch Aufstellen der Newton-Euler-Gleichungen [20] für den Endeffektor. Dazu wird die Masse des Endeffektors m_P mit dem Ortsvektor ${}^P\mathbf{r}_S$, welcher vom Koordinatensystems P zum Schwerpunkt S zeigt, eingeführt. ${}^P\mathbf{r}_S$ beschreibt dessen schiefsymmetrische Matrix. Die Anwendung des Satzes von Huygens-Steiner liefert den Trägheitstensor ${}^B\mathbf{I}_P$ des Endeffektors bezüglich des raumfesten Koordinatensystems B unter Verwendung des Trägheitstensors ${}^P\mathbf{I}_S$ bezüglich des Schwerpunktes des Endeffektors.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m_P \mathbf{E} & -m_P {}^P\mathbf{r}_S \mathbf{H} \\ -m_P {}^P\mathbf{r}_S & {}^B\mathbf{I}_P \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}_P \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix} + \dots \\ & \begin{bmatrix} m_P [(\dot{\mathbf{H}}\dot{\Phi}) \times_P \mathbf{r}_S + (\mathbf{H}\dot{\Phi}) \times ((\mathbf{H}\dot{\Phi}) \times_P \mathbf{r}_S)] \\ {}^B\mathbf{I}_P \dot{\mathbf{H}}\dot{\Phi} + (\mathbf{H}\dot{\Phi}) \times ({}^B\mathbf{I}_P \mathbf{H}\dot{\Phi}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{f}_E \\ \boldsymbol{\tau}_E \end{bmatrix} \\ & = \mathbf{M}_P(\mathbf{x}_P) \ddot{\mathbf{x}}_P + \mathbf{K}(\mathbf{x}_P, \dot{\mathbf{x}}_P) + \mathbf{Q}(\mathbf{x}_P, \dot{\mathbf{x}}_P) = \mathbf{A}^\top \mathbf{f} \end{aligned} \quad (6)$$

Die Vektoren $\dot{\mathbf{x}}_P$ und $\ddot{\mathbf{x}}_P$ beschreiben die zeitlichen Ableitungen der Endeffektorpose. \mathbf{H} und $\dot{\mathbf{H}}$ ergeben sich aus den kinematischen Kardan-Gleichungen [21]. $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ist eine Einheitsmatrix. Zur Vereinfachung werden die Endeffektormasse in der Massenmatrix $\mathbf{M}_P(\mathbf{x}_P)$, die Zentrifugal- und Korioliskräfte in dem Vektor $\mathbf{K}(\mathbf{x}_P, \dot{\mathbf{x}}_P)$ und weitere Kräfte und Momente in dem Vektor $\mathbf{Q}(\mathbf{x}_P, \dot{\mathbf{x}}_P)$ zusammengefasst.

2.2 Nichtlineare Modellprädiktive Regelung als Notfallstrategie nach Seilrissen bei Seilrobotern

Eine durch Boumann et. al vorgestellte Notfallstrategie nach Seilrissen bei Seilrobotern ist die nichtlineare modellprädiktive Regelung [9]. Der Ansatz verfolgt das Ziel die kinetische Energie des Endeffektors E_{kin} zu minimieren.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m_P \dot{\mathbf{r}}_P^\top \dot{\mathbf{r}}_P + \frac{1}{2} \Omega^\top \mathbf{I} \Omega, \quad \Omega = \mathbf{H}\dot{\Phi} \quad (7)$$

Die kinetische Energie ist direkt an die Geschwindigkeit des Endeffektors gekoppelt. Eine erfolgreiche Minimierung der kinetischen Energie führt zu einem vollständigen Stop des Endeffektors. Wird der Endeffektor erfolgreich gestoppt, so befindet er sich automatisch im nach Seilriss verbleibenden Arbeitsraum.

Modellprädiktive Regelungen optimieren den Stellgrößenverlauf mit Hilfe eines diskretisierten Modells [11]. Adamy [11] erklärt diese in Analogie zu einem Schachspie-

ler, der versucht, die nächsten Züge seines Gegenspielers vorherzusagen, und entsprechend seine eigenen Züge optimiert. Die NMPC berechnet zu einem Zeitschritt k aus dem Zustand $\tilde{\mathbf{x}}_k$ die Ausgangsgrößen \mathbf{y} über einen Prädiktionshorizont n_p und optimiert die Stellgrößen \mathbf{u} über einen Stellhorizont n_c , um einer Referenzgröße \mathbf{y}_R zu folgen (siehe Bild 3).

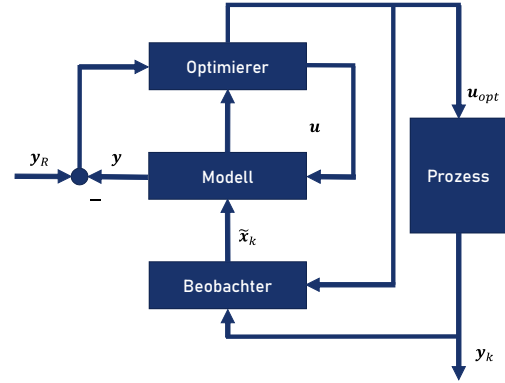


Bild 3 Nichtlineare modellprädiktive Regelung (NMPC), angelehnt an [9, 11]

Im Folgenden wird der Aufbau der NMPC nach [9] vorgestellt. Das System des Seilroboters wird durch folgendes nichtlineares, diskretes Modell abgebildet:

$$\mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \quad (8)$$

$$\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{C}\mathbf{x}_k \quad (9)$$

Der Zustandsvektor \mathbf{x}_k setzt sich aus den Geschwindigkeit und der Pose des Endeffektors zusammen, welche sich aus der Vorwärtskinematik des Seilroboters ergibt:

$$\mathbf{x}_k = [\dot{\mathbf{r}}_{P,k} \quad \dot{\Phi}_k \quad \mathbf{r}_{P,k} \quad \Phi_k]^\top \quad (10)$$

Die Geschwindigkeit des Endeffektors in Translation und Rotation ist die Ausgangsgröße, da das Ziel der Regelung die Minimierung der kinetischen Energie und der vollständige Stop des Endeffektors ist.

$$\mathbf{y}_{k+1} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}_{P,k+1} \\ \dot{\Phi}_{k+1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Bei einem Seilriss werden für die mathematische Modellierung die dem Seil zugehörigen Zeilen der Strukturmatrix entfernt. Die Eingangsgröße \mathbf{u}_k besteht aus der Seilkraftverteilung \mathbf{f}_k^* der nicht gerissenen Seile.

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{f}_k^* \quad (12)$$

Die nichtlineare Funktion $f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$ ergibt sich aus der Diskretisierung und numerischen Integration von Gleichung (6). [9] definiert zur Optimierung der Eingangsgrößen die Kostenfunktion J mit der Gewichtungsmatrix \mathbf{G} und dem Gewichtungsfaktor g . Sie summiert über den Prädiktionshorizont die Differenzen der Geschwindigkeiten als Ausgangsgröße \mathbf{y}_{k+i} und der Referenzgröße $\mathbf{y}_R = \mathbf{0}$ sowie über den Stellhorizont die Änderung der Seilkräf-

te, um Schwingungsanregungen durch große Kraftstöße zu vermeiden.

$$J = \sum_{i=1}^{n_p} \mathbf{y}_{k+i}^\top \mathbf{G} \mathbf{y}_{k+i} + \dots \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{n_c} (\mathbf{f}_{k+i-1}^* - \mathbf{f}_{k+i-2}^*)^\top g(\mathbf{f}_{k+i-1}^* - \mathbf{f}_{k+i-2}^*)$$

Der Optimierungsalgorithmus der NMPC minimiert für jeden Zeitschritt k die Kostenfunktion J durch Anpassung der Seilkräfte \mathbf{f}^* .

3 Künstliches Neuronales Netz

Der von Wang et. al vorgestellte Ansatz zur modellprädiktiven Regelung eines Stromrichters basiert auf einem künstlichen neuronalen Netz (KNN) [16]. Haykin zufolge ist ein großer Vorteil neuronaler Netze die Generalisierung [22]. Dadurch ist das KNN in der Lage, auch bei vorher unbekanntem Eingaben sinnvolle Ergebnisse zu erzeugen. Im folgenden werden die Grundlagen neuronaler Netze erklärt.

3.1 Aufbau eines KNN

Ein KNN besteht aus einer Vielzahl sogenannter Neuronen. Die Skizze eines Neurons ist in **Bild 4** dargestellt.

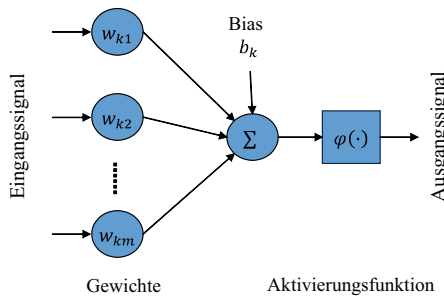


Bild 4 Aufbau eines Neurons in einem künstlichen neuronalen Netz, angelehnt an [22]

Die Eingänge \mathbf{q}_k werden mit Gewichtungparametern \mathbf{w}_k multipliziert und zusammen mit einem Bias b_k aufsummiert [22]. Eine Aktivierungsfunktion $\varphi(\cdot)$ limitiert in der Regel die Ausgänge [22].

$$y_k = \varphi(\mathbf{w}_k^\top \mathbf{q}_k + b_k) \quad (14)$$

Es gibt unterschiedliche Typen der Aktivierungsfunktion, wobei in diesem Beitrag die Sigmoid-Funktion

$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (15)$$

der Tangens-Hyperbolicus

$$\varphi(x) = \tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (16)$$

und die ReLu-Funktion eingesetzt werden [22]

$$\varphi(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & x \geq 0 \end{cases}. \quad (17)$$

Nach [23] besteht ein KNN aus vielen Neuronen, die zu einem Netz mehrerer Schichten verknüpft werden. Eine einfache Struktur eines KNN ist das sogenannte Feed-Forward-Netz, wobei jedes Neuron als Eingang alle Ausgänge der Neuronen der vorherigen Schicht bekommt [23]. Ein beispielhaftes Feed-Forward-Netz ist in **Bild 5** dargestellt.

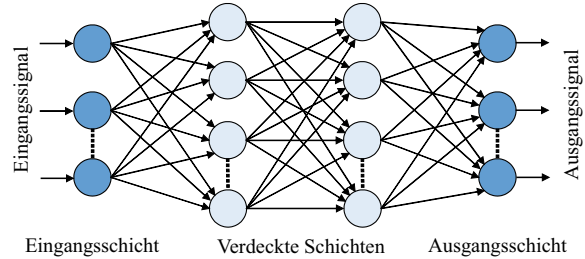


Bild 5 Feed-Forward-Netz, angelehnt an [22]

3.2 Training

Bishop [23] beschreibt ein KNN als parametrierbare nicht-lineare Funktionen. Nach dem Autor muss, um die Parameter dieser nichtlinearen Funktion zu ermitteln, der sogenannte mittlere quadratische Fehler (*engl.* Mean-Square-Error, MSE) auf einem Trainingsdatensatz minimiert werden [23]. Ein Trainingsdatensatz besteht aus den Eingangsvektoren \mathbf{q}_n mit $n = 1, \dots, N$, wobei N die Anzahl an Datensätzen ist, und den zugehörigen Zielvektoren \mathbf{t}_n . Der MSE ergibt sich nach [23] beim Ausgang eines KNN $\mathbf{y}(\mathbf{q}_n, \mathbf{W})$ und dem Gewichtungssatz \mathbf{W} zu:

$$MSE(\mathbf{W}) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \|\mathbf{y}(\mathbf{q}_n, \mathbf{W}) - \mathbf{t}_n\|^2. \quad (18)$$

Die Parameter des KNN werden mittels Fehlerrückführung (*engl.* Error-Back-Propagation) mit einer Korrektur $\nabla \mathbf{W}$ angepasst, welche sich aus den partiellen Ableitungen der Fehlerfunktion über den Gewichtungssatz ergibt [22].

Zur Generierung der Trainingsdaten werden zunächst die Ein- und Ausgangsdaten der NMPC definiert. Neben der Geschwindigkeit des Endeffektors $\dot{\mathbf{x}}_P$ ist die Strukturmatrix des Seilroboters elementar für die Seilkraftverteilung. Nach Gleichung (3), (4) und (5) ist diese abhängig von der Pose des Endeffektors \mathbf{x}_P . Zusätzlich zur Geschwindigkeit des Endeffektors minimiert die NMPC in der Kostenfunktion (Gleichung (13)) die Seilkraftänderungen, wozu die zuvor gestellten Seilkräfte $\mathbf{f}_{\text{alt}}^*$ notwendig sind. Zusammenfassend ergibt sich der Eingangsvektor $\mathbf{q}_n \in \mathbb{R}^{1 \times 19}$:

$$\mathbf{q}_n = [\mathbf{x}_P \quad \dot{\mathbf{x}}_P \quad \mathbf{f}_{\text{alt}}^*]^\top \quad (19)$$

Der Ausgang der NMPC ist die zu stellende Seilkraftverteilung $\mathbf{f}_{\text{neu}}^*$. Diese sind die Zielvektoren für das Training des KNN.

$$\mathbf{t}_n = \mathbf{f}_{\text{neu}}^* \quad (20)$$

Die Trainingsdaten der NMPC werden mit Hilfe des nach [18] in Abschnitt 2.1 beschriebenen Simulationsmodells erzeugt. Die NMPC ist in diesem Simulationsmodell als Notfallstrategie nach Seilrissen hinterlegt. Durch Entfernen eines Seiles lassen sich Seilrisse in verschiedenen Posen simulieren. Als Robotermodell dient der Seilroboter SE-GESTA der Universität Duisburg-Essen [2].

Der Endeffektor wird an zufällig und gleichmäßig verteilten Positionen im Arbeitsraum des Seilroboters platziert. Durch Entfernen eines Seiles wird ein Seilriss simuliert und die Notfallstrategie ausgelöst. Bei einem erfolgreichen Abfangen des Endeffektors durch die NMPC werden die in Gleichung (19) und (20) definierten Daten gespeichert. Durch mehrfache Wiederholungen der Simulation wurden ca. 9,4 Mio. Datensätze erzeugt.

Die Trainingsdaten werden zu 70 % für das Training des Netzes, zu 15 % zur Validierung und zu 15 % zum Testen verwendet. Vorher werden sie mit einem Mittelwert $\bar{q} = 0$ und einer Standardabweichung $\sigma = 1$ standardisiert sowie alle Datenpunkte zufällig angeordnet.

4 Ergebnisse und Diskussion

Für den hier behandelten Anwendungsfall wird ein KNN mit mehreren verdeckten Schichten aufgebaut. Den genauen Aufbau liefert eine Hyperparameteroptimierung, deren Einstellparameter in **Tabelle 1** zusammengefasst sind. Die Ergebnisse der Hyperparameteroptimierung sind in **Tabelle 2** dargestellt. Beim Training wird eine stufenförmige Lernratenabnahme angewendet.

Das KNN wurde mit den Parametern aus **Tabelle 2** für 30 Epochen trainiert. Das Training brach automatisch ab, da sich der MSE auf dem Validierungsdatensatz nicht weiter reduzierte. Dadurch wird einer Überanpassung (*engl.* Overfitting) des Netzes auf den Trainingsdaten vorgebeugt.

Zusätzlich sind in **Tabelle 2** die Ergebnisse des Trainings anhand des MSEs auf den Trainings-, Validierungs- und Testdaten dargestellt. Außerdem wird hier der MSE der Testdaten in den Kräfte Raum, also in die Seilkräfte am Endeffektor, umgerechnet.

Die Ergebnisse des Trainings zeigen, dass das Netz auf den Trainingsdaten etwas bessere Ergebnisse erzielt. Die vergleichbaren Werte zwischen Validierungs- und Test-MSE zeigen, dass das Netz in der Lage ist, generalisierte Ergebnisse zu erzielen.

Die Umrechnung der Daten zurück in den Kräfte Raum zeigt weiter, dass die durchschnittliche Abweichungen bei einer minimalen und maximalen zu stellenden Seilkraft von 15 N respektive 150 N relativ klein ist.

Im folgenden wird eine Simulation die Leistungsfähigkeit des KNN bewerten.

Tabelle 1 Parameter der Hyperparameteroptimierung

Parameter	Minimalwert	Maximalwert	Schrittweite
Verdeckte Schichten	1	3	1
Neuronen	32	1024	32
Batchgröße	1024	524288	2^{x+1}
Lernrate	10^{-5}	10^{-1}	10^{x+1}
Epochen für Lernratenabnahme	1	16	1
Lernratenabnahme	0,88	1	0,01
Aktivierungsfunktion	ReLU, Tanh, Sigmoid		

Tabelle 2 Ergebnis der Hyperparameteroptimierung

Parameter	Wert
Verdeckte Schichten	3
Neuronen 1. Schicht	256
Neuronen 2. Schicht	256
Neuronen 3. Schicht	224
Batchgröße	1024
Lernrate	10^{-3}
Epochen für Lernratenabnahme	1
Lernratenabnahme	0,99
Aktivierungsfunktion	Sigmoid
<i>MSE auf den jeweiligen Datensätzen</i>	
Training	4,2096E-4
Validierung	5,8289E-4
Test	5,7992E-4
Test im Kräfte Raum	0,2585 N

4.1 Analyse und Simulation in MATLAB/Simulink

Die Simulation des Seilroboters in ©MATLAB/Simulink ermöglicht es, die NMPC durch das KNN als hinterelegte Notfallstrategie zu ersetzen. Somit lassen sich zu dem Testdatensatz weitere neue Daten erzeugen und das KNN in einer simulativen Testumgebung im geschlossenen Regelkreis erproben. In der Simulation werden die theoretischen Seilkräfte durch die NMPC weiter erzeugt und ermöglichen einen Vergleich zum KNN. Die Seilkraftverläufe der NMPC und des KNNs eines erfolgreichen Simulationsdurchlaufs sind in **Bild 6** abgebildet. Zusätzlich ist die Differenz zwischen den Berechnungsmethoden pro Seilkraft und die translatorische bzw. rotatorische Endeffektorgeschwindigkeit über die Zeit abgebildet.

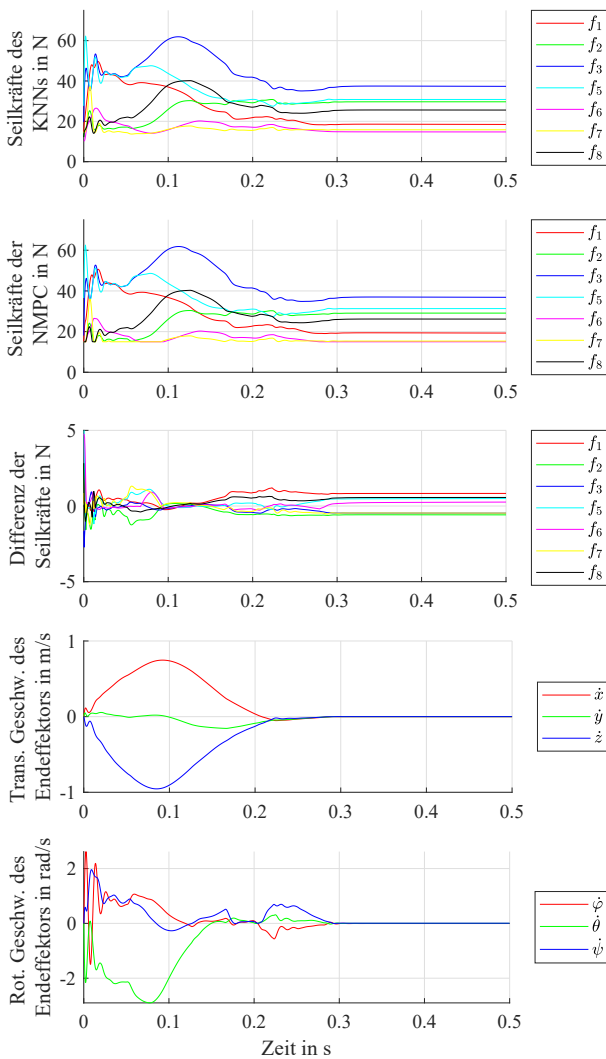


Bild 6 Ergebnisse der Simulation und Vergleich zwischen NMPC und KNN

Die Differenz der Kraftverläufe zwischen NMPC und KNN zeigt, dass das Netz die NMPC mit relativ kleinem Fehler abbildet. Es fällt auf, dass bei $0,1 - 0,15$ s der Fehler kleiner ist, während der Endeffektor eine erhöhte Geschwindigkeit hat.

Die Verläufe der translatorischen Geschwindigkeiten zeigen, dass das Netz das Ziel der Regelung in kurzer Zeit erreicht und der Endeffektor in eine stabile Halteposition gelangt.

Zusammenfassend zeigt das KNN in ausgewählten Simulationsläufen das Potential eines realistischen Ansatzes für eine Notfallstrategie nach Seilrissen von parallelen Seilrobotern. Das KNN ist in der Lage, die nichtlinearen Abhängigkeit der NMPC auf Basis von simulierten Trainingsdaten zu erlernen und auf unbekanntem Daten weiterhin sehr gute Ergebnisse zu erzielen. Die Erfolgchancen für das Abfangen des Endeffektors in beliebigen Seilrissituationen müssen durch weitere Forschungsarbeiten erhöht werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurde eine nichtlineare modellprädiktive Regelung als Notfallstrategie nach Seilrissen bei Seilrobotern durch ein künstliches neuronales Netz ersetzt. Die Generierung von Trainingsdaten erfolgte durch die Simulation von Seilrissen mit der hinterlegten NMPC als Notfallstrategie in ©MATLAB/Simulink. Bei dem vorgestellten KNN handelt es sich um ein Feed-Forward-Netz mit mehreren verdeckten Schichten. Die Hyperparameter, die das Netz und das Training beschreiben, wurden durch eine Hyperparameteroptimierung ermittelt.

Das KNN produziert auf den Trainings- und Validierungsdaten einen niedrigen MSE und ist in der Lage, auf dem Netz unbekanntem Testdaten, die Leistungsfähigkeit zu bestätigen. Durch weitere Seilrissimulationen mit dem KNN als Notfallstrategie im geschlossenen Regelkreis wurde die gute Generalisierbarkeit des Netzes nachgewiesen. In der Simulation ist das KNN in einigen Fällen in der Lage, den Endeffektor nach einem Seilriss abzufangen und in kurzer Zeit in eine sichere Halteposition zu bringen.

Der präsentierte Ansatz zeigt vielversprechende Ergebnisse, die Forschungsmöglichkeiten für zukünftige Untersuchungen eröffnen. Ein tiefergehender Vergleich des KNNs mit der NMPC wird zeigen, ob das Netz in der Lage ist, echtzeitfähige Ergebnisse zu erzielen. Eine Erweiterung des Prädiktions- und Stellhorizontes der NMPC bei der offline Generierung weiterer Trainingsdaten könnte die Zuverlässigkeit des Netzes erhöhen. Weitere Ansätze, wie die Verwendung von rekurrenten Netzen, haben das Potential die Nichtlinearität der NMPC besser abzubilden [24].

Der Beitrag bildet die Grundlage für weitere Arbeiten zur Erforschung von Methoden des maschinellen Lernens als Notfallstrategie nach Seilrissen bei parallelen Seilrobotern.

6 Danksagung

Die Arbeit an dieser Veröffentlichung ist gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projektnummer 506498608.

7 Literatur

- [1] A. Pott, *Cable-Driven Parallel Robots: Theory and Application*, Bd. 120. in Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 120. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-76138-1
- [2] SEGESTA - *Seilgetriebene Stewart-Plattformen in Theorie und Anwendung*. [Online]. Available: https://www.uni-due.de/mechatronik/forschung/SEGESTA_ARTIST.php
- [3] Roske, T., Lipowsky, J., Palzer, U., Eden, W., Schäfers, M., Lemmen, P., Heidel, R., Boumann, R., Spengler, A. und Bruckmann, T.: (2021), *Automatisierter Bau von Kalksandstein-Mauerwerk mit Seilrobotern*. Mauerwerk, 25: 82-89. <https://doi.org/10.1002/dama.202110011>

- [4] G. Brown: *SkyCam*, garrettcam.de. Zugegriffen: 16. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.garrettcam.com/skycam>
- [5] J. Marshall, *No one hurt after ESPN SkyCam falls during Insight Bowl*, The San Diego Union-Tribune, San Diego, 30. Dezember 2011. Zugegriffen: 2. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sandiegouniontribune.com/sdut-no-one-hurt-after-camera-falls-at-insight-bowl-2011dec30-story.html>
- [6] A. Witze, *Gut-wrenching footage documents Aricibo telescope's collapse*, Nature, Dez. 2020, Zugegriffen: 2. November 2023. [Online] doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-020-03421-y>
- [7] G. Boschetti, R. Minto, und A. Trevisani: *Experimental Investigation of a Cable Robot Recovery Strategy*, Robotics, Bd. 10, Nr. 1, S. 35, Feb. 2021, doi: 10.3390/robotics10010035 .
- [8] G. Boschetti, C. Passarini, und A. Trevisani: *A Recovery Approach for Spatial Cable Robots After Cable Failure*, in Advances in Italian Mechanism Science: Proceedings of the Second International Conference of IFToMM Italy, Bd. 68, G. Carbone und A. Gasparetto, Hrsg., in Mechanisms and Machine Science, vol. 68. , Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 457–464. doi: 10.1007/978-3-030-03320-0.
- [9] R. Boumann und T. Bruckmann: *Development of Emergency Strategies for Cable-Driven Parallel Robots after a Cable Break*, in Cable-Driven Parallel Robots: Proceedings of the 4th International Conference on Cable-Driven Parallel Robots, Bd. 74, A. Pott und T. Bruckmann, Hrsg., in Mechanisms and Machine Science, vol. 74. , Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 269-280. doi: 10.1007/978-3-030-20751-9
- [10] R. Boumann, C. Jeziorek, und T. Bruckmann: *Validation of Emergency Strategies for Cable-Driven Parallel Robots After a Cable Failure*, in Cable-Driven Parallel Robots: Proceedings of the 6th International Conference on Cable-Driven Parallel Robots, Bd. 132, S. Caro, A. Pott, und T. Bruckmann, Hrsg., in Mechanisms and Machine Science, vol. 132. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, S. 209-220. doi: 10.1007/978-3-031-32322-5
- [11] J. Adamy: *Nichtlineare Systeme und Regelungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. doi: 10.1007/978-3-662-55685-6 .
- [12] P. M. Sieberg, S. Reicherts, und D. Schramm: *Nichtlineare modellbasierte prädiktive Regelung zur aktiven Wankstabilisierung von Personenkraftwagen*, 2018, doi: 10.17185/DUEPUBLICO/45323 .
- [13] P. M. Sieberg, C. Hürten, und D. Schramm: *Representation of an Integrated Non-Linear Model-Based Predictive Vehicle Dynamics Control System by a Co-Active Neuro-Fuzzy Inference System*, in 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Las Vegas, NV, USA: IEEE, Okt. 2020, S. 572–577. doi: 10.1109/IV47402.2020.9304585 .
- [14] J.-S. R. Jang: *ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system*, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Bd. 23, Nr. 3, S. 665–685, Juni 1993, doi: 10.1109/21.256541 .
- [15] E. Mizutani und J.-S. R. Jang: *Coactive neural fuzzy modeling*, in Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia: IEEE, 1995, S. 760–765. doi: 10.1109/ICNN.1995.487513 .
- [16] D. Wang et al.: *Model Predictive Control Using Artificial Neural Network for Power Converters*, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 69, no. 4, pp. 3689–3699, 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3076721.
- [17] R. Verhoeven: *Analysis of the Workspace of Tendon-based Stewart Platforms*, Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2004.
- [18] R. Boumann and T. Bruckmann, *Simulation and Model-Based Verification of an Emergency Strategy for Cable Failure in Cable Robots*, Actuators, vol. 11, no. 2, p. 56, 2022, doi: 10.3390/act11020056.
- [19] T. Bruckmann, *Auslegung und Betrieb redundanter paralleler Seilroboter*, Dissertation, Lehrstuhl für Mechatronik, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2010. [Online]. Available: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:464-20101020-073248-8>
- [20] D. Schramm, M. Hiller, and R. Bardini, *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*, 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018. [Online]. Available: <http://www.springer.com/de/book/97833662544808>
- [21] M. Hiller, *Mechanische Systeme: Eine Einführung in die analytische Mechanik und Systemdynamik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1983.
- [22] S. S. Haykin, *Neural networks and learning machines*, 3rd ed. New York: Prentice Hall, 2009.
- [23] C. M. Bishop, *Pattern recognition and machine learning*. New York: Springer, 2006.
- [24] M. V. d. Hoop, M. Lassas, and C. A. Wong, *Deep learning architectures for nonlinear operator functions and nonlinear inverse problems*, Dec. 2019. [Online]. Available: <http://arxiv.org/pdf/1912.11090v3>

Einsatzmöglichkeit eines Low-Cost Roboters in der Lehre am Beispiel der Denavit-Hartenberg-Konvention

Possible Applications of a Low-Cost Robot in Teaching Using the Example of the Denavit-Hartenberg Convention

Markus Huber, Technische Universität München, Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, 85748 Garching, Deutschland, markus.m.huber@tum.de

Dr. Simon Laudahn, Technische Universität München, Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, 85748 Garching, Deutschland, simon.laudahn@tum.de

Christoph Parhofer, Technische Universität München, Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, 85748 Garching, Deutschland, christoph.parhofer@tum.de

Dr. Franz Irlinger, Technische Universität München, Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, 85748 Garching, Deutschland, irlinger@tum.de

Prof. Dr. Tim Lüth, Technische Universität München, Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, 85748 Garching, Deutschland, tim.lueth@tum.de

Kurzfassung

Im folgenden Beitrag soll gezeigt werden, wie die Denavit-Hartenberg-Konvention in der Lehre mit der Hilfe eines kostengünstigen, tragbaren Roboters veranschaulicht werden kann. Dies wird am Beispiel des am Institut entwickelten Low-Cost-Lightweight (LCL) Roboters und der Lerneinheit 'Denavit-Hartenberg-Konvention' [1] gezeigt. Der LCL-Roboter wurde hierfür gewählt, da er akkubetrieben ist und mit seinem Gewicht von unter 5 kg ohne großen Aufwand in die Vorlesung mitgenommen werden kann. Es wurde ein Matlab-Skript entworfen, welches eine kinematische Kopie des Roboters und die entsprechenden Transformationsmatrizen dynamisch anzeigt. Hierfür wurden anhand der Roboterstruktur die Denavit-Hartenberg-Transformationen aufgestellt und in Matlab implementiert. Die Strukturparameter wurden aus den Teilezeichnungen des Roboters entnommen und die Gelenkwinkel werden im Betrieb von den Motor-Encodern gemessen. Über eine serielle Schnittstelle können die Encoderwerte der Motoren ausgelesen werden. Mit diesen Daten können dann, für die Studierenden gut verständlich, die einzelnen Transformationsmatrizen angezeigt werden und sogar durch Abmessen am realen Roboter überprüft werden.

Abstract

The following article will show one way in which low-cost portable robots can be used in teaching. This is shown here using the example of the Low-Cost-Lightweight (LCL) robot developed at the institute and the Denavit-Hartenberg convention [1]. The LCL robot was chosen for this purpose because it is battery-operated and, with its weight of less than 5 kg, can be taken into the lecture without much effort. A Matlab script was designed which dynamically displays a kinematic copy of the robot and the corresponding transformation matrices. For this purpose, the Denavit-Hartenberg transformations were set up using the robot structure and implemented in Matlab. The structural parameters were taken from the robot's parts drawings and the joint angles are measured by the motor encoders during operation. The encoder values of the motors can now be read via a serial interface. This data can then be used to display the individual transformation matrices which can be checked by measuring on the real robot.

1 Einleitung

Die Denavit-Hartenberg-Konvention (DH-Konvention) hat sich als ein unverzichtbares Werkzeug in der Kinematik und Dynamik von Robotern etabliert. Ihre Anwendung erstreckt sich über verschiedene Bereiche wie Robotik, Maschinenbau und biomechanische Modellierung. Die DH-Konvention bietet eine standardisierte Methode zur Beschreibung von Bewegungen, Abmessungen und Positionen von Gliedmaßen oder Werkzeugen in einem mechanischen System. Trotz ihrer weitreichenden Bedeutung kann das Verständnis und die Anwendung dieser Konvention für Studierende oft eine Herausforderung darstellen. Um dieses Verständnis bei den Studierenden zu verbessern, kön-

nen Anschauungsobjekte in der Lehre verwendet werden. Ein Grund, der Verwendung von Anschauungsobjekten bei der Lehre der Denavit-Hartenberg-Konvention, liegt in der Natur des Maschinenbau-Studiums selbst. Studierende dieses Fachbereichs haben oft das Privileg, sich mit greifbaren Themen wie Robotern und anderen mechanischen Systemen zu befassen. Ein Demonstrator, der die DH-Konvention veranschaulicht, kann das Verständnis der Studierenden erheblich verbessern, insbesondere wenn der Lehrinhalt dreidimensional ist und somit schwer in einer rein zweidimensionalen Darstellung vermittelt werden kann. Durch die Interaktion mit einem physischen Modell können Studierende nicht nur die geometrischen Beziehun-

gen zwischen den Gliedern und Gelenken visualisieren, sondern auch ein intuitives Verständnis für die Bewegungen und Transformationen des Systems entwickeln.

2 Der Aufbau

Im folgenden Abschnitt wird der Aufbau vorgestellt, welcher verwendet wird, um den Studierenden die Denavit-Hartenberg-Konvention näher zu bringen. Dieser Aufbau besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil ist ein Roboter (siehe **Bild 1**), welcher von Hand bewegt werden kann. Der zweite Teil des Aufbaus ist die Software, die auf einem PC ausgeführt wird und über den Hörsaal-Projektor die aktuellen homogenen Transformationsmatrizen des Systems (siehe **Bild 4**) und eine kinematische Strichzeichnung des Roboters (siehe **Bild 5**) anzeigt.

2.1 Der Roboter

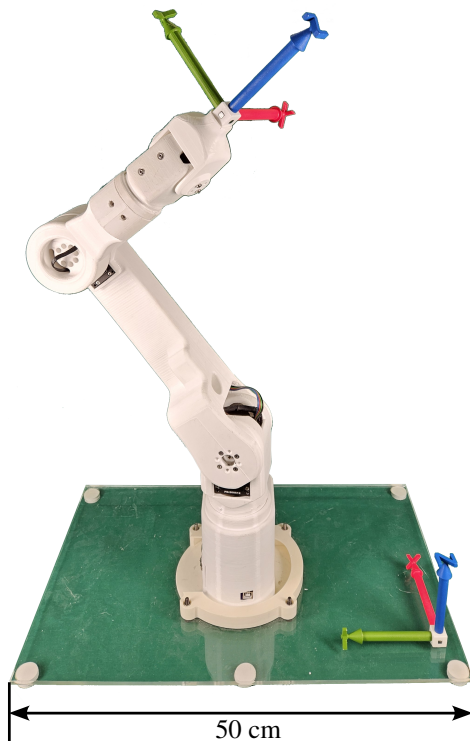


Bild 1 Foto des LCL-Roboters

Als Roboter wurde sich für den am Institut entwickelten Low-Cost-Lightweight (LCL) Roboter entschieden. Der LCL-Roboter wurde hierfür gewählt, da er vergleichsweise günstig und akkubetrieben ist und mit seinem Gewicht von unter 5 kg ohne großen Aufwand in die Vorlesung mitgenommen werden kann. Zudem ermöglicht seine Teach-and-Repeat-Steuerung eine einfache Bedienung ohne Einarbeitungszeit. Obwohl der Roboter mit Servomotoren ausgestattet ist, werden diese in diesem Anwendungsfall nur als Absolut-Encoder verwendet, um die Gelenkwinkel auszuwerten. Die momentanen Gelenkwinkel aller Achsen werden kontinuierlich über eine serielle Schnittstelle mittels eines USB-Kabels an den PC übertragen.

2.2 Digitale kinematische Abbildung

Die Softwareseite des Aufbaus wurde in Matlab realisiert. Matlab wurde hierfür gewählt, da dies eine Software ist, welche den Studierenden des Maschinenbaus an der TU München bereits im Bachelor im Rahmen einer Pflichtveranstaltung vermittelt wird. Die Studierenden sollten somit in der Lage sein die Software zu verstehen. Beim Start des Matlab-Skriptes werden die Transformationen zwischen den einzelnen Hilfssystemen, nach der Vorgehensweise von [2], berechnet. Die verwendete DH-Konvention mit den verwendeten Hilfssystemen ist in **Bild 2** dargestellt.

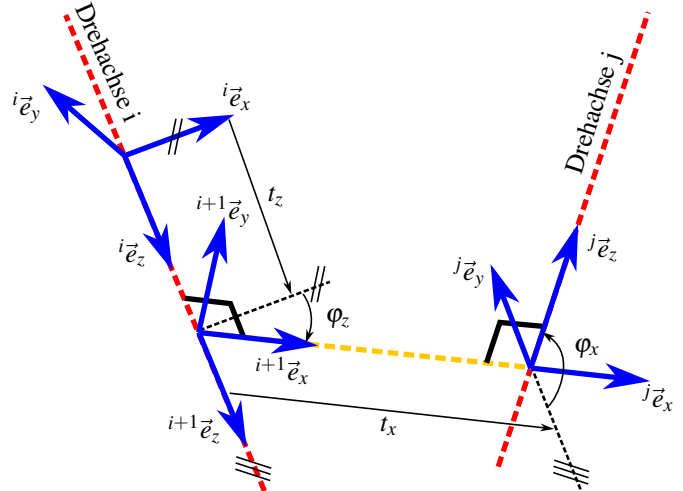


Bild 2 Beispiel der DH-Konvention an zwei windschiefen Achsen

Es werden die Längen und Winkelverhältnisse der Roboterkinematik (siehe **Bild 3**), sowie die über die serielle Schnittstelle eingelesenen Gelenkwinkel verwendet. Die in den einzelnen Transformationen verwendeten Größen dieses Roboters sind in **Tabelle 1** aufgeführt. Diese einzelnen Transformationsmatrizen werden dann optional mit symbolischen Gradangaben oder als numerische Zahlenwerte für die Studierenden in einer Übersicht ausgegeben (siehe **Bild 4**). In dieser Übersicht sind die Transformationsmatrizen aufgeteilt in z-Schraubungen und x-Schraubungen. Auf den Hintergrund dieser Aufteilung wird im Abschnitt 3.2 eingegangen.

Tabelle 1 Parameter der Denavit-Hartenberg-Transformationen des LCL-Roboters

	z-Schraubungen	x-Schraubungen
${}^W T_1$	$\varphi_{k12} ; a$	
${}^1 T_2$		$90^\circ ; 0$
${}^2 T_3$	$\varphi_{k23} ; 0$	
${}^3 T_4$		$0^\circ ; b$
${}^4 T_5$	$\varphi_{k34} ; c$	
${}^5 T_6$		$-90^\circ ; 0$
${}^6 T_7$	$\varphi_{k45} ; d$	
${}^7 T_8$		$-90^\circ ; 0$
${}^8 T_9$	$\varphi_{k56} ; 0$	
${}^9 T_{10}$		$90^\circ ; 0$
${}^{10} T_E$	$0^\circ ; e$	

Durch Aufmultiplizieren der einzelnen Transformationsmatrizen entstehen für jedes Hilfskoordinatensystem sowie für das Koordinatensystem des Endeffektors die Gesamttransformationen ausgehend vom Weltsystem. Somit können in einem weiteren Fenster die Achsen der Hilfskoordinatensysteme und des Endeffektorkoordinatensystems geplottet werden. Durch Verbinden der Ursprünge dieser Koordinatensysteme mit Linienzügen wird der Roboter als Strichkinematik angezeigt (siehe Bild 5).

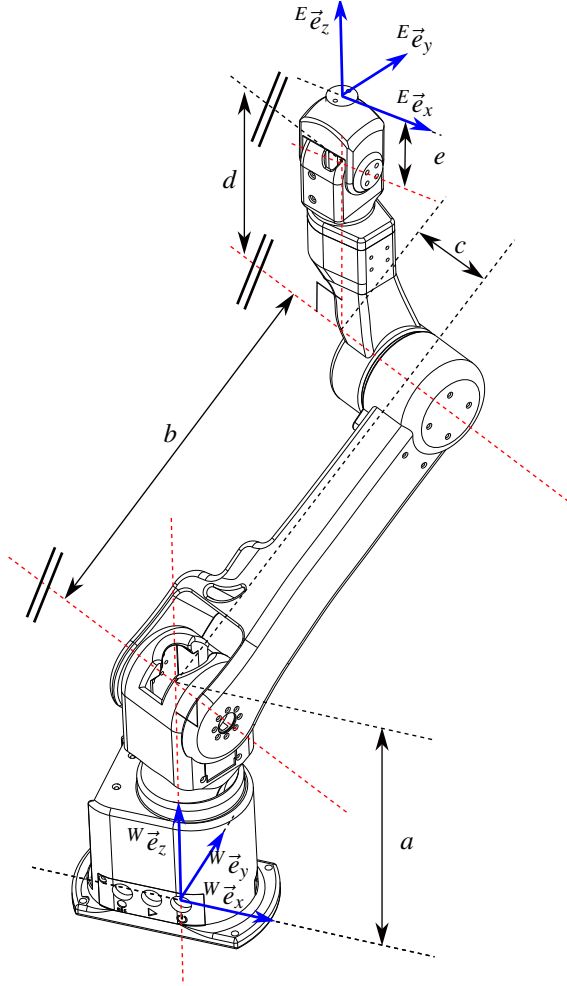


Bild 3 Zeichnung des LCL-Roboters mit den Gliedlängen bemisst

$$\begin{aligned}
 {}^W\mathbf{T}_E = & {}^W\mathbf{T}_{1,z}(\varphi_{k12}, a) \cdot {}^1\mathbf{T}_{2,x}(90^\circ, 0) \cdot {}^2\mathbf{T}_{3,z}(\varphi_{k23}, 0) \cdot \\
 & {}^3\mathbf{T}_{4,x}(0^\circ, b) \cdot {}^4\mathbf{T}_{5,z}(\varphi_{k34}, c) \cdot {}^5\mathbf{T}_{6,x}(-90^\circ, 0) \cdot \\
 & {}^6\mathbf{T}_{7,z}(\varphi_{k45}, d) \cdot {}^7\mathbf{T}_{8,x}(-90^\circ, 0) \cdot {}^8\mathbf{T}_{9,z}(\varphi_{k56}, 0) \cdot \\
 & {}^9\mathbf{T}_{10,x}(90^\circ, 0) \cdot {}^{10}\mathbf{T}_E(z, 0, e)
 \end{aligned} \quad (1)$$

mit

$${}^A\mathbf{T}_{B,z}(\varphi_z, z_t) = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_z) & -\sin(\varphi_z) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi_z) & \cos(\varphi_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

und

$${}^A\mathbf{T}_{B,x}(\varphi_x, x_t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_t \\ 0 & \cos(\varphi_x) & -\sin(\varphi_x) & 0 \\ 0 & \sin(\varphi_x) & \cos(\varphi_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Da die Software diese Berechnungen nun in nahezu Echtzeit immer wieder durchführt, können die Studierenden immer die aktuellen Werte des physischen Roboters in der graphischen Ausgabe des Programms sehen und jede Änderung mitverfolgen.

z-Schraubungen:	x-Schraubungen:
$T_{W_1} = \begin{bmatrix} \cos(-13^\circ) & -\sin(-13^\circ) & 0.000 & 0.000 \\ \sin(-13^\circ) & \cos(-13^\circ) & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.212 \end{bmatrix}$	$T_{1_2} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & -1.000 & 0.000 \\ 0.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 \end{bmatrix}$
$T_{2_3} = \begin{bmatrix} \cos(53^\circ) & -\sin(53^\circ) & 0.000 & 0.000 \\ \sin(53^\circ) & \cos(53^\circ) & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 \end{bmatrix}$	$T_{3_4} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.285 \\ 0.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 \end{bmatrix}$
$T_{4_5} = \begin{bmatrix} \cos(-25^\circ) & -\sin(-25^\circ) & 0.000 & 0.000 \\ \sin(-25^\circ) & \cos(-25^\circ) & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & -0.058 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix}$	$T_{5_6} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 \\ 0.000 & -1.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix}$
$T_{6_7} = \begin{bmatrix} \cos(-60^\circ) & -\sin(-60^\circ) & 0.000 & 0.000 \\ \sin(-60^\circ) & \cos(-60^\circ) & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.179 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix}$	$T_{7_8} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 \\ 0.000 & -1.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix}$
$T_{8_9} = \begin{bmatrix} \cos(-23^\circ) & -\sin(-23^\circ) & 0.000 & 0.000 \\ \sin(-23^\circ) & \cos(-23^\circ) & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix}$	$T_{9_10} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & -1.000 & 0.000 \\ 0.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix}$
$T_{10_B} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.060 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \end{bmatrix}$	
Gesamttransformation von Welt- zum Endeffektorsystem:	
$T_{W_B} = T_{W_1} * T_{1_2} * T_{2_3} * \dots * T_{9_10} * T_{10_B} = \begin{bmatrix} 0.041 & 0.860 & -0.509 & 0.070 \\ -0.830 & 0.313 & 0.462 & 0.063 \\ 0.556 & 0.403 & 0.726 & 0.641 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \end{bmatrix}$	

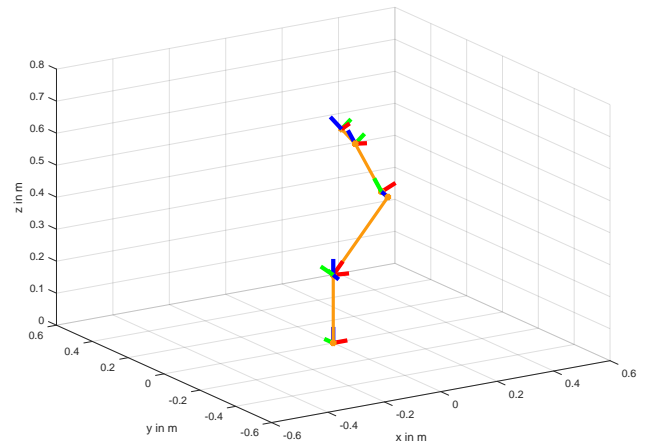


Bild 5 Anzeige der Strichkinematik des Roboters

3 Vermittelte Lerninhalte

Im Folgenden wird kurz darauf eingegangen, welche Lerninhalte mit dem Aufbau vermittelt werden sollen. Namentlich sind dies die Fähigkeiten die Rotation und die Verschiebung aus einer homogenen Transformationsmatrix abzulesen und zu verstehen, wo in der Denavit-Hartenberg-Notation die konstanten und wo die zeitabhängigen Größen stehen. Die Studierenden sollen verstehen, dass die tatsächliche Geometrie eines Roboterglieds für die Denavit-Hartenberg-Notation nicht relevant ist, sondern nur die La-

gen der Gelenkachsen zueinander, sowie die sichere Verbindung dieser beiden.

3.1 Lesen von Transformationsmatrizen

Obwohl das Verständnis von homogenen Transformationsmatrizen zu den mathematischen Grundlagen zählen sollte, realisieren viele Studierenden mit diesem Aufbau zum ersten Mal, dass homogene Transformationsmatrizen keine vollkommen abstrakten mathematischen Konstrukte sind, sondern diese sehr anschaulich die relative Lage von Koordinatensystemen zueinander beschreiben können. Während die meisten Studierenden wissen, dass die Translation einer homogenen Transformationsmatrix als Vektor in der rechten Spalte steht, gestaltet sich die Deutung der übrigen Spaltenvektoren, die die Rotationsmatrix darstellen, für viele schwieriger. Wie es in Gleichung (4) farbig angedeutet ist, beschreiben diese drei Spaltenvektoren der Länge 1, jeweils die Orientierung einer der drei Koordinatenachsen des Zielkoordinatensystems angegeben in Koordinatendarstellung des Ausgangskordinatensystems.

Zusätzlich realisieren viele Studierende zum ersten Mal, dass die Einträge einer homogenen Transformationsmatrix, die eine Schraubung entlang einer der Koordinatenachsen darstellt, tatsächlich nur durch die zwei unabhängige Größen Drehwinkel φ und Verschiebung t bestimmt werden. Dies wird in dem Aufbau besonders deutlich, wenn die Ausgabe der Matrizen, wie in Bild 4, mit den Sinus- und Kosinus-Werten erfolgt.

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

3.2 Zeitabhängige Größen in den DH-Transformation

Wie zuvor bereits erwähnt, sind die Transformationsmatrizen in der Übersicht in Bild 4 nach x -Schraubungen und z -Schraubungen getrennt. Diese Aufteilung wurde vorgenommen, damit die Studierenden sofort erkennen können, dass sich durch das Bewegen der Robotergelenke nur die Werte in den z -Schraubungen verändern, während die Werte der x -Schraubungen konstant sind.

3.3 Unabhängigkeit von der tatsächlichen Roboterglied geometrie

Ein weiterer Punkt, welcher den Studierenden mit diesem Aufbau vermittelt werden kann, ist die Unabhängigkeit der Denavit-Hartenberg-Notation von der tatsächlichen Gliedform. Dies kann demonstriert werden, indem bei dem Roboter ein gerades Roboterglied durch eine stark verformtes Glied ausgetauscht wird. Solange die Glieder beide die selben Achswinkel und Achsabstände besitzen, sehen die Studierenden, dass das System am Monitor weiterhin mit dem realen Roboter übereinstimmt, obwohl die Denavit-Hartenberg-Parameter nicht angepasst wurden. Besonders deutlich lässt sich dies am Beispiel von [3] zeigen, wo automatisiert aufgabenspezifische Roboterglieder entwor-

fen werden, welche jedoch weiterhin die gleichen Denavit-Hartenberg-Parameter besitzen.



Bild 6 LCL-Roboter mit gebogenen Gliedern

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde beschrieben, wie kostengünstige, tragbare Roboter, im Speziellen der am Institut entwickelte Low-Cost-Lightweight (LCL) Roboter, in der Lehre eingesetzt werden können. Der Fokus liegt auf der Vermittlung der Denavit-Hartenberg-Konvention durch praktische Anwendung. Der LCL-Roboter, der unter 5 kg wiegt und akkubetrieben ist, wird zusammen mit einem Matlab-Skript verwendet, um eine virtuelle kinematische Kopie des Roboters und die entsprechenden Transformationsmatrizen am Rechner interaktiv darzustellen. Die Studierenden können somit die Transformationsmatrizen direkt am Roboter nachvollziehen und überprüfen, was ein tieferes Verständnis der Materie fördern soll.

5 Literatur

- [1] J. Denavit and R. S. Hartenberg. A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 22(2):215–221, January 1955.
- [2] Hanfried Kerle, Burkhard Corves, and Mathias Hüsing. *Getriebetechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, January 2015.
- [3] Christoph Parhofer. Workspace specific robot arm design. In *Proceedings of the ASME 2023*, New Orleans, 2023.

Wir danken dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie für die Förderung dieser Forschung.

Eine Erweiterung für die konsistente Implementierung von Sensorik und Wahrnehmung im Plansys2 Framework

An Extension for Consistent Implementation of Sensors and Perception in the Plansys2 Framework

Simon Schläger*, M. Sc. schlaeger@igmr.rwth-aachen.de

Sören Walther**, M. Sc. s.walther@tu-braunschweig.de

Mathias Hüsing*, Prof. Dr.-Ing., Huesing@igmr.rwth-aachen.de

Burkhard Corves*, Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c., Corves@igmr.rwth-aachen.de

*RWTH Aachen, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, 52062 Aachen, Deutschland

**TU Braunschweig, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 38106 Braunschweig, Deutschland

Kurzfassung

Die steigende Komplexität moderner autonomer Robotersysteme erfordert eine in gleichen Maßen komplexere Systemarchitektur, die über traditionelle Automaten zur Aktionssteuerung hinausgehen und symbolische Planer zur Planung von Aufgaben miteinbeziehen [1]. Um die Komplexität und den Umfang der Systemarchitektur handhabbar und skalierbar zu halten, existieren Frameworks, die eine konsistente, wiederverwendbare und hinreichend abstrahierte Programmierung gewährleisten [1,7-8]. Dabei definieren diese Frameworks den Ansatz, nachdem die Systemarchitektur in einzelne Softwaresysteme unterteilt wird und auf welche Weise diese miteinander interagieren [2].

Bei der *Sense-Plan-Act* Architektur (SPA-Architektur) wird die Umgebung durch Sensoren wahrgenommen und durch Modellierung der Daten wird ein inneres Weltbild erstellt (*Sense*). Basierend darauf wird ein Plan zur Erreichung eines Ziels bestimmt (*Plan*), der dann umgesetzt wird (*Act*). Die SPA-Architektur zeichnet sich durch ihre deliberative Ausrichtung aus, was allerdings eine geringe Reaktivität bedeutet, da Veränderungen in der realen Welt keinen unmittelbaren Einfluss auf die Aufgabenausführung haben. Im Unterschied dazu werden bei verhaltensbasierten Ansätzen sensorische Inputs in Analogie zu menschlichen Reflexen direkt auf Aktionen abgebildet, was zu einer gesteigerten Reaktivität führt, jedoch auf Kosten der Fähigkeit deliberativ zu handeln. Eine mögliche Lösung besteht darin, hybride Architekturen zu verwenden, welche versuchen, die deliberative und reaktive Ausrichtung beider Ansätze zu vereinen, indem die Architektur aus einer Verhaltensebene und einer Planungsebene besteht. [2]

Mit *Plansys2* [1] existiert eine hybride Roboterarchitektur für die Aufgabenplanung und -ausführung, die das *Robot Operating Systems 2* (ROS2) [3] als Middleware verwendet. *Plansys2* verwendet auf der Planungsebene die *Planning Domain Definition Language 2.1* (PDDL) [4], um das interne Weltmodell zu erstellen und Planungsziele sowie planbare Aktionen zu definieren. Eine PDDL-Aktion modelliert eine reale, ausführbare Aktion unter Verwendung von Bedingungen, die erfüllt sein müssen, um die Aktion auszuführen. Zusätzlich dazu beschreibt sie Effekte, die durch die Ausführung der Aktion hervorgerufen werden und zu Veränderungen im inneren Weltbild führen. Eine Abfolge von planbaren Aktionen bildet dann den Plan, welcher in der Verhaltensebene mithilfe von *Behaviour Trees* (BTs) [5] verhaltensbasiert ausgeführt wird. BTs sind gewurzelte Bäume, bei denen die äußeren Knoten Aktions- und Bedingungsknoten darstellen. Ein Tick-Signal wird über die inneren Knoten durch den Baum geleitet und steuert so den Ablauf in Abhängigkeit von den Rückgabewerten der äußeren Knoten (*Running*, *Success* oder *Failure*). Als Bindeglied zwischen der Planungs- und Verhaltensebene nutzt *Plansys2* das eigens entwickelte *Action Auction Protocol*, welches für jede geplante PDDL-Aktion, die dazugehörige implementierte ausführbare Aktion aufruft.

Die Besonderheit von *Plansys2* liegt in der konsequenten Verwendung von BTs. BTs werden sowohl auf hohem Abstraktionsniveau eingesetzt, um die Aufgabenausführung hinsichtlich Parallelitäten zu optimieren, als auch auf niedrigem Abstraktionsniveau, um einzelne ausführbare Aktionen zu implementieren. Neben BTs bietet *Plansys2* noch die Möglichkeit, ausführbare Aktionen mithilfe von ROS2-*Actions* zu implementieren. Die Einbindung von Sensoren wird in *Plansys2* kaum unterstützt. Aktuell ist keine Lösung bekannt, die eine Integration von Sensoren in die Planungs- oder Verhaltensebene von *Plansys2* mittels eines Frameworks vereinheitlicht. In Zukunft sollen die Schließung dieser Lücke angestrebt und eine konsistente Einbindung von Sensoren in *Plansys2* erreicht werden.

Zunächst soll sichergestellt werden, dass Sensoren im *Plansys2*-Framework einheitlich auf verschiedenen Abstraktionsebenen programmiert werden können, um sowohl Sensoren in BT-Bedingungsknoten als auch Sensoren zur Erstellung des inneren Weltmodells zu unterstützen. Zu überprüfen dabei ist, ob Stenzels [6] Betrachtungsweise von abstrakten Sensoren in diesem Kontext anwendbar ist. Darauf aufbauend wird eine Methode entwickelt, um die Bedingungen einer PDDL-Aktion zur Laufzeit konkret zu überprüfen, indem BT-Bedingungsknoten verwendet werden. Das Ziel dieser

Implementierung ist eine für den Anwender nachvollziehbare Ausführung eines Plans, um im Fall eines gescheiterten Planes Gründe hierfür zu identifizieren. Zusätzlich wird angestrebt, dass durch diese engere Verknüpfung von Sensoren zwischen der Planungs- und Verhaltensebene das Problem inkonsistenter Zustände bei einem Abbruch der Aufgabenausführung beherrschbarer wird. Inkonsistente Zustände treten auf, wenn das interne Weltmodell aufgrund der Anfangseffekte einer PDDL-Aktion aktualisiert wird, aber seine Aktualisierung aufgrund der Schlusseffekte einer PDDL-Aktion wegen des Abbruchs nicht stattfindet [1].

Literatur

- [1] F. Martín, J.G. Clavero, V. Matellán, F.J. Rodríguez, *PlanSys2: A Planning System Framework for ROS2*, in: 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2021.
- [2] B. Siciliano, O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, 2nd edition, Springer, Heidelberg, 2016.
- [3] S. Macenski, T. Foote, B. Gerkey, C. Lalancette, W. Woodall, *Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild*, Science Robotics vol. 7, Mai 2022.
- [4] M. Fox, D. Long, *PDDL 2.1: An Extension to PDDL for Expressing Temporal Planning Domains*, Journal of Artificial Intelligence Research, Dezember 2003.
- [5] M. Colledanchise, P. Ögren, *Behavior Trees in Robotics and AI*, CRC Press, 2018.
- [6] R. Stenzel, *Steuerungsarchitekturen für autonome mobile Roboter*. Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2002.
- [7] M. Mayr, F. Rovida, V. Krueger, *SkiROS2: A skill-based Robot Control Platform for ROS*, 2023.
- [8] M.Á. González-Santamarta, F.J. Rodríguez-Lera, C. Fernández-Llamas, V. Matellán-Olivera, *MERLIN2: MachinEd Ros 2 pLanINg*, Software Impacts. 15 (2023).

Effiziente Berechnung eines voxelbasierten Umgebungsmodells für eine echtzeitfähige Informationsverteilung in der Robotik

Efficient Calculation of a voxel-based Environment Model for an Online Information Distribution in Robotics

Heiko Renz, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund, Deutschland, heiko.renz@tu-dortmund.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr. h.c. Torsten Bertram, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, 44227 Dortmund, Deutschland, torsten.bertram@tu-dortmund.de

Kurzfassung

Umgebungsmodelle sind ein essentieller Bestandteil für verschiedene Aufgaben in der Robotik. Verschiedene Ansätze zur Planung einer Robotertrajektorie oder zur Navigation benötigen ein Umgebungsmodell, um eine kollisionsfreie Lösung zu bestimmen. Eine weitere Applikation ist die fortwährende Beobachtung von Änderungen zur Detektion von ausgeführten Aufgaben. Je nach Applikation werden verschiedene Anforderungen an das Modell gestellt. Während ein Umgebungsmodell zur Kollisionsvermeidung oftmals nur eine rudimentäre Abschätzung von Hindernissen benötigt, ist für die Detektion von Änderungen eine detaillierte Modellierung notwendig. Zusätzliche Anforderungen werden, je nach Anwendung, an die Laufzeit zur Bestimmung des Modells gestellt. Der Beitrag stellt daher verschiedene Filtervariationen zur Verbesserung der Laufzeit unter Berücksichtigung des Genauigkeitsverlustes vor. Des Weiteren wird eine Methode zur Bestimmung einer 3D Informationsverteilung in einem voxelbasierten Umgebungsmodell zur Diskussion gestellt.

Verschiedene Umgebungsmodelle nutzen zur Darstellung im Arbeitsraum variierende Datenstrukturen. Eine verbreitete Methode sind voxelbasierte Umgebungsmodelle wie *OctoMap* [1]. Dabei wird eine Octree-Repräsentation gewählt, welche es ermöglicht effizient variierende Auflösungen zu verwenden, in dem weitere Voxel hinzugefügt werden, sobald dies nötig wird. Eine Variation der *OctoMap* stellt die *UFOMap* dar. Diese erlaubt zusätzlich zur Modellierung freier und belegter Voxel auch die explizite Modellierung unbekannter Voxel [2]. Die Kenntnis über unbekannte Voxel ist für eine Informationsverteilung von Bedeutung, da dort ein höherer Informationsgewinn erwartet wird. In der Voxelkarte werden anschließend mit Hilfe eines Raycastings Perspektiven ausgewertet, um einen Informationsgewinn für jede Perspektive zu bestimmen. Dabei werden mögliche Perspektiven oftmals zufällig gesampelt und die Informationsgewinne der Perspektiven sequentiell bestimmt, was zu hohen Laufzeiten führt [3]. Der Informationsgewinn wird auch zur Bestimmung explorativer Trajektorien für Drohnen verwendet, wobei der Fokus dabei auf der Berechnung des lokal erreichbaren Informationsgewinns liegt [6]. Für die Nutzung in Online-Anwendungen der Robotik ist eine effiziente Berechnung der Informationsverteilung nötig, um eine aktuelle Verteilung bei der iterativen Trajektorienplanung bereitzustellen.

Im Folgenden werden Filtervariationen präsentiert und hinsichtlich der Genauigkeit sowie der Laufzeit einer *OctoMap* evaluiert. Eine hohe Frequenz zur Erzeugung des voxelbasierten Umgebungsmodells ist dabei von Bedeutung, da die Umgebung eines Roboters sich fortwährend ändert und für eine echtzeitfähige Informationsverteilung ein aktuelles Modell vorliegen muss. Zur Reduktion der Laufzeit werden daher ein Voxel-Filter und ein Outlier-Filter aus der *Point Cloud Library* [4] auf die Punktwolke einer Azure Kinect RGBD Kamera angewendet, um die Anzahl der zu verarbeitenden Daten zu reduzieren. Des Weiteren ist die wählbare Auflösung der *OctoMap* eine zentrale Größe zur Beeinflussung der Laufzeit. Die zur Berechnung der *OctoMap* verwendete Hardware ist mit einem Intel i5-12600KF mit 3,7 GHz und 32 GB RAM ausgestattet. Für jede Variation wird ein zuvor aufgezeichnetes Datenset abgespielt und die Laufzeit zur Aktualisierung der *OctoMap* gemessen und die finale Voxelkarte gespeichert. Variiert werden dabei die Auflösung der *OctoMap* s_{Oct} sowie die Anwendung der Filter und die Filterparameter. Für das Voxel-Filter wird die Voxelgröße s_{Vox} und für das

Tabelle 1 Laufzeit- und Genauigkeitsergebnisse für verschiedene *OctoMap* Auflösungen s_{Oct} ohne Filter

s_{Oct} [cm]	f_{Oct} [Hz]	N_{OL} [%]	V_{Add} [%]
0,2	0,27		
0,5	0,43	98,90	63,7
1	0,67	99,98	82,2
3	1,33	100,00	94,4
5	1,71	100,00	96,6
7,5	2,05	100,00	98,0
10	2,31	100,00	98,5

Tabelle 2 Laufzeit- und Genauigkeitsergebnisse für verschiedene Filterparameter bei $s_{Oct} = 1$ cm

s_{Vox} [cm]	N_{Out} []	r_{Out} [cm]	f_{Filt} [Hz]	f_{Oct} [Hz]	N_{OL} [%]	V_{Add} [%]
0,5			30	2,27	99,93	81,98
1			30	6,96	99,89	81,82
2			30	21,30	44,16	33,47
	2	10	6	0,71	99,96	82,23
	10	10	4	0,71	99,97	82,25
	2	1	5	0,71	99,97	82,26
	10	1	4	0,71	99,92	82,14
1	2	10	30	6,96	99,89	81,86

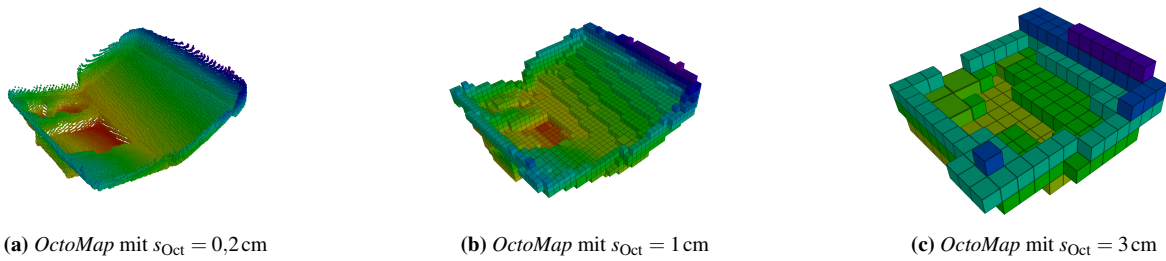


Abbildung 1 Vergleich verschiedener *OctoMap* Auflösungen

Outlier-Filter werden die Anzahl der Nachbarn N_{Out} sowie der Radius der Nachbarschaft r_{Out} variiert. Tabelle 1 zeigt die Laufzeit- und Genauigkeitsergebnisse unter Variation der Auflösung der *OctoMap* s_{Oct} ohne Nutzung der Filter. Die Frequenz der *OctoMap* f_{Oct} steigt mit wachsendem s_{Oct} , da die Erstellung der *OctoMap* weniger Voxel bestimmt. Zur Evaluation der Genauigkeit werden die *OctoMaps* mit $s_{\text{Oct}} > 0,2\text{ cm}$ mit der *OctoMap* mit $s_{\text{Oct}} = 0,2\text{ cm}$ verglichen. N_{OL} bestimmt dabei den Anteil an Voxelmittelpunkten der *OctoMap* mit $s_{\text{Oct}} = 0,2\text{ cm}$, welche in Voxeln der niedrig auflösenden *OctoMap* liegen. V_{Add} berechnet den Anteil des zusätzlichen Volumens der niedrig auflösenden *OctoMap* im Vergleich zum Referenzvolumen $V_{\text{Ref}} = 0,417\text{ dm}^3$ der hochauflösenden *OctoMap* mit $s_{\text{Oct}} = 0,2\text{ cm}$ relativ zum Gesamtvolumen V_k der niedrig auflösenden *OctoMap*: $V_{\text{Add}} = (V_k - V_{\text{Ref}})/V_k$. Bei einer Auflösung von $s_{\text{Oct}} \geq 3\text{ cm}$ werden alle Referenzvoxel abgedeckt. 94,4 % des Gesamtvolumens V_k bei $s_{\text{Oct}} = 3\text{ cm}$ entfallen aber auf ein zusätzliches Volumen. Ein wachsendes s_{Oct} deckt zwar mehr Referenzvoxel ab, belegt aber zusätzlichen Arbeitsraum. Dies kann beispielsweise dazu führen, dass ein Roboter sich zu beobachtenden Objekten nicht mehr weiter nähern kann, da das Umgebungsmodell einen größeren Bereich als belegt markiert. Bild 1 zeigt die *OctoMap* für verschiedene Auflösungen s_{Oct} . Zur Untersuchung des Filtereinflusses werden die Filterparameter s_{Vox} , N_{Out} und r_{Out} für $s_{\text{Oct}} = 1\text{ cm}$ variiert und Tabelle 2 zeigt die Laufzeit- und Genauigkeitsergebnisse. Die Metriken N_{OL} und V_{Add} werden dabei auf die Referenzdarstellung mit $s_{\text{Oct}} = 0,2\text{ cm}$ bezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Voxelfilter die Frequenz der *OctoMap* erhöht, da weniger Punkte verarbeitet werden müssen. Bei der Auslegung des Voxelfilters sollte beachtet werden, dass die Voxelgröße s_{Vox} kleiner als die Auflösung der *OctoMap* s_{Oct} gewählt wird, da ansonsten Punkte gefiltert werden, welche zu fehlenden Voxeln in der *OctoMap* führen (vgl. Tab. 1 Zeile 3 und Tab. 2 Zeile 1-3). Das Outlier-Filter reduziert die Frequenz f_{Oct} , da bereits die Frequenz f_{Filt} der gefilterten Punktwolke für alle vier Konfigurationen zwischen 4 Hz bis 6 Hz liegt. Somit ist das Outlier-Filter für eine online Umgebungsmodellierung nicht geeignet, da die Frequenz deutlich sinkt (vgl. Tab. 1 Zeile 3 und Tab. 2 Zeile 4-8). Weitere Experimente zeigen, dass sich vergleichbare Resultate für die Variation der Filterparameter auch bei der Nutzung der *UFOMap* ergeben. Die Auswahl einer geeigneten Voxelauflösung ist an die entsprechende Applikation sowie Umgebung anzupassen.

Zur Bestimmung einer Informationsverteilung wird ein Raycasting für verschiedene Perspektiven durchgeführt und die Anzahl der unbekanntem Voxel in der Perspektive bestimmt. Eine mögliche Erweiterung der Informationsverteilung ist die Berücksichtigung des Sensormodells unter Anwendung der Fisher-Information [5]. Für eine effiziente Implementierung, die eine hohe Anzahl an Perspektiven in kurzer Zeit auswerten kann, wird eine parallele Implementierung des Raycastings angestrebt. Durch Nutzung einer GPU kann eine solche Parallelisierung erreicht werden, indem rechenintensive Operationen parallelisiert auf der GPU ausgeführt werden. Erste Experimente zeigen dabei eine Zeitreduktion um bis zu Faktor 70 im Vergleich zur sequentiellen Ausführung auf der CPU zur Berechnung einer Informationsmetrik in einer *UFOMap*.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung des Projektes durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Projektnummer 497071854).

Literatur

- [1] Hornung, A.; Wurm, K. M.; Bennewitz, M.; Stachniss, C.; Burgard, W.: *OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees*. Autonomous Robots. (2013), Volume 34-3, S. 189-206.
- [2] Duberg, D.; Jensfelt, P.: *UFOMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework that embraces the unknown*. IEEE Robotics and Automation Letters. (2020), Volume 5-4, S. 6411-6418.
- [3] Santos, J.; Oliveira, M.; Arrais, R.; Veiga, G.: *Autonomous scene exploration for robotics: A conditional random view-sampling and evaluation using a voxel-sorting mechanism for efficient ray casting*. Sensors. (2020), Volume 20-15, S. 4331.
- [4] Rusu, R. B.; Cousins, S.: *3D is here: Point cloud library (PCL)*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 9-13 Mai 2011 Shanghai, China. S. 1-4.
- [5] Zhang, Z.; Scaramuzza, D.: *Fisher information field: An efficient and differentiable map for perception-aware planning*. <https://arxiv.org/pdf/2008.03324>. (2020), S.1-18.
- [6] Liang, L.; Redondo, C.; Campoy P.: *Optimal frontier-based autonomous exploration in unconstructed environment using RGB-D sensor*. Sensors. (2020), Volume 20-22, S. 6507.

Intelligente Fertigung 4.0: Digitale Zwillinge, Autonome Roboter und Anomalieerkennung im Fokus der Zukunftstechnologien

Intelligent manufacturing 4.0: Digital twins, autonomous robots and anomaly detection at the center of future technologies

Sophie Charlotte Keunecke* M.Sc., keunecke@igmr.rwth-aachen.de

Shuai Qiao* B.Sc., qiao@igmr.rwth-aachen.de

Mathias Hüsing* Prof. Dr.-Ing., huesing@igmr.rwth-aachen.de

Burkhard Corves* Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c., corves@igmr.rwth-aachen.de

*RWTH Aachen University, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, 52062 Aachen, Deutschland

Kurzfassung

Im Zuge der stetig steigender Rechenleistung sowie der Triebkraft der Digitalisierung und Vernetzung entfaltet sich die vierte industrielle Revolution Industrie 4.0 (I4.0) und bringt eine Vielzahl neuer Konzepte und Technologien hervor, wie etwa dem Digitalen Zwilling (engl. 'digital twin') (DT), Cyber-physische Systeme (CPS), Autonome mobile Roboter (AMR) und intelligente Fabriken [Gil16] [WWZ16]. Vor diesem Hintergrund hat die Fusion von DT-Technologien und Multisensordaten im Bereich der autonomen mobilen Roboter in den letzten Jahren große Aufmerksamkeit erregt. Diese Entwicklung spiegelt nicht nur den technologischen Fortschritt wider, sondern illustriert auch tiefgehend die Vorreiterstellung moderner Intelligenzkonzepte wie I4.0. Das Kernkonzept von I4.0 besteht darin, das Internet der Dinge, Big-Data-Analysen sowie künstliche Intelligenz und andere fortschrittliche Technologien nahtlos in die Fertigungsindustrie zu integrieren, um einen intelligenten und digitalen Aufstieg der Industrie zu realisieren.

Inmitten dieses beispiellosen technologischen und konzeptuellen Wandels kommt den autonomen mobilen Robotern als unverzichtbarer Bestandteil von I4.0 eine weitreichende Bedeutung zu. Seine Wirkung erstreckt sich nicht nur auf die Effizienzsteigerung von Fertigungsprozessen, sondern deckt auch eine Reihe von bedeutenden Herausforderungen ab, darunter die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Fertigung [GAV17].

Heute sind diese Roboter in Unternehmen, Industrie, medizinischen Einrichtungen, Forschungsinstituten, in der Landwirtschaft sowie in privaten Haushalten bereits weit verbreitet und eröffnen faszinierende Entwicklungsperspektiven [AH20]. Mit zunehmendem technologischem Fortschritt übernehmen mobile Roboter Aufgaben wie Transport, Überwachung, Exploration und sogar Rettungseinsätze. Dieser Fortschritt führt zu einem erhöhten und dringlicheren Bedarf an intelligenten Fähigkeiten und Funktionalitäten. Diese vielfältigen Anwendungsfelder bieten eine Fülle von Möglichkeiten für die Entwicklung von Robotertechnologien und erhöhen gleichzeitig die Anforderungen an Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit. Ob in der Industrie oder in anderen Bereichen, autonome mobile Roboter zeigen ein erhebliches Potenzial und leisten bedeutende Beiträge zur Förderung des technologischen Fortschritts und zur Verbesserung des menschlichen Lebens.

Am Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik wird an der Anwendung von DT und der Erkennung von Anomalien geforscht. Mit Hilfe von DT können Effizienzlücken identifiziert und geschlossen werden, was zu einer Optimierung der Ressourcennutzung führt. Im Zuge des durch das Horizon Europe Programm der Europäischen Union geförderten Projects „Masterly“ [MAS23] entwickelt das IGMR digitale Zwillinge mobiler Roboter in verschiedenen Produktionsschritten. Der Fokus liegt hierbei auf der Erkennung von Anomalien während der Durchführung von geplanten Transport- und Bewegungsprozessen.

Die Anomalieerkennung bezieht sich auf den Prozess des Identifizierens von Mustern in Datenbanken, die nicht mit dem erwarteten Verhalten korrelieren (vgl. [CBK09]). Im Rahmen von Industrie 4.0, wo digitale Technologien und Automatisierung die Fertigungsprozesse umgestalten, gewinnt die Gewährleistung der Abwesenheit von undefinierten oder unerwarteten Ausreißern in Prozessmetadaten an besonderer Bedeutung. Anomalien können in verschiedenen Bereichen erhebliche Auswirkungen haben und dienen als Indikatoren für kritische Ereignisse oder Probleme. Im Bereich der Cybersicherheit können anomale Muster auf potenzielle Sicherheitsverletzungen hinweisen, im Gesundheitswesen können abweichende MRT-Bilder auf Tumore hinweisen, und Anomalien in Kreditkartentransaktionsdaten können entscheidend sein, um Diebstahl zu erkennen [CBK09]. In den letzten Jahren gibt es einen starken Trend technische Maschinen, von einzelnen Maschinen bis hin zu kompletten Gebäuden und Fertigungsanlagen, mit Sensoren auszustatten, um deren Betrieb ständig zu überwachen, insbesondere im Kontext der Industrie-4.0-Strategien [PI17]. Generell sollten Komponentenausfälle oder vollständige Systemausfälle vermieden werden, da dies die Funktionsweise der Maschinen erheblich beeinträchtigt



und zu erheblichen Kostensteigerungen bei Wartung, Überholung und Reparatur (MRO) führt. In vielen Situationen können Vorläufer von Komponentenausfällen in den Zeitreihen der gemessenen Sensordaten beobachtet werden, und präventive Instandhaltungsansätze versuchen, dies zu nutzen, um die Ausfallzeiten und Kosten für die MRO zu reduzieren [CVF19]. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Ansätze sind robuste und zuverlässige Methoden zur Anomalieerkennung, die in realen Umgebungen funktionieren. [CSS21].

Insgesamt bietet die Forschung zu digitalen Zwillingen die Chance, wegweisende Technologien und Methoden zu entwickeln, die die Art und Weise, wie Produkte hergestellt, betrieben und gewartet werden, grundlegend verändern können. Es geht darum, die Potenziale dieser Technologie vollständig zu verstehen und ihre praktischen Anwendungen zu optimieren.

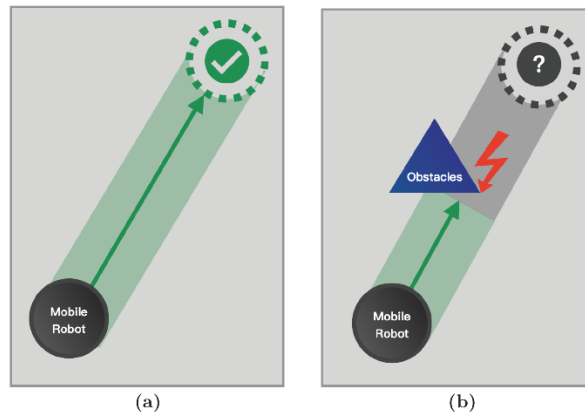


Bild 1 Zwei mögliche Bedingungen bei der Anomalieerkennung: (a) kein Hindernis und (b) mit Hindernis

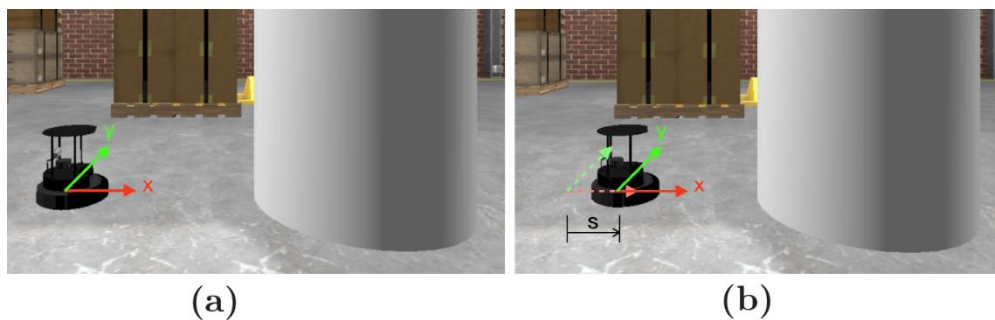


Bild 2 Anomalie Erkennungen der Bewegungsplanung und Durchführung: (a) Startposition und (b) Erkennung des Hindernisses.

Literatur

- [AH20] Alatise, M. B.; Hancke, G. P.
A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods
In: IEEE Access, 8 (2020), S. 39830–39846.
- [CBK09] Chandola, V.; Banerjee, A.; Kumar, V.
Anomaly detection
In: ACM Computing Surveys, 41 (July 2009) 3, DOI 10.1145/1541880.1541882,
<https://doi.org/10.1145/1541880.1541882>, pp. 1–58.
- [CSS21] Castellani, A.; Schmitt, S.; Squartini, S.
Real-World Anomaly Detection by Using Digital Twin Systems and Weakly Supervised Learning
In: IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 17, no. 7, pp. 4733-4742 (2021)
doi: 10.1109/TII.2020.3019788.
- [CVF19] Carvalho, T. P.; Soares, F. A. A. M. N.; Vita, R.; Francisco, R. d. P.; Basto, J. P.; Alcalá, S. G. S.
A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance
In: Computers & Industrial Engineering, Volume 137, November 2019
- [GAV17] Gonzalez, A. G.; Alves, M. V.; Viana, G. S.; Carvalho, L. K.; Basilio, J. C.
Supervisory control-based navigation architecture: a new framework for autonomous robots in industry 4.0 environments
In: IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14 (2017) 4, S. 1732–1743.

- [Gil16] Gilchrist, A.
Industry 4.0: the industrial internet of things
Springer, 2016.
- [MAS23] Masterly Projekt; von der Europäischen Union im Rahmen des Programms "Horizont Europa" unter der Finanzhilfvereinbarung N. 101091800 finanziert
<https://www.masterly-project.eu/partners/>
- [PI17] Preuveneers, D.; Ilie-Zudor, E.
The intelligent industry of the future: A survey on emerging trends, research challenges and opportunities in Industry 4.0
In: Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, 2017
- [WWZ16] Wang, S.; Wan, J.; Zhang, D.; Li, D.; Zhang, C.
Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination
In: Computer networks, 101 (2016), S. 158–168.

Realisierung eines funktional determinierten Produktentstehungsprozesses für die roboterbasierte additive Fertigung

Realization of a functionally determined product development process for robot-based additive manufacturing

Mark Witte*, Markus Schmitz*, Ruben Grunau*, Jan Wiartalla*, Burkhard Corves*, Mathias Hüsing*, Wilko Natzel**, Thilo Zerwas**, Julius Nehring-Wirxel***, Leif Kobbelt***

*RWTH Aachen University, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, Eilfschornsteinstraße 18, 52062 Aachen, Deutschland

{witte, schmitzm, grunau, wiartalla, corves, huesing}@igmr.rwth-aachen.de

**RWTH Aachen University, Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung, Schinkelstraße 10, 52062 Aachen, Deutschland

{wilko.natzel, thilo.zerwas}@imse.rwth-aachen.de

***RWTH Aachen University, Visual Computing Institute, Lehrstuhl für Informatik 8, Ahornstraße 55, 52074 Aachen {nehring-wirxel, kobbelt}@cs.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Die additive Fertigung (AF) bietet die Möglichkeit, komplexere Geometrien als mit herkömmlichen Herstellungsverfahren zu fertigen. Das meistverbreitete Verfahren ist dabei das Fused Layer Manufacturing (FLM). Bei diesem Verfahren wird Material in parallelen Schichten aufgetragen, wodurch sich anisotrope Festigkeitseigenschaften im Bauteil ergeben. In diesem Beitrag wird das Projekt FunkDAF der RWTH Aachen vorgestellt, in dem ein vollständiger Produktentstehungsprozess bestehend aus Konstruktion, Prozessverarbeitung und Fertigung entwickelt wird. Dabei soll das FLM-Verfahren zu einer 6-dimensionalen schichtlosen AF weiterentwickelt werden. Über Ansätze des Generative Design wird in der Konstruktion ein Bauteil basierend auf Wirkflächen und Leitstützstruktur erzeugt. In der folgenden Prozessvorbereitung werden aus dem Bauteil unter Berücksichtigung von Belastungen kraftpfadoptimierte Extrusionstrajektorien für die Fertigung berechnet. In der Fertigung wird das Bauteil mit den Extrusionstrajektorien durch einen 6D-Handhabungsprozess gefertigt. In diesem Beitrag wird eine erste prototypische Implementierung der Prozesskette vorgestellt und Anforderungen an die Schnittstellen des Prozesses abgeleitet.

Abstract

Additive manufacturing (AM) offers the possibility of producing more complex geometries than with conventional manufacturing processes. The most widely used process is fused layer manufacturing (FLM). In this process, material is applied in parallel layers, resulting in anisotropic strength properties in the component. This article presents the FunkDAF project at RWTH Aachen University, in which a complete product development process consisting of design, process processing and production is being developed. The FLM process is to be further developed into a 6-dimensional layerless AM. Generative design approaches are used to create a component based on active surfaces and a guiding support structure. In the subsequent process preparation, force-path optimised extrusion trajectories for production are calculated from the component, taking loads into account. In production, the component is manufactured with the extrusion trajectories using a 6D handling process. This article presents an initial prototype implementation of the process chain and derives requirements for the process interfaces.

1 Einleitung

Die Verfahren der additiven Fertigung (AF) erhöhen im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren Freiheit und Flexibilität. Jedoch bergen die verschiedenen Verfahren der AF auch neue Herausforderungen und Randbedingungen, die während der Konstruktion, Prozessvorbereitung und Fertigung funktionsfähiger Bauteile beachtet werden müssen. Das Fused Layer Manufacturing (FLM) wird typischerweise in einer Fertigungsstrategie realisiert, bei der das Bauteil in zueinander parallelen Schichten durch das sukzessive Hinzufügen von Material in einer vorgegebenen Aufbaurichtung erzeugt wird. Dadurch erge-

ben sich anisotrope Materialeigenschaften aufgrund niedrigerer Haftung zwischen den einzelnen Schichten, die bei Kompromissen hinsichtlich der Aufbaurichtung - beeinflusst durch Anforderungen an Wirkflächen - zu ungünstigen Spannungszuständen führen. Trotz diverser Richtlinien und Konstruktionskataloge [1–3] zur optimalen Bauteilgestaltung in der Konstruktion ist es nur in Ausnahmefällen möglich, die Bauteilanforderungen und mechanischen Eigenschaften bei Fertigungsrestriktionen einfließen zu lassen, da die Druckorientierung meist als Kompromiss zwischen den definierten Wirkflächen gewählt wird. Dieses Defizit ist exemplarisch in **Bild 1** dargestellt.





Bild 1 Prinzipdarstellung des klassischen Produktentstehungsprozesses mit Versagen aufgrund anisotroper Materialeigenschaften

In dem vorliegenden Beitrag wird das Projekt FunkDAF des Instituts für Maschinenelemente und Systementwicklung (MSE), des Visual Computing Instituts (VCI) und des Instituts für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik (IGMR) der RWTH Aachen University vorgestellt. Das Ziel des Forschungsvorhabens ist, das Potential einer funktional determinierten additiven Fertigung (FunkDAF) voll auszuschöpfen, indem ein ganzheitlicher Produktentstehungsprozess bestehend aus Konstruktion, Prozessvorbereitung und Fertigung entwickelt wird (vgl. **Bild 2**).

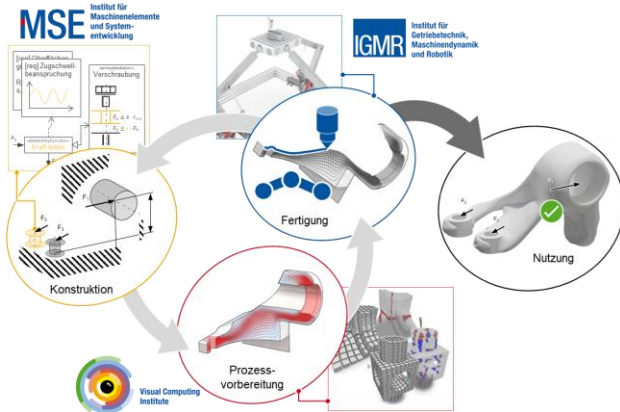


Bild 2 Darstellung der Prozesskette für die schichtlose additive Fertigung von funktional determinierten Bauteilen

Dabei wird das FLM-Verfahren weiterentwickelt und für die 6-dimensionale schichtlose additive Fertigung nutzbar gemacht. In der Konstruktion ist die Funktion eines Bauteils durch Wirkflächen und Leit-Stütz-Strukturen modellbasiert repräsentiert. Um darauf aufbauend mit Generative Design Ansätzen lastgerechte Strukturen zu erzeugen, ist das Ziel der Prozessvorbereitung, aus der geometrischen Bauteilbeschreibung sowie unter der Berücksich-

tigung von Beanspruchungsdaten und des verwendeten Manipulators kraftpfadoptimierte Extrusionstrajektorien zu berechnen. Letztlich ist das Ziel der Fertigung, einen prototypischen 6D-Druck- und Handhabungsprozess mit einem feststehenden Druckkopf zu entwickeln, der in der Lage ist Extrusionstränge räumlich und belastungsoptimiert und -orientiert aufzutragen und das dabei entstehende Bauteil flexibel zu greifen, zu halten und zu führen.

2 Funktional Determinierte Additive Fertigung

Die FunkDAF setzt Zugriff auf den Produktentstehungsprozess voraus. Entlang des in diesem Beitrag vorgestellten Gesamtprozesses greifen die Einzeldisziplinen bereits auf einen umfangreichen Stand der Technik zurück (s. **Bild 3**).

Themen der belastungsgerechten Konstruktion sowie der Maximierung der Haltbarkeit von additiv gefertigten Bauteilen sind bereits gut erforscht und bekannt (vgl. Abschnitt 2.1). Um die AF auch räumlich vollständig vom schichtweisen Aufbau zu lösen und die Pfadplanung unter Belastungs- und Roboter-(Ausführungs-)Anforderungen umzusetzen, müssen mathematische Methoden der räumlich geometrischen Repräsentation eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 2.2). Liegen theoretisch ausführbare Pfade bzw. Trajektorien vor, müssen diese auch tatsächlich ausgeführt werden. Der nachfolgenden Planung liegt ebenfalls eine Vielzahl von Methoden und Erfahrungen der Robotik zugrunde (vgl. Abschnitt 2.3).

2.1 Belastungsgerechte Konstruktion

Eine häufig genutzte Gestaltungsmethode besteht in der Aufstellung von Anforderungen und die darauffolgende Überführung in eine Funktionsstruktur. Anschließend erfolgt eine Übersetzung in Prinziplösungen, die Informationen über physikalische Effekte, Wirkflächen und Material umfassen [4]. Einzelne Wirkflächen der Prinziplösung werden durch die Leitstützstruktur zu einer funktionalen Einheit verbunden [5]. In einer CAD-Umgebung erfolgt abschließend der erfahrungsbasierte Aufbau der Bauteilgeometrie, mit dem Ziel die Fertigungsvorteile von AF-Verfahren bei komplexen Geometrien zu nutzen [6].

Neben dem erfahrungsbasierten Vorgehen werden zunehmend Ansätze zur wirkflächenbasierten Gestaltfindung vorgestellt. Diese Ansätze zielen in der Regel auf eine (teil)automatische Bauteilgestaltung durch den Einsatz von Generative Design Algorithmen ab [7].

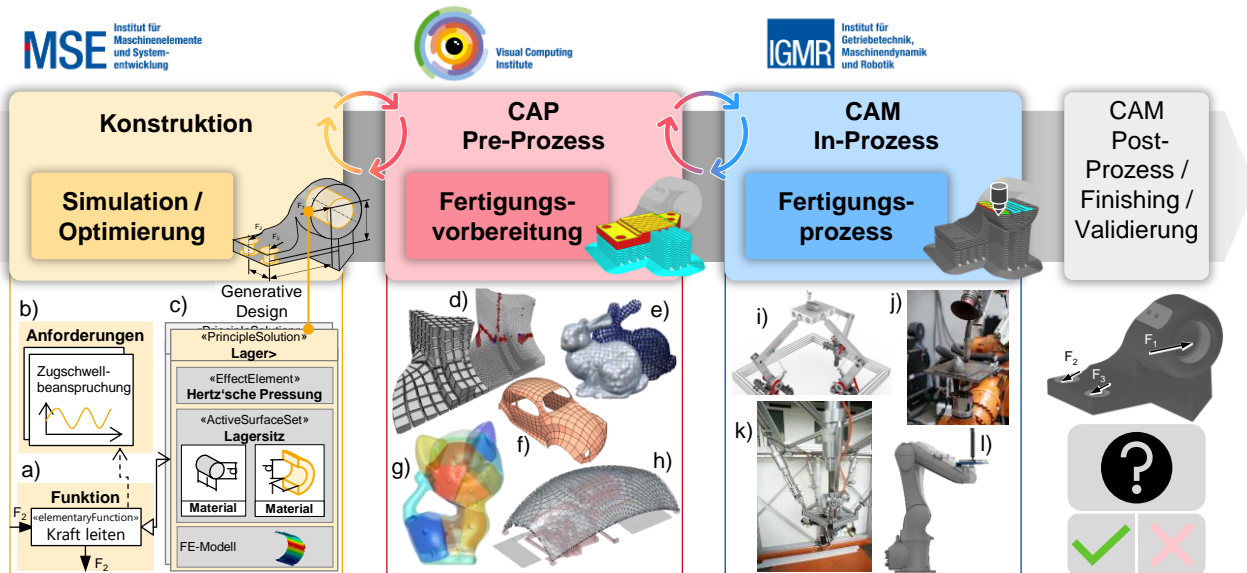


Bild 3 Vorarbeiten der Antragssteller für die Entwicklung eines durchgängigen interdisziplinären Gesamtprozess für die schichtlose additive Fertigung von funktional determinierten Bauteilen

Es existieren noch keine durchgängigen Lösungen, die Informationen aus nachfolgenden Prozessschritten bereits während der wirkflächenbasierten Gestaltfindung bereitstellen, um Konstruierende bei einer holistischen Bauteiloptimierung zu unterstützen. Werden beispielsweise in der Prozessvorbereitung Defizite hinsichtlich der Fertigbarkeit von Geometrien festgestellt, so muss der Konstruktionsprozess zumindest in Teilen iterativ erneut durchlaufen werden. [8]

Die fehlende Durchgängigkeit und der resultierende iterative Charakter der AF-Prozesskette erschweren eine konsequente, funktional determinierte Bauteilgestaltung. Medienbrüche zwischen Expertenmodellen und -tools verhindern heute die formalisierte Rückführung von Restriktionen aus Prozessvorbereitung und Fertigung in die Konstruktion. [9]

Für die FunkDAF ist eine durchgängige Entwicklung notwendig. Vielversprechende Ansätze zur Entwicklung eines solchen Prozesses stellt die modellbasierte Systementwicklung (MBSE) bereit, mit ihren Möglichkeiten der Vernetzung von prozessbegleitenden Expertenmodellen und -tools in einem Systemmodell. Ein solcher MBSE-Ansatz wird durch die Motego-Methode [10] bereitgestellt, welche die konventionellen Ansätze von Koller weiterentwickelt und durch den Aufbau von Modellen in der Systems Modelling Language (SysML) formalisiert und digitalisiert abbildet [11]. Motego zielt auf die modellbasierte Verknüpfung von Anforderungen und Funktionen an Wirkflächen. Außerdem wird von Motego die Einbindung von Expertenmodellen aus allen an der Entwicklung beteiligten Domänen organisiert [12,13].

In Motego werden Funktionsstrukturen in sogenannte „Solution Elements“ überführt, Bild 3 a). Die „Solution Elements“ beinhalten Informationen über physikalische Effekte, Wirkflächen und Material und erlauben die Modellierung funktionaler Wirkzusammenhänge sowie die durchgängige Verknüpfung mit CAE-Werkzeugen [10]. Die Verknüpfung erlaubt die Simulation unter Lasteinwirkung

in einem frühen Stadium der Entwicklung. Weiter können auch fertigungstechnische Einflussgrößen und Restriktionen berücksichtigt werden. Die frühe Verknüpfung der Zusammenhänge ermöglicht eine Entwicklung, in welcher aufwendige Iterationsschleifen, durch die zeitlich versetzte Betrachtung verschiedener Einflüsse im herkömmlichen Entwicklungsprozess vermieden werden.

2.2 Spannungsgeladete Pfadplanung

Bisher sind den Autoren keine Ansätze bekannt, bei denen die Pfadplanung durchgängig kraftpfadgerecht durchgeführt wird. Die sogenannte Multidirektionale additive Fertigung (MDAF) beinhaltet bereits eine Prozessplanung, die den rein schichtweisen Aufbau in unterschiedliche Aufbaurichtungen und unter redundanten Freiheitsgraden ermöglicht. Bei der am IGMR entwickelten Planung werden bereits Roboterinformationen berücksichtigt, um die komplexe Fertigung (hier das Lichtbogenschweißen mit exzentrischer Drahtzuführung) mit unterschiedlichen Aufbaurichtungen zu ermöglichen [14,15]. Eine Planung von belastungsoptimierten Pfaden existiert nicht. Um schichtlose Extrusionstränge - optimiert auf Kraftpfadverläufe - zu planen, müssen entsprechende funktionsrelevante Vorgaben durch das MSE aus der Konstruktion gemacht werden. Diese werden dem VCI als 3-dimensionale Information übergeben.

Am VCI wurden bereits Algorithmen entwickelt, die es ermöglichen, ein Drahtgittermodell ohne Stützstrukturen direkt im Raum zu drucken [16] (s. Bild 3 e)). Dazu wird ein Oberflächengitter zur Pfadsegmentgenerierung erstellt und anschließend eine druckbare Reihenfolge der Segmente bestimmt. Es handelt sich hierbei um eine Vorstufe für dieses Projekt, bei der anstatt eines 3D Volumengitters zunächst noch ein 2D Oberflächengitter genutzt und ein konventioneller 2,5D Drucker eingesetzt wird. Darüber hinaus kann das VCI auf die Arbeiten von Wang et. al. [17] (s. Bild 3 g)) zurückgreifen, durch die die Oberflächenqua-

lität beim 3D Druck verbessert wird, indem das Bauteil automatisch in verschiedene Segmente zerlegt wird, welche dann aus einer optimierten Druckrichtung mit einem 2,5D Drucker gefertigt werden. Des Weiteren existieren Vorarbeiten im Bereich des 3D Hex-Meshings [18] (s. **Bild 3 d**). Dabei wird zu einer Oberflächengeometrie ein volumetrisches Gitter erzeugt, um das Innere des Bauteils mit würfelförmigen Zellen auszufüllen. Mit der Generierung von Quad-Meshes (die 2D-Variante des 3D-Hex-Meshings auf Objektflächen) hat das VCI umfangreiche Erfahrung (z.B. [19], **Bild 3 f**), von den mathematischen Grundlagen bis in die industriellen Anwendungen unter der Beachtung diverser flexibler Nebenbedingungen. Weiterhin relevant ist die Vorarbeit von Musto et. al. [20] (s. **Bild 3 h**). Hier ist das Ziel die Erzeugung einer materialsparenden faltstruktur, die an gegebenen Lasttrajektorien ausgerichtet ist. Der Prozessablauf (FEM-Spannungsanalyse mit Kräften, adaptive Gitter-Generierung, a posteriori Evaluierung) ist ähnlich zu dem hier beschriebenen Vorhaben.

2.3 Multidirektionale Additive Fertigung

Die Fertigung von Kraftwirkungslinien eines expliziten Belastungsfalls, welcher über den ebenen zweidimensionalen Spannungszustand hinausgeht, ist die Abkehr von der planaren schichtweisen Fertigung und entsprechen die Einführung der MDAF als Fertigungsprozess erforderlich. **Bild 4** zeigt eine mögliche Realisierung eines solchen Prozesses.



Bild 4 Rendering einer möglichen Umsetzung des 6-dimensionalen Fertigungsprozesses

Die MDAF erweitert die Möglichkeiten des klassischen 3D-Drucks durch die Einführung von Mehrachs-Systemen und Objektmanipulation. Dies ermöglicht den Aufbau von Bauteilen in verschiedenen Richtungen, überwindet die Beschränkungen des schichtweisen Auftrags und ermöglicht eine größere Designfreiheit in der Konstruktion. Insbesondere das Nutzen von Robotersystemen ermöglicht es, Bauteile mit komplexen Geometrien und Überhängen ohne Stützstrukturen zu fertigen. Die Technologie findet Anwendung in verschiedenen Berei-

chen wie Luft- und Raumfahrt, Medizin und Bauwesen und verspricht, durch die Integration mit anderen Fertigungsverfahren, Effizienz und Präzision der additiven Fertigungsprozesse weiter zu verbessern. Forschungen zeigen die Integration von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren in Roboterzellen zur Effizienzsteigerung und Genauigkeitsverbesserung. Innovative Ansätze umfassen beispielsweise die in-situ Photopolymerisationsprozesse [21], Anti-Gravity Additive Manufacturing [22], und additive Fertigungsprozesse, die durch mobile Roboter und Drohnen [23] unterstützt werden.

Eine Spezifizierung der MDAF stellt die reine Objektmanipulation dar, welche auch den Entwicklungen dieses Vorhabens zugrunde liegt. Dabei wird im Fertigungsprozess ausschließlich das Bauteil manipuliert, während der Druckkopf fest im Arbeitsraum positioniert ist. Dazu werden Manipulatoren mit mehr als drei Freiheitsgraden in Betracht gezogen. Im Folgenden werden einige Konfigurationen vorgestellt:

Isa et al. [24] sowie Hong et al. [25] erweitern in ihren Untersuchungen bestehende 2,5D-Drucker durch einen Zweiachs-Drehtisch, welcher als Druckbett verwendet wird. Durch die beiden zusätzlichen Freiheitsgrade besitzen beide Systeme fünf Freiheitsgrade, wodurch ein nicht-planarer Druck ermöglicht wird. Jedoch ist der Neigungswinkel des Drehtisches in beiden Varianten auf einen Bereich von -90° bis 90° beschränkt, wodurch auch die maximale relative Auslenkung des Druckkopfes zum Druckbett begrenzt ist.

Im Rahmen einer vorangegangenen Arbeit [26] wurde am IGMR ein Aufbau mit sechs Freiheitsgraden entwickelt. Dieser besteht aus einem im Raum fixierten Druckkopf und einem durch einen 6-Achs-Roboterarm bewegten Druckbett. Diese Konfiguration erweitert sowohl den Bewegungsumfang als auch das mögliche Volumen des zu fertigenden Bauteils erheblich. Eine Beschränkung stellt hierbei allerdings mit 6 kg die maximale Traglast des verwendeten Kuka KR6 dar. Abzüglich des Gewichts von Endeffektor und Bauplattform (2 kg) verbleiben noch 4 kg für das zu fertigende Bauteil.

Eine Kombination der oben genannten Konfigurationen stellt die Meltio Robot Cell dar [27]. Dieses marktreife Produkt der Firma Meltio kombiniert einen 6-Achs-Roboterarm mit einem 2-Achs-Drehtisch. Der Druckkopf ist hierbei am Endeffektor des Roboterarms montiert. Durch die Verwendung des Drehtisches kann eine so hohe Traglast erreicht werden, dass diese für den Anwendungsfall keine Beschränkung mehr darstellt (500 kg). Zwar ist diese Konfiguration ursprünglich für den metallischen 3D-Druck mittels Direct Energy Deposition (DED) vorgesehen. Durch die Analogie bei der Zuführung des Materials in Drahtform ist das Konzept jedoch übertragbar. Eine weitere Möglichkeit stellt die Verwendung von 6-Achs-Robotern sowohl für das Führen des Druckkopfes als auch des Druckbetts dar. Eine solche Konfiguration wurde im Rahmen des EpoxySpacePrinter Projekts [28] an der TUHH umgesetzt. Die insgesamt 12 Freiheitsgrade ermöglichen einen signifikant erweiterten Bewegungsumfang.

Da jedoch weniger die absolute Position im Raum relevant ist, sondern vielmehr die relative Position der Endeffektoren zueinander, summieren sich entsprechende Ungenauigkeiten auf. Dadurch wird eine komplexere Bahnplanung erforderlich und das Risiko von Schwingungen, insbesondere bei hohen Traglasten, betrachtet werden.

2.4 Schnittstellen der Einzeldisziplinen

Die in den vorangegangenen Abschnitten eingeführten Einzeldisziplinen der Konstruktion, Prozessvorbereitung und Fertigung verfügen über komplexe Schnittstellen. Zum einen müssen relevante Druckinformationen nach der Er- und Verarbeitung an den nachfolgenden Prozessschritt übergeben werden, um den Druckprozess durchzuführen. Zugleich sind die Disziplinen und damit die Prozessschritte tiefgreifend miteinander verzahnt und tauschen jeweils Informationen und Funktionen mit den anderen Disziplinen aus.

So braucht bspw. die Konstruktion Informationen über das resultierende Druckvolumen, welches durch die MDAF möglich ist. Diese Information wäre beim klassischen 3D Druck in einem klassischen Portaldrucker einfach definierbar. Die nichtlinearen Zusammenhänge der angestrebten räumlichen Pfadplanung und einer redundanten Roboterkinematik lassen jedoch keine pauschale Aussage für beliebige Bauteile zu. Dieses Beispiel steht exemplarisch für die enge Verzahnung, die die Disziplinen bilateral sowie im Gesamtkonsortium kontrollieren müssen.

Kapitel 3 befasst sich daher mit einer initialen, vereinfachten Prozesskette, über welche Erkenntnisse zu den Schnittstellen-Herausforderungen gewonnen werden.

3 Prototyp der Prozesskette

Zu Beginn des Projekts wird eine vereinfachte Prozesskette in einem Demonstrator umgesetzt. Ziel des Demonstrators ist der Aufbau der zentralen Prozessschritte der Bauteilkonstruktion, Prozessvorbereitung und Fertigung sowie deren Schnittstellen untereinander. Anschließend wird die Prozesskette zum Gesamtprozess vervollständigt.

Als erstes Demonstrator-Bauteil wird ein eingespannter Kragarm verwendet, der in einem Lagersitz auf Biegung belastet wird. Mit der vereinfachten Prozesskette wird für den Kragarm eine belastungsoptimierte Bahnplanung generiert. Die einfache Geometrie des Bauteils sowie der zweidimensionale Spannungszustand ermöglichen die Fertigung auf einem konventionellen 2,5D-FDM-Drucker.

Der belastungsoptimierte Kragarm soll anschließend gefertigt und mit einem Bauteil mit konventionell geplanten Extrusionspfaden verglichen werden.

3.1 Konstruktion (MSE)

Für den Demonstrator wird ein funktionsorientiertes Modell des Kragarms nach dem Rahmenwerk von Jacobs et al. aufgebaut [10]. Nach diesem Rahmenwerk wird das Modell mit dem SysML-Sprachprofil Motego entwickelt. Das Modell bietet die Grundlage zur durchgängigen Verknüpfung der funktionalen Anforderungen mit allen Pro-

zessschritten. Dadurch kann domänenübergreifend zwischen Konstruktion, Prozessvorbereitung und Fertigung optimiert werden.

Für das Modell werden die Anforderungen an den Kragarm definiert. Anforderungen an den Kragarm sind beispielsweise Bauraum, Kontaktfläche und aufzunehmende Last. Aus den Geometrieanforderungen wird eine Startgeometrie für die Pfadplanung generiert. Anschließend wird mit den Lastanforderungen ein FE-Modell für die Startgeometrie aufgebaut. Die Spannungsverteilung des FE-Modells wird in der Prozessvorbereitung als Grundlage des ersten Bahnplanungsentwurfs verwendet.

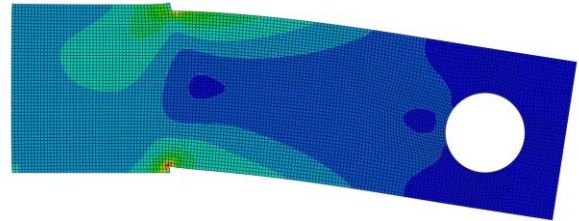


Bild 5 FEM Analyse

3.2 Prozessvorbereitung (VCI)

Der Spannungsverlauf wird in ein tetrahedrales Gitter in 3D, bzw. ein Dreieckgitter in 2D, überführt, dem pro Element ein Spannungstensor zugeordnet ist.

Die Gittererzeugung orientiert sich dabei an den Methoden von Wu et al. [29] und Gao et al. [30]. Zunächst wird jedem Knoten n_i des Gitters per Interpolation der Spannungen der benachbarten Elemente eine Spannung zugewiesen und dessen Eigenwertzerlegung berechnet. Die Eigenvektoren v_{ij} geben die Hauptspannungsrichtungen an, die Eigenwerte λ_{ij} die Magnituden der Spannungen. Lokal beschreiben die Produkte aus Eigenvektoren und Eigenwerten $v_{ij} * \lambda_{ij}$ für jeden Knoten die gewünschte Gitterstruktur. Die Nachbarn $N(n_i)$ von n_i sollten für ein hexahedrales Gitter möglichst nah bei $n_i + \sum_j (v_{ij} * \lambda_{ij} * \{-1, 0, +1\})$ liegen.

Da eine globale Lösung für dieses Problem äußerst herausfordernd ist und es für den 3-dimensionalen Fall noch keine zufriedenstellende Allgemeinlösungen gibt, kommt eine lokale Optimierung nach dem Vorbild von Wu et al. [29] zum Einsatz. Diese verschiebt die Knotenpositionen so, dass die Distanzen zu den optimalen Positionen minimiert werden.

Da dabei einige Gitterpunkte nahezu auf gleiche Positionen rücken entstehen redundante Gitterkanten. Diese werden in einem iterativen Verfahren herausgefiltert und resultieren in der finalen Gitterstruktur.

Durch die lokale Optimierung sind nicht alle resultierenden Zellen Kuboide bzw. Quads. Das Resultat ist ein sog. Hex- bzw. Quad-dominantes Gitter, das für den nächsten Schritt verwendet werden kann. Zum jetzigen Stand des Projekts wurde sich auf ein 2D Gitter als Vorstufe der 3D Gitter fokussiert. Das Gitter für den Kragarm ist in Bild 6 dargestellt.

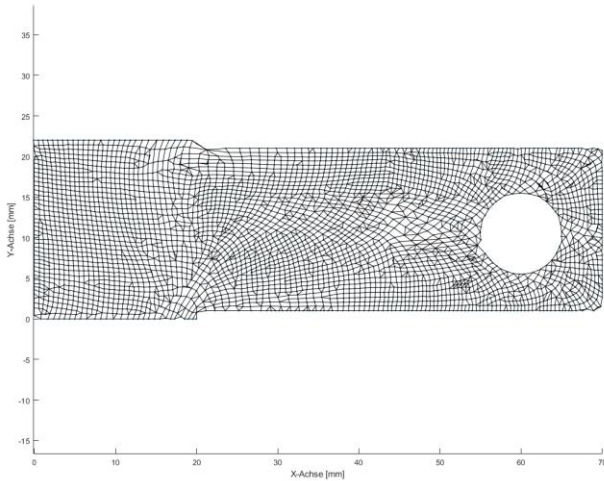


Bild 6 Visualisierung der für den Spannungszustand optimierten Gitterstruktur

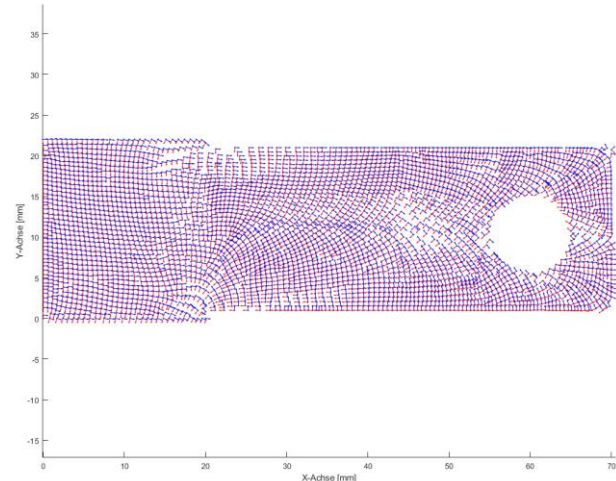


Bild 7 Darstellung der Hauptspannungsrichtungen in den Gitterknoten

3.3 Fertigung (IGMR)

Die vom VCI übergebenen Daten umfassen räumliche Koordinaten, die Hauptspannungsmatrix (Eigenvektoren) und die entsprechenden Eigenwerte eines Gitters.

Die Mesh-Daten dienen zur Generierung visueller Darstellungen von Spannungsmustern und zur Erzeugung von Pfaden basierend auf den dominanten Spannungsrichtungen. Hierbei werden zunächst die Punktkoordinaten mit den zugehörigen Spannungsattributen analysiert, um die dominante Spannungsrichtung in jedem Knotenpunkt zu bestimmen.

Das Erzeugen der Pfade erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Parameter wie der maximalen Entfernung zwischen den Punkten und der maximal zulässigen Winkeländerung zwischen den Verbindungslinien. Dabei werden die Pfade iterativ erstellt, indem benachbarte Punkte ausgewählt werden, die den o.g. Kriterien entsprechen.

Nach der initialen Erstellung der Pfadsegmente werden die offenen Enden mit nahegelegenen Linien verbunden. Dieser Prozess beinhaltet die Prüfung der Nähe und Winkelkompatibilität zwischen den offenen Enden und den vorhandenen Linien, um die Pfade zu verlängern. Das Ergebnis dieses Prozesses ist in **Bild 7** veranschaulicht.

Die konstruierten Pfade werden in OpenSCAD-Code umgewandelt, der weiter zur Visualisierung und Manipulation verwendet werden kann. Jedes Segment des Pfades wird dabei als einzelner Volumenkörper extrudiert. Abschließend wird der OpenSCAD-Code in das STL-Format konvertiert, um für die prototypische Fertigung des Demonstrators zunächst auf konventionelle Slicer und einen handelsüblichen 3D-Drucker zurückgreifen zu können. Aufgrund des zweidimensionalen Spannungszustandes ist eine höhere Anzahl an Freiheitsgraden in der Fertigung nicht notwendig.

4 Ergebnisse und Ausblick

Die vereinfachte prototypische Prozesskette konnte erfolgreich von der funktionsorientierten Bauteildefinition bis hin zur Fertigung durchlaufen werden (s. **Bild 8**). Das Fertigen eines vollständigen Kragbalkens sowie der Belastungsvergleich zu einem konventionell geslicten Balken gleicher Geometrie stellt den nächsten Schritt im Projekt dar.

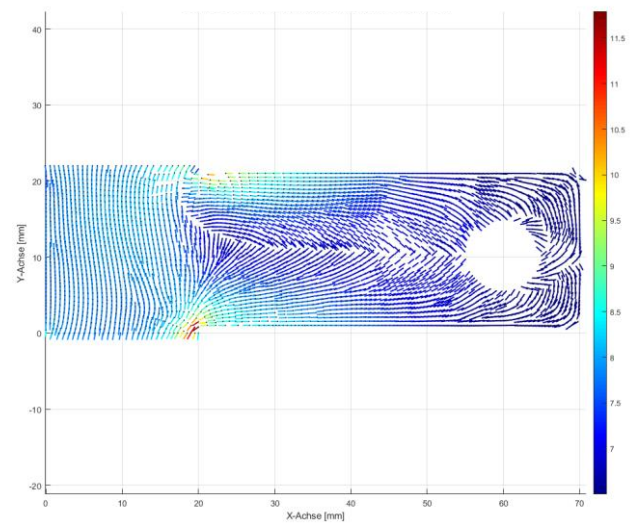


Bild 8 Visualisierung der aus den Hauptspannungen berechneten Pfadsegmente

Im weiteren Projektverlauf werden die folgenden Ziele fokussiert:

Der Konstruktionsprozess kann modellbasiert auf die durchgängige, funktional determinierte Festlegung von Wirkflächen und die konsequente Gestaltfindung mit Hilfe von Generative Design Ansätzen ausgerichtet werden. Restriktionen aus Prozessvorbereitung und Fertigung können in den modellbasierten Konstruktionsprozess eingebunden und bei der Definition von Wirkflächen und Bauteilgeometrien berücksichtigt werden.

Durch ein dreidimensionales hex-dominantes Gitter können Bauteilgeometrie und Spannungsverteilung im Bauteil so abgebildet werden, dass eine weitere Verarbeitung in der Prozessvorbereitung möglich wird. Auf Grundlage des Gitters und der Berücksichtigung von Kinematik, Dynamik und Rekonfiguration des Handhabungssystems (HHS) können schichtlose, belastungsoptimierte Extrusionspfade geplant und ausgeführt werden.

Auf Basis der Extrusionspfade kann mit Hilfe des HHS eine 6-dimensionale schichtlose Fertigung umgesetzt werden. Der redundante Freiheitsgrad des Druckprozesses wird für die Trajektorien-Optimierungen genutzt und steigert beispielsweise die Genauigkeit des Druckprozesses durch Reduktion von Gelenkbewegungen, -geschwindigkeiten und -beschleunigung.

6 Literatur

- [1] DIN EN ISO/ASTM 52910: Additive Fertigung - Konstruktion. Anforderungen, Richtlinien und Empfehlungen. (2020)
- [2] Kumke, M.: Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. (2018)
- [3] Lachmayer, R.; Lippert, R. B.: Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung. Springer Berlin Heidelberg. (2020)
- [4] Koller, R.; Kastrup, N. (1994): Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [5] Matthiesen, S. (2002): Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme (Forschungsberichte / MKL, Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH), Bd. 6).
- [6] McKnight, M. (2017): Generative Design: What it is? How is it being used? Why it's a game changer. In: KEG 2 (2), S. 176. DOI: 10.18502/keg.v2i2.612.
- [7] Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.; Khorasani, M. (2021): Additive Manufacturing Technologies. Cham: Springer International Publishing.
- [8] VDMA (2020): Additive Manufacturing Kunststoff-Pulverbett Automatisierungs - Roadmap: SMART FACTORY.
- [9] Winkler, M.; Jacobs, G.; Spütz, K.; Konrad, C. (2021a): Evaluation of Parts for Additive Manufacturing utilizing System Models of AM Plants. In: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1097 (1), S. 12022. DOI: 10.1088/1757-899X/1097/1/012022
- [10] Jacobs, G.; Konrad, C.; Berroth, J. K.; Zerwas, T.; Höpfner, G.; Spütz, K. (2021): Function-oriented model-based product development. ISBN 978-3-030-78367-9
pre-print. In: Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (Hg.): Methodenbuch.
- [11] Drave, I.; Rumpe, B.; Wortmann, A.; Berroth, J.; Hoepfner, G.; Jacobs, G. et al. (2020): Modeling mechanical functional architectures in SysML. In: Eugene Syriani und Houari Sahraoui (Hg.): Proceedings of the 23rd ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems. MODELS '20: ACM/IEEE 23rd International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems.
- [12] Zerwas, T.; Jacobs, G.; Spütz, K.; Höpfner, G.; Drave, I.; Berroth, J. et al. (2021): Mechanical concept development using principle solution models. In: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1097 (1), S. 12001. DOI: 10.1088/1757-899X/1097/1/012001
- [13] Höpfner, G.; Jacobs, G.; Zerwas, T.; Drave, I.; Berroth, J.; Guist, C. et al. (2021): Model-Based Design Workflows for Cyber-Physical Systems Applied to an Electric-Mechanical Coolant Pump. In: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1097 (1), S. 12004. DOI: 10.1088/1757-899X/1097/1/012004.
- [14] Schmitz, M.; Corves, B.; Hüsing, M. (2020): Multi-direktionale Additive Fertigung: Motivation, Problemstellung und Strategien im Kontext des Schweißens mit Drahtzuführung: Duisburg-Essen Publications Online, University Of Duisburg-Essen.
- [15] Schmitz, M.; Weidemann, C.; Corves, B.; Hüsing, M. (2021): Trajectory Planning Strategy for Multidirectional Wire-Arc Additive Manufacturing. In: Gentiane Venture, Jorge Solis, Yukio Takeda und Atsushi Konno (Hg.): ROMANSY 23 - Robot Design, Dynamics and Control, Bd. 601. Cham: Springer International Publishing (CISM International Centre for Mechanical Sciences), S. 467–475
- [16] Untzelmann, O.; Kobbelt, L. (2018): Near-Constant Density Wireframe Meshes for 3D Printing. In: Stephen N. Spencer (Hg.): Proceedings, SCF 2018. ACM Symposium on Computational Fabrication: Cambridge, MA, June 17-19, 2018. New York, New York: The Association for Computing Machinery, Inc.
- [17] Wang, W. M.; Zanni, C.; Kobbelt, L. (2016): Improved Surface Quality in 3D Printing by Optimizing the Printing Direction. In: Computer Graphics Forum 35 (2), S. 59–70. DOI: 10.1111/cgf.12811
- [18] Lyon, M.; Bommers, D.; Kobbelt, L. (2016): HexEx: Robust Hexahedral Mesh Extraction. In: ACM Transactions on Graphics. SIGGRAPH 2016 (35). Online verfügbar unter <https://www.graphics.rwth-aachen.de/publication/03260/>.
- [19] Lyon, M.; Campen, M.; Bommers, D.; Kobbelt, L. (2019): Parametrization Quantization with Free Boundaries for Trimmed Quad Meshing. In: ACM Transactions on Graphics. SIGGRAPH 2019 (38).
- [20] Musto, J.; Lyon, M.; Trautz, M.; Kobbelt, L. (2019): Beanspruchungsoptimierte Faltungen aus Stahl für selbsttragende Raumfaltwerke. In: Bautechnik 96 (12), S. 902–911. DOI: 10.1002/bate.201900024.
- [21] Li, Xiao; Lian, Qin; Li, Dichen; Xin, Hua; Jia, Shuhai: *Development of a Robotic Arm Based Hy-*

- drogel Additive Manufacturing System for In-Situ Printing*. In: Applied Sciences 7 (1), S.73. (2017)
DOI: 10.3390/app7010073
- [22] LAARMAN, JORIS; Jokic, Sasa; NOVIKOV, PETR. *Anti-Gravity Additive Manufacturing*. In: Fabio Gramazio, Matthias Kohler und Silke Langenberg (Hg.): Fabricate 2014: UCL Press, S. 192–197 (2017)
- [23] Mirjan, Ammar; Augugliaro, Federico; D’Andrea, Raffaello; Gramazio, Fabio; Kohler, Matthias. *Building a Bridge with Flying Robots*. In: Dagmar Reinhardt, Rob Saunders und Jane Burry (Hg.): Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016. Cham: Springer International Publishing, S. 34–47
- [24] Isa, M. A.; Lazoglu, I. *Five-axis additive manufacturing of freeform models through buildup of transition layers* In: Journal of Manufacturing Systems, 50 (2019), DOI 10.1016/j.jmsy.2018.12.002
- [25] Hong, F.; Lampret, B.; Myant, C.; Hodges, S.; Boyle, D. *5-axis multi-material 3D printing of curved electrical traces* In: Additive Manufacturing, 70 (2023), DOI 10.1016/j.addma.2023.103546
- [26] Schmitz, M.: *Roboterbasierte multidirektionale additive Fertigung für das Lichtbogenschweißen mit Drahtzuführung*. Dissertation, RWTH Aachen University, 2023, 10.18154/RWTH-2023-04994
- [27] Multistation SAS MELTIO – Engine Robot, *Additive-Manufacturing* <https://www.multistation.com/en/product/meltio-engine-robot/>
- [28] Kallai, Z.; Dammann, M.; Schueppstuhl, T. *52th International Symposium on Robotics*, December 9-10, 2020, Online-Event, Germany Berlin and Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2020, ISBN 9783800754281
- [29] Wu, J.: *Design and Optimization of Conforming Lattice Structures*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. DOI 10.1109/TVCG.2019.2938946
- [30] Gao, X.: *Robust Hex-Dominant Mesh Generation using Field-Guided Polyhedral Agglomeration*. ACM Transactions on Graphics, Vol. 36, No. 4, Article 114. DOI 10.1145/3072959.3073676

Großrobotik in der maritimen Fertigung

Dipl.-Ing. Steffen Dryba, Fraunhofer IGP,

18059 Rostock, Deutschland, steffen.dryba@igp.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Alexander Jentsch, Fraunhofer IGP,

18059 Rostock, Deutschland, alexander.jentsch@igp.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge, Universität Rostock, Lehrstuhl für Fertigungstechnik,

18059 Rostock, Deutschland, wilko.fluegge@uni-rostock.de

Prof. Dr.-Ing. habil Jan Sender, Universität Rostock, Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik,

18059 Rostock, Deutschland, jan.sender@uni-rostock.de

Kurzfassung

Das Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP befasst sich in enger Kooperation mit der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock mit der anwendungsorientierten Forschung im Bereich Produktions- und Fertigungstechnik. Der Branchenfokus liegt auf dem Schiff-, Stahl- und Windkraftanlagenbau. In diesen Branchen treffen wir immer wieder die gleichen Herausforderungen an. Dazu zählen sehr große Abmessungen, Massen sowie Toleranzen der zu fertigenden Produkte. Zudem haben wir es mit kleinen Losgrößen bis hin zur Unikatfertigung zu tun. Ein bereits über viele Jahre verfolgter Lösungsansatz besteht in der Entwicklung und dem Einsatz von Großrobotersystemen. Wir definieren dabei den Begriff Großrobotik als klassische vertikale Knickarm-Kinematik, die über elektrisch angetriebene Achsen verfügt und in Reichweite und Nutzlast erheblich über die am Markt angebotenen Schwerlast-Robotersysteme hinausgeht. Diese Systeme sollen die Genauigkeit und Steifigkeit von Industrierobotern mit der Reichweite und Leistungsfähigkeit hydraulischer Manipulatoren verbinden und eröffnen damit vielfältige Einsatzmöglichkeiten vor allem im maritimen Umfeld. Dazu zählen die schiffbauliche Vorfertigung, die Bearbeitung von Schiffspropellern und das Fügen von Offshore-Rohrstrukturen. Vertikale Knickarmroboter bieten eine Vielzahl an Lösungen im Nennlastbereich bis 1.000 kg. Einzelne Systeme können bis zu 2.300 kg erreichen. Bestimmte Anwendungen stellen jedoch Anforderungen, die diese Werte übersteigen. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens entstand zwischen 2010 und 2015 für die Montage von Motor-Getriebe-Einheiten in Lkw-Rahmen ein erster Prototyp eines Großrobotersystems, der die Handhabung von bis zu 4.000 kg mit einer maximalen Reichweite von 5.500 mm erlaubt. Um die hierbei entstehenden Lastmomente besonders in den hochbelasteten Achsen 2 und 3 übertragen zu können, sind direkt rotatorisch angetriebene Achsen (einer Kombination von Motor und Stirnrad- oder Planetenradgetriebe zur Roboterachse) nicht geeignet. Aus diesem Grund wurde auf eine Konfiguration mit Koppelantrieben (Abb. 1) zurückgegriffen, die durch Schwerlastlinearantriebe aktuiert werden.

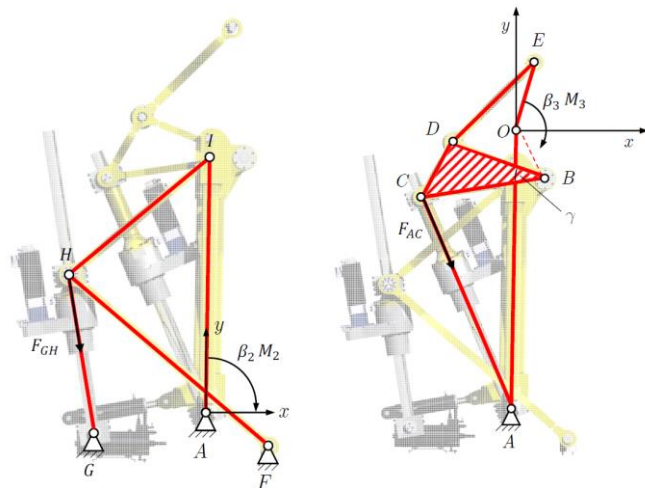


Abb. 1: Kinematisches Konzept Achse 2 (li.) und Achse 3 (mi.) und praktische Umsetzung (re.)

Dieser Aufbau ermöglicht es einerseits die hohen auftretenden Lastmomente zu übertragen und eröffnet andererseits durch eine aufgelöste Struktur und die intelligente Anordnung von Lagerstellen der Koppellemente eine höhere Steifigkeit des Robotersystems. Die geometrischen Parameter der Koppelgetriebe sind dabei Ergebnis von Optimierungsrechnungen bei denen als Hauptkriterium die Minimierung der Spindelbelastung über einen möglichst großen Schwenkbereich der Roboterachse verwendet wurde. Um den Gedanken der Skalierung der vertikalen Knickarmkinematik weiter zu verfolgen, wurde die Handachse als modulare Zentralhand ausgeführt, sodass die Länge des zweiten Armes des Roboters sehr einfach verändert werden kann. Dieses Robotersystem wurde für den Einsatz in der Fertigung von Schiffspropellern ausgerüstet [1] und in einer Applikation zur Bearbeitung von Gussrohlingen in den letzten Jahren

einem umfangreichen Feldversuch unterzogen [2]. Schiffspropeller werden in einem Gussverfahren gefertigt und anschließend mechanisch bearbeitet. Ein Arbeitsschritt, der in der Folge mittels Großrobotik realisiert wurde, ist die Erstellung von bis zu 1.000 Markierungsbohrungen auf der Gussoberfläche. Die Tiefe der Bohrungen bietet dem anschließenden Schleifprozess einen Anhalt, wieviel Material abzutragen ist. Die realisierte Roboterapplikation umfasst dabei die Übernahme von IST-Geometriedaten des Werkstücks, den zusätzlichen Import von CAD-Daten der SOLL-Geometrie des Propellers, die Referenzierung von Werkstück, Roboter und Arbeitsraum zueinander zum Zweck einer automatisch ablaufenden Offline-Programmierung des Roboters. Diese löst die automatische Generierung eines Simulationsmodells der kompletten Roboterzelle inklusive Werkstück, die Optimierung der Propellerausrichtung für eine Maximierung der erreichbaren Bohrpositionen sowie die Kollisionskontrolle. Die Erkenntnisse bei der Umsetzung und dem Feldversuch der Applikation konnten in einem Folgeprojekt für die Weiterentwicklung der Roboterkinematik verwendet werden. Während das System der ersten Generation sich über die Jahre sehr zuverlässig zeigte, ergab sich Verbesserungspotenzial insbesondere in der mechanischen Steifigkeit. Dies und die Erweiterung des Anwendungsspektrums auf Schleifapplikationen gab den Anlass für ein Folgeprojekt zur Entwicklung einer zweiten Generation des Großrobotersystems. Im Rahmen dieser Weiterentwicklung wurden die Parameter der Koppelgetriebe mit dem Ziel optimiert, die Steifigkeit des Gesamtroboters signifikant zu erhöhen. Dazu wurde die mechanische Struktur erheblich verstärkt und nun in einem Aluminiumgussverfahren hergestellt. Dies erweiterte den Designraum, sodass teilweise topologieoptimierte Bauteile [3] (Abb. 2) eingesetzt werden konnten.

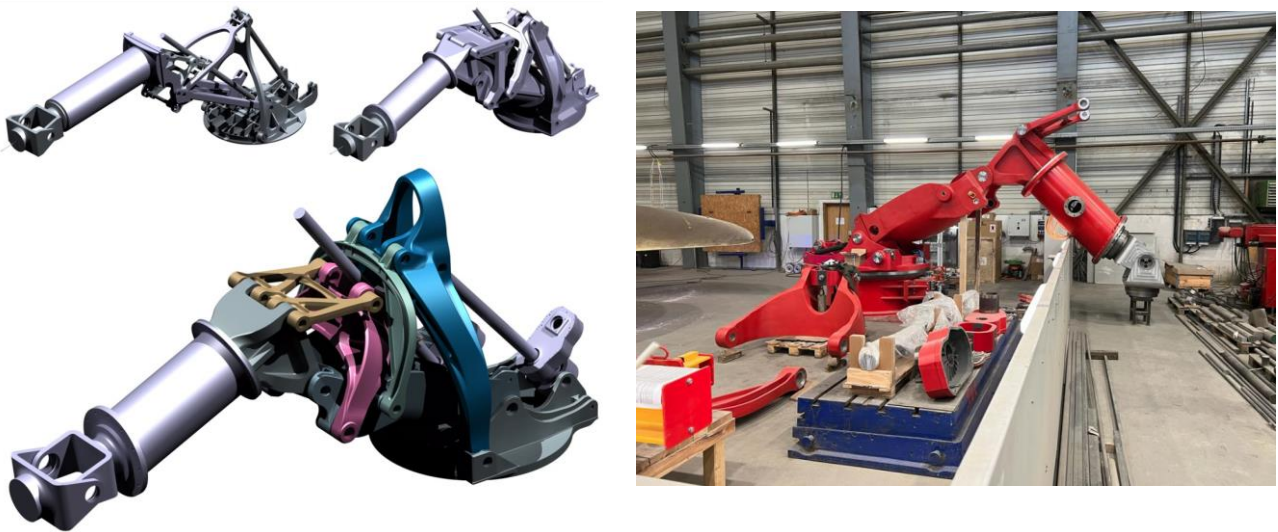


Abb.2: Entwicklung von der ersten zur zweiten Generation (li.) Montage zweite Generation (re.)

In dem vorliegenden Beitrag soll einerseits die Kinematik der ersten Generation als auch die der Zweiten vorgestellt und es sollen der Aufbau der Bohrapplikation sowie die wesentlichen Erkenntnisse des Feldversuchs der Gießerei dargestellt werden. Abschließend wird ein Ausblick auf die in der Zukunft geplanten Entwicklungsschritte gegeben.

Literatur

- [1] Dryba, S, Meißner, J., Wanner, M. und Wurst, O. *Hochpräzises Bearbeiten von Schiffspropellern: Roboterapplikation zum Bohren von tiefengenauen Markierungssacklöchern auf großen Schiffspropellern*. wt Werkstattstechnik online, 2017, 107(3), pp. 182-188.
- [2] Dryba, S., Vinçon, A., Klötzer, C. (2022). *Extra-Large-Scale Robotics: Applications and Advances*. ISR Europe 2022, 54th International Symposium on Robotics, pp. 205-211.
- [3] Jentsch, A., Dryba, S., Klötzer, C., Siegrist, A., Vinçon, A. (2021). *Methodische Strukturentwicklung eines Großroboters*. Forschungsprojekt "FlexGrind"; Research project "FlexGrind". wt Werkstattstechnik Online, 111, S. 628-632.

Planung von Robotersystemen im Schiffbau

Prof. Dr.-Ing. habil Jan Sender, Universität Rostock, Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik,
18059 Rostock, Deutschland, jan.sender@uni-rostock.de

Dr.-Ing. Alexander Zych, Fraunhofer IGP,
18059 Rostock, Deutschland, alexander.zych@igp.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Steffen Dryba, Fraunhofer IGP,
18059 Rostock, Deutschland, steffen.dryba@igp.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge, Universität Rostock, Lehrstuhl für Fertigungstechnik,
18059 Rostock, Deutschland, wilko.fluegge@uni-rostock.de

Kurzfassung

Der Einsatz von Robotern ist im Schiffbau noch nicht so weit fortgeschritten wie in anderen Branchen. Bisher war besonders die Programmierung der Roboter aufgrund der kleinen Stückzahlen und vielfältigen Bauteilgeometrien ein Hemmnis beim Einsatz von Robotersystemen auf Werften. Der Aspekt der Programmierung wird seit einiger Zeit im wissenschaftlichen Kontext durch das Prinzip des sehenden Roboters erfolgsversprechend gelöst und verspricht einen Durchbruch für den weiteren Ausbau der Robotertechnik im Schiffbau [1]. Das Grundprinzip besteht darin, mit einer geeigneten 3D-Sensorik die Bauteilgeometrie zu erfassen und anhand der Messdaten das Roboterprogramm (teil-) automatisiert zu erstellen. Einige Ansätze verfolgen das Prinzip, in den Messdaten konkrete CAD Modelle zu identifizieren. Andere wiederum lösen sich von den CAD Modellen und generieren die Modelle anhand der Messdaten und erzeugen Bauteilgeometrien ohne Vorgabe konkreter CAD Modelle. Erste Anlagen, die dieses Grundprinzip umsetzen, befinden sich bereits erfolgreich in der Anwendung auf Werften.

Neben der Programmierung stellt auch die Auswahl der richtigen kinematischen Konfiguration eines Robotersystems eine Herausforderung dar und muss im Kontext der jeweiligen Anwendung betrachtet werden. Kriterien für die richtige Auswahl der Kinematik sind u.a. die Bauteilgeometrie, die Varianz der Bauteile sowie der geplante Durchsatz der Anlage. Bei der Bauteilgeometrie ist beispielweise die Höhe aufgesetzter Stahlprofile von großer Bedeutung für die Auslegung einer potenziell benötigten zusätzlich z-Achse. Zudem sind die Profilabstände relevant, da sie die Zugänglichkeit stark beeinflussen können. Weiterhin muss der grundsätzliche Prozessablauf analysiert und optimiert werden. Bei den schiffbaulichen Komponenten erfolgt zunächst das mechanisierte Heften der Bauteile. Anschließend werden die gehefteten Teile verschweißt. Durch diese Arbeitsteilung, in die u.a. auch der Scanprozess integriert werden muss, ergeben sich verschiedene Konfigurationen zur Gestaltung des Ablaufes in der Anlage. Eine grundlegende Entscheidung bei der Gestaltung ist, ob es einen Werkstückfluss zwischen den Einzelstationen gibt oder ob die Roboter- bzw. Scansysteme einen größeren Arbeitsraum erhalten und sich entlang der ruhenden Werkstücke bewegen. Im letztgenannten Fall würden sich die Arbeitsstationen in einer definierten Reihenfolge über den Werkstücken positionieren und den Prozessablauf realisieren. Im Falle eines Werkstückflusses, ist eine Transfereinrichtung einzuplanen.

Abbildung 1 zeigt beispielhaft den Aufbau eines Robotersystems für die Anwendung im Schiffbau. In diesem Fall teilen sich zwei Knickarmroboter ein gemeinsames Portal und somit die Längsbewegung als externe Achse. Auf dem Träger des Portals sind dann für jeden Roboter zwei zusätzliche Linearbewegungen in Querrichtung sowie in der Höhe realisiert.

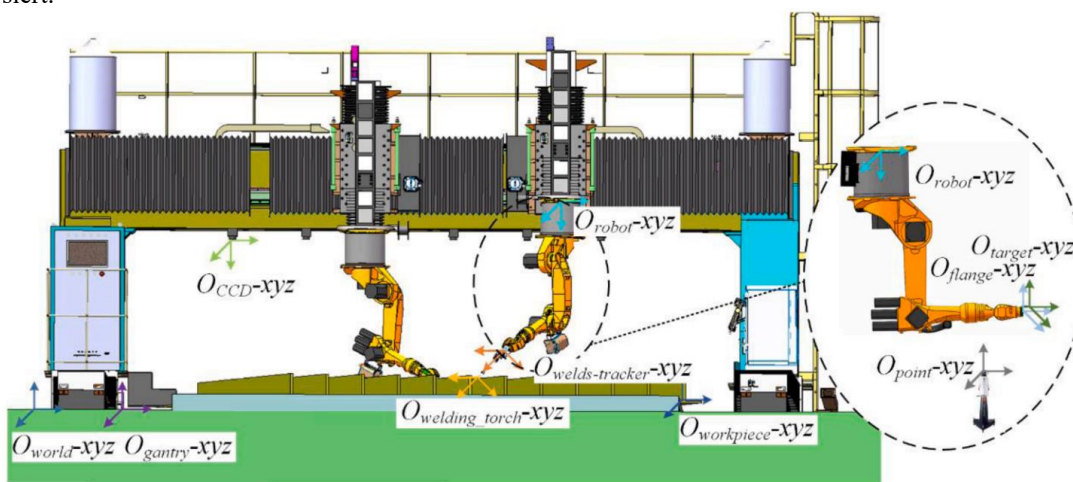


Abb. 1: Beispiel eines Robotersystems für das Schweißen schiffbaulicher Strukturen [2]

Die Auslegung derartiger kinematischer Konfigurationen stellt folglich eine Aufgabe mit vielen Freiheitsgraden dar. Für die zielführende Planung sind Hilfsmittel von entscheidender Bedeutung. Der Artikel gibt dazu zunächst eine systematische Übersicht über eingesetzte Roboterkinematiken im Schiffbau. Der Fokus liegt dabei auf schweißtechnischen Anwendungen für die Herstellung des Schiffsrumpfes. In Anlehnung an die Systematik in [3] erfolgt die Analyse für Roboteranwendungen an offenen Schiffsstrukturen. Es wird aufgezeigt, welche Systeme im Einsatz sind und welche neuen Konzepte derzeit erprobt werden. Dabei wird insbesondere auf die Sensorintegration und die Mensch-Roboter-Kollaboration eingegangen. Darauf aufbauend wird ein Planungsansatz für die Auslegung der Kinematiken beschrieben. Als Basis dafür dienen klassische Softwaresysteme für die kinematische Robotersimulation. Hier lassen sich verschiedene Konfigurationen mit vertretbarem Aufwand erstellen und hinsichtlich der Erreichbarkeit bzw. Kollisionsfreiheit und des Durchsatzes bewerten. Auch die Aspekte der Wirtschaftlichkeit sowie des Flächenbedarfes sind ableitbar. Darauf aufbauend werden Ansätze zur Integration von Sensorsystemen in diese Softwaresysteme vorgestellt. Weiterhin wird der Aspekt der Arbeitssicherheit beleuchtet. Durch die großen Arbeitsräume, die bei Robotersystemen im Schiffbau entstehen, sind geeignete Sicherheitsmechanismen aufzuzeigen, die eine Parallelisierung von manueller Arbeit und automatischem Betrieb ermöglichen. Der Artikel schließt mit einer beispielhaften Anwendung.

Literatur

- [1] Zych, A.: *Programming of Welding Robots in Shipbuilding*. Procedia CIRP (2021) Vol. 99, ISSN 2212-8271, S. 478-483.
- [2] Zheng, C.; An, Y.; Wang, Z.; Wu, H.; Qin, X.; Eynard, B.; Zhang, Y.: Hybrid offline programming method for robotic welding systems. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (2022) Vol. 73, ISSN 0736-5845, S. 1-14.
- [3] Lee, D.: *Robots in the shipbuilding industry*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (2014) Vol. 30/5, ISSN 0736-5845, S. 442-450.

Analytische Bestimmung der Handlingart für die Konzeptfindung von automatischen Be- und Entladeprozessen von Einzelpackstücken

Analytical determination of the handling type for the concept development of automatic loading and unloading processes of single parcels

Erik Möllmann M.Eng., TRAPO GmbH, 48712 Gescher, Deutschland, emoellmann@trapo.de

Prof. Dr.-Ing. Michael Bühren, Westfälische Hochschule, Mechatronik Institut Bocholt, 46397 Bocholt, Deutschland, michael.buehren@w-hs.de

Prof. Dr.-Ing. Tobias Bruckmann, Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Mechatronik, 47057 Duisburg, Deutschland, tobias.bruckmann@uni-due.de

Abstract

Given the inherent trade-offs among high performance demands, cost-effectiveness, and reliability within the field of intralogistics, current automation solutions for loading and unloading single parcels consistently have significant optimization potential. Addressing this challenge, a modular system is under development to tailor the automation approach to the requirements of each application. A pivotal component of this initiative is the establishment of a dependable decision-making process that categorizes the handling type into bulk handling, single handling, and group handling. To facilitate the identification of the appropriate automation concept, a thorough understanding of the process to be automated, coupled with empirical boundary conditions, is essential. Mass handling is employed for robust packages with a preference for high throughput, where a lower fill level is acceptable. Single handling is suitable when the average process time aligns with or falls below the minimum cycle time for parcel movement. Group handling offers increased throughput but is viable only when parcel dimensions match sufficiently. This comprehensive approach ensures a nuanced and effective solution tailored to the specific demands of each scenario.

Kurzfassung

In der Logistikbranche werden zur Optimierung intralogistische Prozesse automatisiert. In den Funktionsbereichen Lagerhaltung, Transport oder Sortierung sind automatische Systeme bereits Stand der Technik. Eine Ausnahme stellt die Handhabung der Pakete im Bereich der Be- und Entladung von Transportfahrzeugen, im Speziellen von Lastkraftwagen und Seecontainern, dar. Trotz vorhandener Automatisierungslösungen ist die Be- und Entladung von Einzelpackstücken im überwiegenden Teil ein manuell durchgeführter Arbeitsschritt.

Eine Betrachtung der aktuell am Markt erhältlichen Systeme zeigt, dass diese zwar potentielle Lösungen für bestimmte Anwendungsfälle sind [1, 2], aber aufgrund des komplexen Arbeitsbereiches bisher eine geringe Marktdurchdringung erreichen. Das Spannungsfeld zwischen Qualität, Zeit und Kosten [3] führt bei der Entwicklung einer allgemein anwendbaren Automatisierungslösung zu einer Kompromisslösung mit erheblichem Optimierungspotential. Dies resultiert aus dem breiten Produktspektrum innerhalb der Logistikbranche, weil so sämtliche Produktarten, -formen, -eigenschaften und weitere Aspekte berücksichtigt werden müssen. Diese Merkmale sind in der Norm DIN ISO 3569 für die Charakterisierung von Stückgüter beschrieben [4].

Alternativ kann mithilfe eines variablen Entwicklungsansatzes das System individuell auf die Bedürfnisse des Anwenders abgestimmt werden. Die sich ergebenden Konzeptlösungen sind stets auf die vorliegende Anwendung optimiert und versprechen somit ein besseres Gesamtergebnis für die einzelne Anwendung [5].

Aufgrund dieser Schlussfolgerung wird in dem vorliegenden Beitrag eine allgemein anwendbare Struktur gesucht, die mittels definierter Eingangsparameter zu einem passenden Lösungskonzept führt. Zu diesen gehören folgende Aspekte: Die geforderte Taktzeit, die Art und die Eigenschaften des Transportmittels, die Charakterisierungsmerkmale des Einzelpackstücks, die Prozessart, die benötigte Handhabungsflexibilität und die Kosten [6]. Im Entwicklungsprozess erfolgt anschließend der Aufbau der Funktionsstruktur [7], die regelbasiert aus den Eingangsparameter abgeleitet werden sollen. Hierfür ist zunächst zu prüfen, ob die Basisfunktion, der eigentliche Handhabungsprozess, unter den genannten Umständen umsetzbar ist. Außerdem ist der analytische Ansatz notwendig, um die Handhabungsart zuverlässig für die Funktionsstruktur zu bestimmen.

Massenhandling ist die effektivste Art, die Handhabung von Paketen hinsichtlich hohem Durchsatz zu realisieren, da die Pakete als chaotisches Schüttgut ohne definierte Pose be- oder entladen werden. Dies führt zu einem quantitativ hohen Durchsatz, jedoch auch zu sehr rauen Handhabungsbedingungen aufgrund möglicher Stürze und Kollisionen. Zusätzlich resultiert die Beladung mittels Massenhandling in einem niedrigeren Füllgrad aufgrund einer chaotischen Verteilung von



starrten Paketen. Daher ist diese Handhabungsart zu vermeiden.

Im Gegensatz zum Massenhhandling erfolgt bei der Handhabungsart Einzelhandling (siehe **Bild 1**) die Bewegung eines Pakets durch einen Roboter. Typischerweise wird hierbei im Stand der Technik ein Knickarmroboter eingesetzt, der das Paket mittels eines Greifers aufnimmt und präzise an den vorgesehenen Ort bewegt. Diese Methode ermöglicht die Optimierung der Packungsdichte innerhalb des Ladevolumens und eine sichere Handhabung des Pakets. Ein Nachteil besteht jedoch im Verhältnis von gehandhabten Paketen zu Robotertakten, da die dynamischen Eigenschaften des Roboters und die Grifftechnik die untere Taktzeitgrenze für den gesamten Prozess festlegen. Diese Handhabungsart ist zu bevorzugen, da sie einen schlanken mechanischen Aufbau verspricht.

Die letzte Handhabungsart, Gruppenhandling genannt, beinhaltet das Greifen mehrerer dimensionsähnlicher Pakete gleichzeitig durch einen Roboter (siehe **Bild 1**). Eine Lagenbildungseinheit ist erforderlich und die Effizienz hängt von der Varianz der Paketdimensionen ab. Eine Optimierung der Taktzeit ist hier möglich, da pro Roboterbewegung mehrere Pakete platziert werden können. Allerdings erfordert insbesondere eine vertikale Lagenbildung eine aufwendigere Gestaltung der Greifeinheit. Bei beiden Handhabungsarten, Gruppen- und Einzelhandling, ist ein Greifprozess während des Paketplatzierungsvorgangs integriert, um die Prozessgenauigkeit und -wiederholbarkeit sicherzustellen. Diese Handhabungsart wird verwendet, wenn ein Einzelhandling aus Zeitgründen nicht anwendbar ist.



Bild 1 Beispiele für Handhabungssysteme mit Einzel-(links) und Gruppenhandling(rechts)
(Quelle: Trapo GmbH, alle Rechte vorbehalten)

Die Ermittlung der anzuwendenden Handhabungsart beginnt mit der Definition von Eingangsvariablen, die aus der bestehenden Applikation abgeleitet werden. Dazu zählt die vorgegebene Prozess- oder Taktzeit für die gesamte Be- oder Entladung. In dieser Zeit wird ausschließlich der reine Handlingprozess betrachtet, ohne Einrichtungsvorgänge zu berücksichtigen. Ein Beispiel hierfür ist der Wechsel des Transportfahrzeugs, wie das Abfahren eines beladenen LKW und die Anfahrt eines neuen. Mit dem vorliegenden Ladevolumen wird anhand des Volumens und der Prozesszeit die durchschnittliche Beladerate ermittelt. Zusätzlich sind Informationen zu den Paketdimensionen und deren Häufigkeitsverteilung erforderlich, wobei der Worst Case, eine Kombination aus vielen kleinen Paketen, besonders berücksichtigt wird. Weitere Parameter wie die minimal realisierbare Taktzeit und eine zeitliche Sicherheitsreserve werden festgelegt und später durch Tests in der realen Anwendung verifiziert.

Nach Kenntnis dieser Eingangsgrößen und Parameter ist eine Entscheidungsfindung hinsichtlich der Handhabungsart möglich. Die Auswahl erfolgt durch die Prüfung, ob der Prozess mittels Einzelhandling realisiert werden kann. Dies wird durch Vergleichsoperationen für jedes Paket und individuelle Prozesszeiten berechnet, basierend auf Volumenanteilen im Vergleich zum Ladevolumen und der gesamten Prozesszeit. Wenn die kalkulierte durchschnittliche Prozesszeit unter der durchschnittlichen Taktzeit und oberhalb der vordefinierten unteren Taktzeitgrenze liegen, gilt der Prozess als realisierbar mittels Einzelhandling. Andernfalls wird überprüft, ob eine Realisierung durch Gruppenhandling möglich ist, indem die Häufigkeitsverteilung der Paketdimensionen auf eine Optimierung durch Lagenbildung geprüft wird. Bei positivem Ergebnis werden iterativ die Prozesszeiten optimiert, und der Handhabungsprozess gilt vorläufig als realisierbar. Die vorläufige Annahme muss im weiteren Verlauf Entsprechend dem Ergebnis wird dann ein Einzel-, Gruppenhandling oder eine Kombination vorgesehen.

Anhand des berechneten Ergebnisses wird die Funktionsstruktur für das Handlingsystem aufgestellt, welche bspw. zu einem Konzept wie in **Bild 1** weiterentwickelt wird. In diesem Fall handelt es sich um ein Beladesystem, welches Pakete mit ähnlichen Grundflächen, aber stark variierenden Höhen handhaben kann. Der Roboter ist hierfür mit einem aktiv drehbarem Greifer ausgestattet, welches eine frontale und oberseitige Aufnahme eines Pakets ermöglicht. Durch diese siebte Achse wird nicht nur ein Aufrichten von Paketen ermöglicht, sondern auch der Arbeitsbereich entscheidend vergrößert. So kann ein kleinerer Roboter verwendet werden, was in einer Gewichts- und Kosteneinsparung resultiert.

Literatur

- [1] Hoppe, Nils and Wilhelm, Jasper and Petzoldt, Christoph and Mortensen Ernits, Rafael and Rolfs, Lennart and Thies, Beinke and Freitag, Michael: *Design eines Robotiksystems zur Entleerung von Seecontainern*. Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik, 2020
- [2] Möllmann, Erik ; Kurtenbach, Stefan ; Bühren, Michael ; Bruckmann, Tobias; DuEPublico: Duisburg-Essen Publications online, University of Duisburg-Essen, Germany (Mitarb.): *Klassifizierung von Automatisierungslösungen für das Handling im Bereich der Be- und Entladung von Einzelpackstücken*. 2023
- [3] GUDEHUS, Timm: *Logistik 1*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012
- [4] *DIN ISO 3569:1978-08, Stetigförderer; Klassifizierung von Stückgut*
- [5] Stoyanov, Todor ; Vaskevicius, Narunas ; Mueller, Christian A. ; Fromm, Tobias ; Krug, Robert ; Tincani, Vinicio ; Mojtahedzadeh, Rasoul ; Kunaschk, Stefan ; Mortensen Ernits, Rafael ; Canelhas, Daniel R. ; Bonilla, Manuel ; Schwertfeger, Soren ; Bonini, Marco ; Halfar, Harry ; Pathak, Kaustubh ; Rohde, Mortiz ; Fantoni, Gualtiero ; Bicchi, Antonio ; Birk, Andreas ; Lilienthal, Achim J. ; Echelmeyer, Wolfgang: *No More Heavy Lifting: Robotic Solutions to the Container Unloading Problem*. In: IEEE Robotics & Automation Magazine 23 (2016), Nr. 4, S. 94-106
- [6] Möllmann, Erik ; Kurtenbach, Stefan ; Bühren, Michael ; Bruckmann, Tobias: *Systementwurf eines Modulbaukastens für die Konzeptionierung von automatischen Be- und Entladeprozessen*. In: 15. Kolloquium Getriebetechnik. 13.-15. September Aachen. Corves, Burkhard (Herausgeber), Hüsing, Mathias (Herausgeber) 2023. ISBN 3-95886-502-X S. 123-129.
- [7] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*. Düsseldorf: Beuth Verlag, 2021

Montagekonzept für Lithium-Ionen-Zellen und dessen Greifsystem

Assembly Concept for Lithium-Ion Cells and its Gripping System

Jonathan Uihlein, B. Eng., Hochschule Heilbronn, Fakultät Mechanik und Elektronik, 74081 Heilbronn, Deutschland, jonathan.uihlein@hs-heilbronn.de

Manuel Schulz, M. Eng., Hochschule Heilbronn, Fakultät Mechanik und Elektronik, 74081 Heilbronn, Deutschland, manuel.schulz@hs-heilbronn.de

Prof. Dr.-Ing. Timo Hufnagel, Hochschule Heilbronn, Fakultät Mechanik und Elektronik, 74081 Heilbronn, Deutschland, timo.hufnagel@hs-heilbronn.de

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dieter Schramm, Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Mechatronik, 47057 Duisburg, Deutschland, dieter.schramm@uni-due.de

Kurzfassung

Die wirtschaftliche Herstellung von Lithium-Ionen-Akkupacks in großen Stückzahlen kann nur durch einen hohen Automatisierungsgrad erreicht werden. Hier werden in der Regel Sondermaschinen verwendet, die auf ein bestimmtes Produkt ausgerichtet sind. Bei dem Montageprozess von Lithium-Ionen-Akkupacks in kleinen Losgrößen sind solche Anlagen meist nicht rentabel. Hier werden die einzelnen Akkuzellen häufig von Hand zu einem Akkupack zusammengesteckt.

Dabei spielt die kontinuierliche Optimierung des Produktionsprozesses eine wesentliche Rolle, um die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen zu sichern. Im Rahmen des Forschungsprojektes *KI AkkuMont* wird dieser händische Montageprozess durch einen kollaborierenden Roboter ersetzt. Mithilfe künstlicher Intelligenz entsteht dadurch ein neuartiger, taktzeitoptimierter und sehr flexibler Montageprozess.

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Entwicklung eines neuartigen Greifsystems und der direkten Zuführung der Lithium-Ionen-Zellen für die bestehende Anlage [1]. Dabei werden die Zellen dem Greifer direkt durch einen Schlauch über eine Zuführeinheit bereitgestellt. Dadurch müssen die Zellen nicht an einer entfernten Position aufgenommen werden, sodass diese zeitintensive Verfahrenswege komplett entfallen. Die gewünschte Polarität kann direkt an der Zuführeinheit realisiert werden. Des Weiteren wird eine neuartige Methode zu der Nachführung der Lithium-Ionen-Zellen sowie eine Optimierung des gesamten Montageprozesses vorgestellt.

Zuführung der Zellen

Für das Bereitstellen einer Lithium-Ionen-Zellen für das Greifsystem, wurde ein Zuführsystem entwickelt, welches diese entsprechend der nötigen Polarität in den Schlauch einführt (Abbildung 1). Dazu werden diese zunächst aus dem teilgeordnetem Stapelmagazin (1) mittels Segmentzuteiler (2) vereinzelt [2]. Die Orientierung der Zellen kann dabei beliebig sein. Der Segmentzuteiler führt die Zellen daraufhin an zwei Schleifkontakten entlang, um die Polung sowie die Zellspannung zu messen und somit die Orientierung zu bestimmen (3). Die nachgeschaltete Orientierungseinheit (4) führt dann die Zelle entsprechend der gewünschten Polarität in den Zuführschlauch (5) ein. Dies geschieht durch einen Drehmechanismus, welcher die horizontal orientierte Zelle 90° in beide Richtungen drehen kann. So können Zellen mit beiden Ausrichtungen dem Greifsystem zugeführt werden. Dadurch können die Zellen in hoher Taktzeit und in gewünschter Polarität in den Schlauch eingeführt werden.

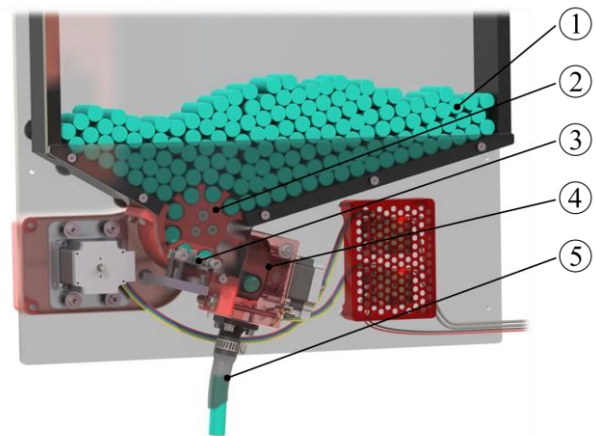


Abbildung 1: Zuführkonzept der Lithium-Ionen-Zellen für das optimierte Greifkonzept

Optimierung des Greifsystems

Mithilfe einem speziell für dieses Montagekonzept entwickelte Zuführsystem für Lithium-Ionen-Zellen wird die Taktzeit stark minimiert. Die Bereitstellung der Zellen erfolgt hierbei lediglich über einen Zuführschlauch, der die Zuführeinheit mit dem am Roboter montierten Greifsystem verbindet.

Bei bestehenden Systemen mit Schlauchzuführung [1] wird eine Auffangvorrichtung benötigt, der die Zellen im Greifsystem positioniert. Diese kann im vorgestellten Verfahren ebenfalls entfallen. Der in Abbildung 2 dargestellte Greif- und Montageprozess stellt den Zyklus des optimierten Greifsystems dar.

Zunächst verfährt das Greifsystem von der zuvor montierten Zelle auf die neue Montageposition (1). Daraufhin wird diese in den Zellhalter montiert (2). Durch Öffnen des Greifsystems fällt die vorgelagerte Zelle (blau) auf bereits montierte Zelle (3). Daraufhin verfährt der Roboter mit dem Greifsystem eine Zellenlänge nach oben (4). Anschließend wird die Zelle gegriffen (5) und eine weitere vorgelagerte wird durch das Zuführsystem bereitgestellt. Am Ende eines Zyklus wird der Greifer leicht angehoben (6), sodass dieser zur nächsten Position verfahren kann. Durch dieses Greifsystems entfällt die komplexe Mechanik und die Verfahrenwege werden weiter minimiert, wodurch eine Taktzeitoptimierung resultiert.

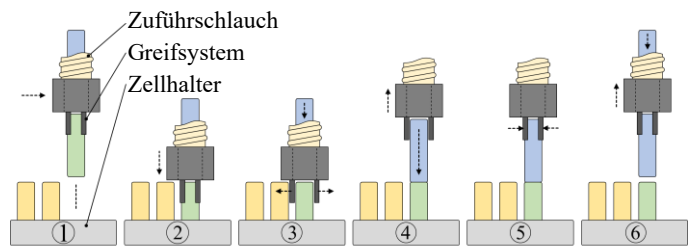


Abbildung 2: Neuer Greif- und Montageprozess zum bestücken der Zellen in die Zellhalter

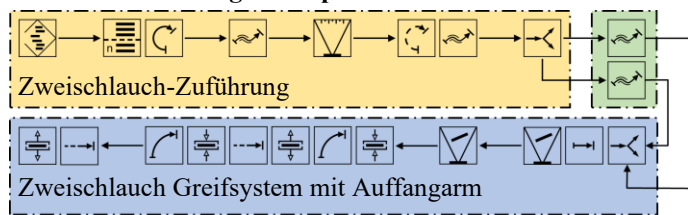
Optimierung des gesamten Handhabungsprozesses

Mit Hilfe von Funktionsplänen lassen sich komplexe Handhabungsvorgänge in ihre elementaren Funktionen gliedern und damit leichter planen, überprüfen und optimieren. Details zur Erstellung solcher Pläne sind in der Richtlinie VDI 2860 [3] beschrieben.

In diesem Abschnitt wird der Montageprozess anhand von zwei Konzepten verglichen. Die bestehende Anlage [1] beinhaltet zwei Schläuche und eine Auffangvorrichtung, die die Zellen im Greifsystem positioniert. Der neue Handhabungsablauf zeigt die erhebliche Vereinfachung, die durch die Optimierung ermöglicht wird. Der Prozess der Handhabung wird in Abbildung 3 dargestellt. In diesem Vergleich wird die Zuführung der Zellen im gelben Teilsystem dargestellt, das Teilsystem der Verbindung durch den Zuführschlauch grün und das Teilsystem des Greifsystems ist blau gekennzeichnet. Durch die Zuführung mit einem Schlauch können alle Teilsysteme deutlich vereinfacht werden. Dadurch wird die Komplexität der Anlage, sowie die potenzielle Fehleranfälligkeit deutlich reduziert. Insbesondere beim Greifsystem entfallen einige zeitaufwändige Elementarfunktionen. Die größte Zeitersparnis ergibt sich durch die Verlagerung der Prozesse in die Zuführeinheit, wodurch robustere und schnellere Systeme zur Bereitstellung einer Zelle möglich sind. Ein weiterer Vorteil, der sich aus der Vereinfachung des Greifsystems ergibt, ist das geringere Gewicht, das am Endeffektor des Roboters hängt.

Das optimierte Montagekonzept in Abbildung 3 lässt sich dabei wie folgt beschreiben: Der erste Schritt umfasst das „teilgeordnete Speichersystem“, in welchem die Zellen vorgelagert sind. Dabei ist eine zufällige Anordnung der Polung der Zellen zulässig (Pluspol vorne / hinten). Die beiden darauffolgenden Elementarfunktionen (Symbol „Abteilen einer unbestimmten Anzahl“ und „drehen“) beschreiben den Entnahmevorgang der Zellen aus dem Magazin. Diese Funktionen werden durch den sich drehenden Segmentzuteiler umgesetzt. Anschließend werden die Zellen zur Messeinheit der Zellspannung geführt („Führen“ und „Messen“). Die Pfeile stellen laut Norm den sukzessiven Ablauf der Elementarfunktionen dar. Durch die Messung der Zellspannung kann die Zelle entsprechend orientiert werden. Dieser Ablauf wird in der Abbildung durch die Funktionen „Orientieren“ und „Führen“ beschrieben. Der Zuführschlauch zwischen Zuführeinheit und Greifsystem wird als separates Teilsystem (grün) betrachtet, weshalb das Symbol „Führen“ mit einem separaten Rahmen versehen ist. Das Teilsystem des Greifers ist in der Abbildung in blau dargestellt. Der oben beschriebene Montageprozess einer Zelle wird mit den Funktionen „Positionieren“, „Spannen“, „Positionieren“ und „Entspannen“ beschrieben.

bestehendes Montagekonzept



optimiertes Montagekonzept

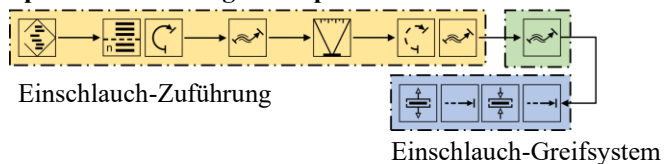


Abbildung 3: Vergleich der Funktionspläne der Handhabungsprozesse nach VDI 2860

Literatur

- [1] M. Schulz, P. Wächter, T. Hufnagel, and D. Schramm, *Entwicklung eines mechatronischen Greifsystem zur Taktzeitoptimierung für die Montage von einzelnen Lithium-Ionen-Zellen in Zellhalter*. Duisburg, Essen: Universität Duisburg-Essen, 2022.
- [2] S. Hesse, *Grundlagen der Handhabungstechnik*, 5th ed. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2020.
- [3] *VDI 2860: 1990-05: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*, Verein Deutscher Ingenieure.

Python-based Toolbox for Generating Rational Single-loop Linkages

Daniel Huczala, Martin Pfurner, and Hans-Peter Schröcker
 University of Innsbruck, Unit of Geometry and Surveying, Innsbruck, Austria
 Corresponding author's email: daniel.huczala@uibk.ac.at

Abstract

In this work, we present an easy-accessible Python package that simplifies the design generation of rational linkages, available as an open-source repository [1] on the Gitlab instance of the University of Innsbruck, Austria. The purpose of the toolbox is to bring the rational linkages closer to engineering applications, for example to deploy them as cheap single-purpose manipulators, when the positioning is done only with a single motor (1 degree of freedom mechanism). The rational motion factorization method introduced by Hegedüs, Schicho, and Schröcker [2] is capable of factorizing a parametric rational curve, which represents a rigid-body motion in the Special Euclidean group $SE(3)$. Most importantly, it can be used for the synthesis of custom mechanisms, since the method allows one to design single-loop linkages as the same authors show in [3], that is, the resulting factors can represent the joint axes of a mechanism.

While the mathematical background is described in the papers mentioned above, the implementation itself may be not straightforward for engineers since it deals with dual quaternions (also known as Study's parameters) and the related algebra, which are not commonly taught at engineering university study programs. Furthermore, if one wants to produce a mechanism from a factorization, converting factors to Plücker/screw coordinates, Denavit-Hartenberg notation, or another representation of a mechanism [4] could be tricky. And probably the crucial problem of industrial deployment of spatial linkages are their self-collisions: purely by means of the kinematics representation parameters it is not possible to analyze and evaluate the suggested design if it is collision-free under the full-cycle motion, while CAD assemblies and kinematic or dynamic analysis are not easy (often even impossible) to perform because of numerical errors and singularities that occur when closing a linkage.

The package presented provides tools that address the problems mentioned above. It uses an open-source implementation of the motion factorization method, i.e. the package BiQuaternionPy [5], which allows calculations to be performed in biquaternion algebra. The Rational Linkages package [1] can visualize the factorization results (mechanism that can be interactively moved), as seen in the figure below. Furthermore, it assesses the self-collisions of the line model, where computations extensively benefit from the rationality of the mathematical model.

The toolbox is still in development; however, a first major release can be found on PyPI repository under the name *Rational Linkages*. Many features are planned to be added, for example, the CAD export interface, direct STL model generation, or a fast collision-free design optimization methodology. All this with the aim of joining the advanced mathematical methods with practical applications via an easy-to-use Python interface.

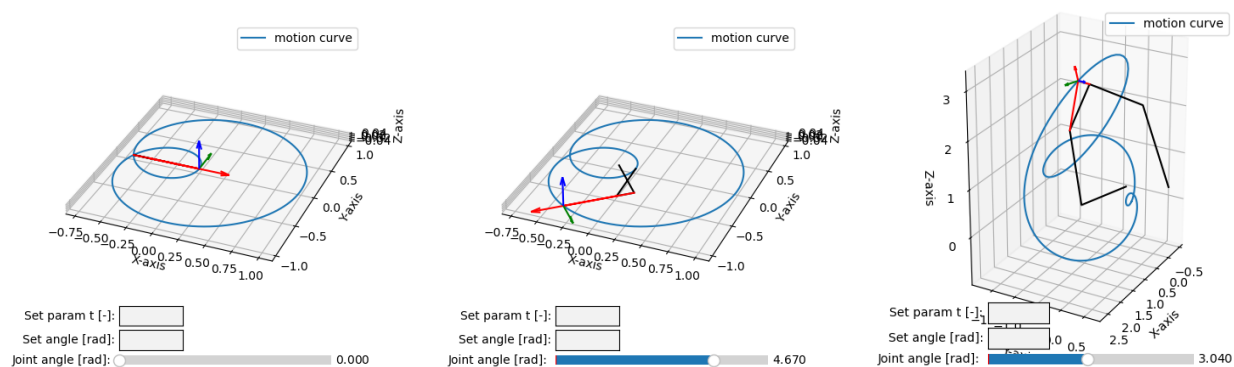


Figure: visualization of the mechanisms in presented toolbox: (left) planar 4-bar mechanism in folded configuration; (center) planar 4-bar in a random configuration; (right) spatial 6-bar in a random configuration.

Literature

- [1] Huczala D.: *Rational Linkages*. Available online at [Accessed on 30th Nov 2023]: <https://git.uibk.ac.at/geometrie-vermessung/rational-linkages>
- [2] Hegedüs, G. and Schicho, J. and Schröcker, H.-P.: Factorization of rational curves in the study quadric. *Mechanism and Machine Theory*, 69 (2013) 142-152. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.05.010. Elsevier BV.

- [3] Hegedüs, G. and Schicho, J. and Schröcker, H.-P.: Four-Pose Synthesis of Angle-Symmetric 6R Linkages. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 7(4), (2015). DOI: 10.1115/1.4029186. ASME International.
- [4] Huczala, D., Kot, T., Mlotek, J., Suder, J., and Pfulner, M.: An Automated Conversion Between Selected Robot Kinematic Representations. In *10th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*, Belval, Luxembourg, 2022, pp. 47-52. DOI: 10.1109/ICCMA56665.2022.10011595.
- [5] Thimm D.: *biquaternion-py*. Available online at [Accessed on 30th Nov 2023]: <https://pypi.org/project/biquaternion-py/>
- [6] Li, Z. and Nawratil, G. and Rist, F. and Hensel, M.: Invertible Paradoxical Loop Structures for Transformable Design. *Computer Graphics Forum*, 39(2) (2020) 261-275. DOI: 10.1111/cgf.13928.

Acknowledgements



Funded by
the European Union

Disclaimer

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Research Executive Agency (REA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Verifikation einer Methodik zur Bestimmung von Bewegungsaufgaben für Fadenlängenkompensationseinheiten an Textilmaschinen

Verification of a methodology for the determination of motion tasks for yarn length compensation units on textile machines

Karsten Gerlach, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Maik Berger

Technische Universität Chemnitz, Professur Montage- & Handhabungstechnik, 09125 Chemnitz, Deutschland, karsten.gerlach@mb.tu-chemnitz.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag werden Entwicklungsschritte für eine hybrid arbeitende Fadenlängenkompensation am Beispiel einer Wirk- bzw. genauer Raschelmachine erläutert. Wie in allen bekannten maschinellen Herstellungsverfahren von strang-/flächenförmigen oder räumlichen Textilien, werden die zu verarbeitenden Fäden auch in diesen Anlagen nicht kontinuierlich verbraucht. Dies bedingt stets den Einsatz von Kompensationseinheiten, um die Schwankungen im Fadenverbrauch auszugleichen und eine definierte Zugkraft im Faden aufrecht zu erhalten. In den genannten Wirkmaschinen werden hierzu in aller Regel einfache Fadenwippen eingesetzt. Diese können im Grunde als federnd aufgehängtes Umlenkrohr im Fadeneinlauf verstanden werden und arbeiten damit rein passiv. Je nach verwendetem Garn, Musterlegung, Maschinendrehzahl, Maschenlänge und vieler weiterer Prozessparameter können dabei die Steifigkeiten der eingesetzten Federn sowie deren Anzahl über die Maschinenbreite variiert werden. In der hier betrachteten Maschine ist die Federauslenkung maßgeblich durch die Schwingbewegung der Grundlegebarren sowie dem Maschenabschlag bedingt und stellt einen limitierenden Faktor für die Maximaldrehzahl der Maschine und damit deren Produktivität dar. Bei Maschinendrehzahlen über 2000 min^{-1} werden die eingesetzten Fadenwippen derart zum Schwingen angeregt, dass keine definierte Zugkraft in den Fäden aufrecht gehalten werden kann. In Folge dessen kommt es zu Fehllegungen, bei welchen einzelne Fäden nicht im richtigen Nadelkopf eingelegt werden oder gar zu Fallmaschen, wodurch keine textile Fläche erzeugt wird. Würde man versuchen, das Aufschwingen der Fadenwippen durch einfache Erhöhung der Federsteifigkeit zu verhindern, steigt auch die Zugkraft im Faden, wodurch dieser wiederum zerreißen würde. Es ist daher bei Erhöhung der Federsteifigkeit gleichzeitig notwendig, die Federauslenkung zu verkleinern, um die Zugkraft im Faden bestenfalls gleich zu halten. Im ersten Entwicklungsschritt soll das bisher rein passiv arbeitende Federsystem zu einem Hybridsystem erweitert werden. Da die Bedarfschwankung im Fadenverbrauch über jeden Rapport identisch ist, wird der Ansatz verfolgt, diese Schwankung zu bestimmen und die Fadenwippe selbst bzw. zusätzliche bewegte Umlenkrohre entsprechend entgegengesetzt des Fadenverbrauchs aktiv zu bewegen. Wenn die Wirkstelle Fadenlänge frei gibt, zieht der aktive Teil des Ausgleichsystems entsprechend der Verbrauchsschwankung am Faden. Entwicklungen für derartige Systeme sind bspw. in [1], [2] und [3] beschrieben. In [4] wurden mit Hilfe von einfachen Mehrkörpersimulationsmodellen (MKS) diese Verbrauchskurven bestimmt. Hierbei wird im MKS-System die maschenbildende Kinematik abgebildet und entsprechend der vorhandenen Musterung in ihrem Bewegungsablauf simuliert. Die Fäden selbst werden lediglich als gestreckte Verbindung zwischen zuvor definierten Messpunkten bspw. an den Grundlegebarren, den Wirknadeln selbst sowie der Abschlagkannte abgebildet. Die sich während der Simulation einer Maschinenumdrehung verändernden Abstände zwischen diesen Messpunkten (Fadenkontakten) können entsprechend ausgewertet und daraus eine angenäherte Funktion für die Fadenbedarfsschwankung abgeleitet werden. Hieraus wiederum lässt sich einfach die Bewegungsaufgabe für den aktiven Teil der Kompensationseinheit ableiten. Die bei diesem Vorgehen getroffenen Vereinfachungen und einhergehende Fehler in den „Messwerten“ werden in Kauf genommen, da sich die Federelemente im Fadeneinlauf ohnehin nicht gänzlich entfernen lassen, da sich bspw. der Maschenabschlag auch in ein und derselben Maschine/Musterung in gewissen Grenzen verändern kann. Dies kann z.B. durch Veränderungen in der Garnqualität, geänderte Garnfeinheit, Texturierung/Avivage und vielen weiteren Prozessparametern, welche bspw. die Reibverhältnisse zwischen Garn und Wirkwerkzeugen beeinflussen, begründet liegen. An diesem Ausgangspunkt knüpft dieser Beitrag an. Die in [4] beschriebene Methodik zur Bestimmung der Fadenlängenänderung kann nach aktuellem Wissensstand nicht für jedes textile Verfahren angewendet werden, da die Messunsicherheit maßgeblich von der Bewegung der jeweiligen maschenbildenden Kinematik abhängig ist. Ziel der im Beitrag vorgestellten Untersuchungen ist es, diesen Messfehler zu quantifizieren und daraus allgemein gültige Handlungsempfehlungen für den Einsatz der Methode abzuleiten. Hierzu wurde die in [4] beschriebene Methodik zur Bestimmung der Fadenlängenänderung durch entsprechende Messversuche an der vorhandenen Raschelmachine geprüft und im Hinblick auf Fehlergröße bewertet. Basierend auf dem Vergleich verschiedener Messverfahren, wie „Messradverfahren“, „Laser-Doppler-Verfahren“, „Laser-Interferenz-Verfahren“ [5], wird der umgesetzte Messaufbau vorgestellt. Mittels diesen nun verifizierten Messergebnissen können erste Aussagen hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit bzgl. der in [4] vorgestellten Methode getroffen und erste Empfehlungen für die Einsetzbarkeit, je nach textilem Verfahren, abgeleitet werden. Dies bildet die Grundlage dafür, einen übergeordneten methodischen Ansatz zur Auslegung unterschiedlichster Fadenlängenausgleichssysteme für wechselnde

Anforderungen abzuleiten, wobei im Beitrag ein erster Ausblick auf ein sich aktuell noch im Aufbau befindliches neuartiges und hybrid-arbeitendes Fadenlängenausgleichssystem gegeben wird.

Abstract

In this article, development steps for a hybrid working yarn length compensation are explained using the example of a warp knitting machine. As in all known machine manufacturing processes for textiles, the yarns to be processed are not consumed continuously in these systems either. This always requires the use of compensation units to compensate for the fluctuations in yarn consumption and to maintain a defined tensile force in the yarn. In the aforementioned warp knitting machines, simple yarn rockers are generally used for this purpose. These can basically be understood as a spring-loaded deflection tube in the yarn inlet and therefore work purely passively. Depending on the yarn used, patterning, machine speed, stitch length and many other process parameters, the stiffness of the springs used and their number can be varied across the width of the machine. In the machine considered here, the spring deflection is largely determined by the oscillating movement of the base guide bars and the stitch knock-off and represents a limiting factor for the maximum speed of the machine and thus its productivity. At machine speeds above 2000 rpm, the thread rockers used are caused to vibrate in such a way that no defined tensile force can be maintained in the threads. This results in misalignments where individual threads are not inserted in the correct needle head or even drop stitches, which means that no textile surface is produced. If an attempt were made to prevent the thread rockers from swinging open by simply increasing the spring stiffness, the tensile force in the thread would also increase, which in turn would cause it to break. When increasing the spring stiffness, it is therefore necessary to simultaneously reduce the spring deflection in order to keep the tensile force in the thread at best the same. In the first development step, the previously purely passive spring system is to be expanded into a hybrid system. As the demand fluctuation in yarn consumption is identical over each repeat, the approach is to determine this fluctuation and to actively move the yarn rocker itself or additional moving deflection tubes in the opposite direction to the yarn consumption. When the effective point releases the thread length, the active part of the compensation system pulls on the thread according to the fluctuation in consumption. Developments for such systems are described, for example, in [1], [2] and [3]. In [4], these consumption curves were determined with the aid of simple multi-body simulation models (MBS). Here, the stitch-forming kinematics are mapped in the MBS system and simulated in their motion sequence according to the existing patterning. The yarns themselves are only mapped as a stretched connection between previously defined measuring points, e.g. on the base guide bars, the knitting needles themselves and the cutting edge. The changing distances between these measuring points (thread contacts) during the simulation of a machine revolution can be evaluated accordingly and an approximate function for the thread demand fluctuation can be derived from this. In turn, the movement task for the active part of the compensation unit can be easily derived from this. The simplifications made in this procedure and some errors in the "measured values" are accepted, as the spring elements in the yarn infeed cannot be completely removed anyway, since, for example, the stitch cast-off can also change within certain limits in one and the same machine/pattern. This can be due, for example, to changes in yarn quality, altered yarn count, texturing/avivage and many other process parameters that influence, for example, the friction conditions between yarn and knitting tools. This article takes this as its starting point. The method described in [4] for determining the yarn length change cannot be used for every textile process according to the current state of knowledge, as the measurement uncertainty is largely dependent on the movement of the respective stitch-forming kinematics. The aim of the investigations presented in this article is to quantify this measurement error and to derive generally valid recommendations for the use of the method. For this purpose, the method described in [4] for determining the change in thread length was tested by means of corresponding measurement tests on the existing Raschel machine and evaluated with regard to the size of the error. Based on the comparison of different measurement methods, such as "measuring wheel method", "laser Doppler method", "laser interference method" [5], the implemented measurement setup is presented. Using these now verified measurement results, initial statements can be made with regard to the achievable accuracy of the method presented in [4] and initial recommendations for its applicability, depending on the textile process, can be derived. This forms the basis for deriving a superordinate methodological approach for designing a wide variety of yarn length compensation systems for changing requirements, whereby the article provides an initial outlook on a novel and hybrid yarn length compensation system that is currently still under construction.

Literatur

- [1] Gerlach, K.; Heinrich, S.; Berger, M.: *Synthese einer Fadenlängenkompensation mittels des modulbasierten Analyse-Synthese-Parameter-Abgleiches*. 16. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (Tagungsband S. 96-107), Bayreuth, 11.-12.10.2018
ISBN 978-3-00-059609-4
- [2] Denninger, D.; Berger, M.; Heine, A.: *Verschleissarme Handhabung von Flechtmaterialien durch optimalen Fadenlängenausgleich*. Tagungsband zum 10. Kolloquium Getriebetechnik – Ilmenau 2013
ISBN 978-3-86360-065-5
- [3] Gerlach, K.; Berger, M.: *Bestimmung von Bewegungsaufgaben mittels Mehrkörpersimulation am Beispiel einer Längenkompensation für biegeschlaffe Materialien*. VVD 2018 - Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik (Tagungsband S. 303-324), Dresden, 15.-16.03.2018
ISBN 978-3-86780-561-2
- [4] Gerlach, K.; Heider, T.; Berger, M.: *Methodischer Ansatz zum Entwurf von Fadenlängenkompensationen am Beispiel einer Kettenwirkmaschine*. Konferenzbeitrag 9. IFToMM-DACH, Basel, 16.-17.03.2023
DOI: 10.17185/dupublico/77383
- [5] Duan, J.: *Fadengeschwindigkeitsmessung mittels Fadenladung zur Untersuchung der Fadenbewegung an textilen Prozessen*. Dissertation, Dresden: w.e.b.-Univ.-Verl., 2001
ISBN 3-935712-60-X

Bestimmung der natürlichen Krümmung eines Balkens für eine bestimmte charakteristische Kennlinie mit Hilfe Neuronaler Netze

Using Neural Nets to predict the Natural Curvature of a Beam for a specific Characteristic

M.Sc. Marten Zirkel¹, marten.zirkel@tu-ilmenau.de

M.Sc. Yinnan Luo², yinnan.luo@kit.edu

Dr.-Ing. Ulrich Römer², ulrich.roemer@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Fidlin², alexander.fidlin@kit.edu

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Lena Zentner¹, lena.zentner@tu-ilmenau.de

1: Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Mechanik Nachgiebiger Systeme, 98693 Ilmenau, Deutschland

2: Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Mechanik, 76131 Karlsruhe, Deutschland

Kurzfassung

Die Bedeutung der Energieeffizienz nimmt kontinuierlich zu, insbesondere in Bezug auf periodisch bewegte Systeme. Um diese effizienter zu gestalten, hat sich die Integration nachgiebiger Mechanismen als vielversprechender Ansatz erwiesen, siehe [1]. Dabei dienen elastische Kopplungen als Verbindungselemente zwischen sich relativ zueinander bewegenden Komponenten im System. Der Verlauf der charakteristischen Kennlinie der elastischen Kopplung wird durch Optimierung, mit dem Ziel die Energieeffizienz zu steigern, erhalten. Darauf folgend muss ein Mechanismus mit einer ähnlichen Kennlinie für den späteren Einsatz im System synthetisiert werden.

Nach [2] wird ein nachgiebiger Mechanismus erst durch ein Designkonzept (Freedom and Constraints, Building Blocks, Topologie-Optimierung, Rigid-Body-Replacement) erhalten und anschließend untersucht und je nach Ziel optimiert. Eine andere Methode wird Isogeometric Geometry genannt. Sie ermöglicht es, die Form eines Balkenelements über seine natürliche Krümmung mittels Splines zu beschreiben und diese durch ein Optimierungsverfahren an eine gewünschte charakteristische Kennlinie anzupassen, siehe [3]. Der hier beschriebene Ansatz verfolgt diese Idee, allerdings wird die Ableitung der natürlichen Krümmung κ durch Konstanten $\dot{\kappa} = p_{\kappa,i}$, mit $i = 1, \dots, n$ für n Abschnitte des Balkenelements beschrieben. Die Initiallage des Balkenelements wird im vorgespannten Zustand gesucht, um den Auslenkwinkelbereich für φ zu erhöhen. Zur Ermittlung der Lage des Balkenelements wird das Euler-Bernoulli-Balken-Modell, Differentialgleichungen (1) bis (4), mit den Differentialgleichungen (5) und (6) erweitert. Dadurch kann gezielt im Integrationsverfahren, basierend auf einem Runge-Kutta Ansatz, an bestimmten s_i der Wert für $\dot{\kappa}$ für den nächsten Integrationsschritt geändert werden.

$$\frac{dM}{ds} = F_{B,x} \sin(\theta) - F_{B,y} \cos(\theta) \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{M}{EI_z} + \kappa(s) \quad (2)$$

$$\frac{dx}{ds} = \cos(\theta) \quad (3)$$

$$\frac{dy}{ds} = \sin(\theta) \quad (4)$$

$$\frac{d\kappa}{ds} = \dot{\kappa} \quad (5)$$

$$\frac{d\dot{\kappa}}{ds} = 0. \quad (6)$$

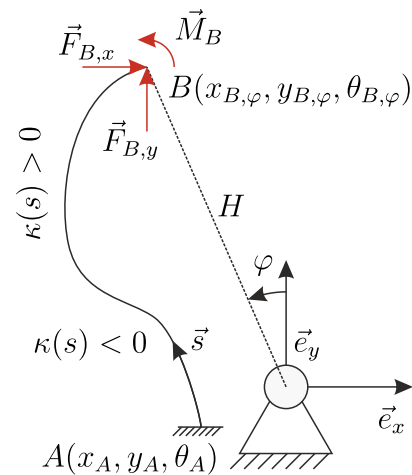


Bild 1 Beispiel eines Mechanismus: der Balken ist in A und B eingespannt und B wird um den Koordinatenursprung mit dem Winkel φ gedreht

Bild 1 zeigt ein Beispiel eines Mechanismus mit der neutralen Faser des Balkenelements zwischen A und B. Der Punkt B wird mit dem Winkel φ mit dem konstanten Abstand H um den Koordinatenursprung ausgelenkt. Der Parameter θ beschreibt den Winkel zwischen der Abszisse und der Tangente an der neutralen Faser am Punkt s. Die Startparameter in A werden durch ein neuronales Netz bestimmt. Die Parameter in B ergeben sich durch Integrieren des Modells ohne

wirkende Kräfte. Die Beträge der Parameter x_B und y_B bzw. H werden danach um 5% reduziert, um den vorgespannten Zustand zu erreichen. Die Kräfte $\vec{F}_{B,x}$ und $\vec{F}_{B,y}$ und das Moment \vec{M}_B werden durch die Vorspannung und die Auslenkung hervorgerufen.

Insgesamt werden die Parameter $p_{nn} = \{x_A, y_A, \theta_A, p_{\kappa,i}\}$ durch ein neuronales Netz vorgegeben. Das neuronale Netz wird hier in 3 Abschnitte aufgeteilt. Der erste Abschnitt ist ein Feed-Forward-Netz bestehend aus 4 Ebenen. Dieser Abschnitt transformiert die Eingabedaten (charakteristische Kennlinien) in die entsprechende Dimension für den zweiten Abschnitt. Der zweite Abschnitt ist ein Deep Equilibrium Net (DEQ), siehe [4]. Dadurch ist die Anzahl der Schichten des gesamten Netzes quasi unendlich. Mit dem letzten Abschnitt werden die Parameter p_{nn} erhalten.

Die Trainingsdaten werden mit zufällig generierten Werten für p_{nn} berechnet. Dazu wird das oben beschriebene Modell eines Euler-Bernoulli-Balkens herangezogen. Das Randwertproblem wird durch ein Trust-Region-Dogleg-Verfahren für verschiedene Auslenkungen gelöst. Somit lassen sich charakteristische Kennlinien erstellen. Dabei werden nur Moment-Winkel-Kennlinien berücksichtigt. Die so erhaltenen charakteristischen Kennlinien werden noch durch ein k-means-clustering Algorithmus sortiert. Es werden dadurch ähnliche Kennlinien mit unterschiedlichen Parametern p_{nn} aussortiert. Das erleichtert das Trainieren des neuronalen Netzes. Das neuronale Netz wird mit einem Datensatz mit der Größe 128 trainiert. Als Optimierungsalgorithmus wird der Adam-Algorithmus mit einer adaptiven Lernrate verwendet. Das Ergebnis ist in Bild 2 dargestellt. Bild 2a zeigt den Verlauf der natürlichen Krümmung $\tilde{\kappa}(s) = \kappa(s) l$ mit normierten Werten an. In Bild 2b ist das normierte Moment $\tilde{M} = \frac{Ml}{EI_z}$ mit der Balkenelementlänge l , sowie dem E-Modul E und dem Flächenträgheitsmoment I_z in Abhängigkeit vom Auslenkwinkel φ zu sehen. Beide Grafiken zeigen fünf Linien für die Krümmung sowie fünf charakteristische Kennlinien (in Blau), die als eine Vorgabe dienen. Das neuronale Netz ermittelt passende p_{nn} zu diesen Kennlinien und zu diesen Parametern werden die charakteristischen Kennlinien berechnet, welche in rot bzw. grün dargestellt sind. Die roten Kennlinien wurden vor und die grünen Kennlinien nach dem Training ermittelt. Es ist zu erkennen, dass das neuronale Netz nach dem Training Vorschläge für p_{nn} liefert, die annähernd die gewünschten Kennlinien hervorrufen. Die Werte der Krümmung können unterschiedlich sein, da verschiedene Parameter p_{nn} zu ähnlichen charakteristischen Kennlinien führen können.

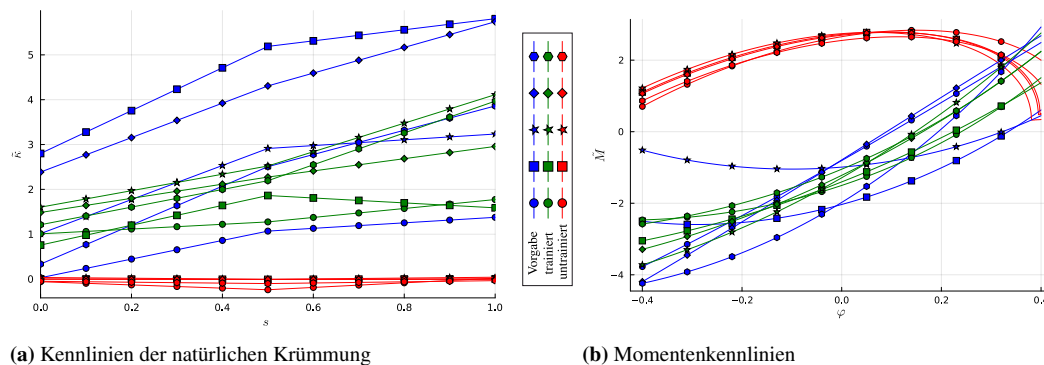


Bild 2 Vergleich von 5 charakteristischen Kennlinien: Die gewünschten Kennlinien sind in blau dargestellt und in rot werden die Kennlinien auf Basis p_{nn} des neuronalen Netzes dargestellt.

Danksagung: Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für Ihre Unterstützung. Die Zuschussnummern lauten: **FI 1761/4-1/2** und **ZE 714/16-1/2**.

Literatur

- [1] Yinnan Luo u. a. „Improving Energy Efficiency of a Bipedal Walker with Optimized Nonlinear Elastic Coupling“. In: *Advances in Nonlinear Dynamics*. Hrsg. von Walter Lacarbonara u. a. NODYCON Conference Proceedings Series. Cham: Springer International Publishing und Imprint Springer, 2022, S. 253–262. DOI: 10.1007/978-3-030-81166-2_23.
- [2] Pietro Bilancia und Giovanni Berselli. „An Overview of Procedures and Tools for Designing Nonstandard Beam-Based Compliant Mechanisms“. In: *Computer-Aided Design* 134 (2021), S. 103001. DOI: 10.1016/j.cad.2021.103001.
- [3] Giuseppe Radaelli und Just L. Herder. „Isogeometric Shape Optimization for Compliant Mechanisms With Prescribed Load Paths“. In: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2015. DOI: 10.1115/DETC2014-35373.
- [4] Shaojie Bai, J. Zico Kolter und Vladlen Koltun. „Deep Equilibrium Models“. In: *CoRR* abs/1909.01377 (2019). DOI: 10.48550/arXiv.1909.01377.

Design and Optimization of a Steering Geometry for a Micromobility Vehicle

Peter Krönes, Adrian Brune, Prof. Dr.-Ing. Lars Mikelsons
University of Augsburg, Chair of Mechatronics, 86159 Augsburg, Germany
(peter.kroenes@uni-a.de)

Abstract

In pursuit of making urban traffic more sustainable and efficient, micromobility vehicles can be a possibility for extending public local transport. To solve some of the problems of the currently widespread rental e-scooters, a partially autonomous solution is being considered. The autonomy is intended only for redistribution and independent charging. For autonomous operation, a stable vehicle is necessary, which leads to the extension to three wheels. The resulting increased complexity of the steering will be addressed in this article. The relevant chassis characteristics will be discussed, and on this basis, an optimization of a novel steering mechanism will be performed.

1 Introduction

Due to increasing urbanization, urban mobility concepts are facing significant challenges [1]. The infrastructure is not designed for current demands, and in most European cities, it cannot be structurally modified to meet today's needs. To find a solution, a greater expansion of public transportation is essential. However, this often fails to fully meet individual needs, as public transit cannot cover the start and end points for every individual. In recent years, the micromobility concept of e-scooters has emerged as a solution in many major cities, where they are distributed throughout the city and can be booked via an app. Yet, this solution introduces its own set of problems. The distribution of vehicles does not meet demand, currently compensated for by an oversupply. Vehicles with low battery levels are manually collected, charged, and redistributed, which, aside from requiring significant labor, also worsens the CO₂ footprint of the vehicles [2]. Additional issues arise from users who leave the vehicles in inconvenient locations, thereby blocking driveways, bike paths, stairs, etc. The vehicles are also subject to vandalism, which in some cases can cause extensive ecological damage.

1.1 Semi-Autonomous Micromobility Vehicles

A potential solution to these issues could be semi-autonomous micromobility vehicles [3]. These vehicles are designed to be operated like conventional e-scooters but can also move independently. This allows for a demand-driven distribution within the urban area, eliminating the need for an oversupply. Additionally, it enables the vehicles to autonomously travel to charging stations, clear pathways if they have been left in inconvenient locations, and partly disappear from the cityscape outside peak usage times, which also helps to reduce vandalism.

1.2 Vehicle requirements

The semi-autonomy requires a stable platform; hence the concept includes a front axle with two unpowered wheels and one powered rear wheel. To ensure ride comfort and safety, the front wheels are equipped with suspension. This introduces a level of complexity to the chassis that necessitates a specific steering design. Additionally, a novel steering concept is to be integrated, which allows not only the conventional rotation of the handlebar but also a tilting motion to control the steering.

2 Vehicle Suspension

For optimizing steering parameters, we have to discuss the vehicles wheel suspension parameters. In this case we have a double wishbone suspension that is usually defined like seen in **Figure 1**. All mentioned parameters and how they have been altered for the simplified suspension of the scooter are listed below. The final setup that is used for the optimization can be seen in **Figure 2**.

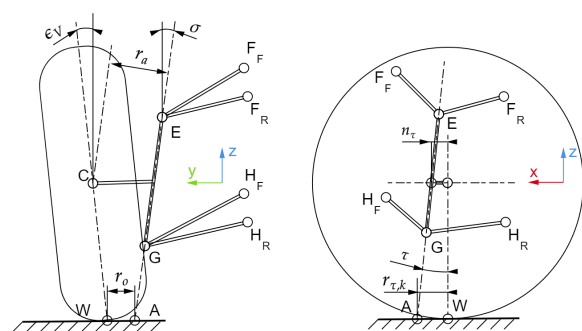


Figure 1 Standard parameters of a wheel suspension defined by Matschinsky[4]. Graphic based on [5].

Camber Angle ϵ_V : Camber angle is used to increase the tire contact area of the leading wheel (outer wheel relative to the curve) while cornering. Since our scooter has wheels with a much narrower contact patch than a car and therefore

re has arguably no loss in contact area while cornering, the camber angle has been set to zero.

Kingpin Inclination σ : With kingpin inclination the vehicle is lifted according to the wheel steering angle. Since the vehicles mass is working against the lift of the steering, the vehicle automatically pulls straight with no steering input. Mainly for simplifying the geometry, the kingpin inclination has also been set to zero.

Caster Angle τ : When the caster angle is positive, meaning the top of the steering axis is tilted towards the rear of the vehicle, it creates a situation where the steering axis intersects the ground ahead of the contact point of the tire. As the vehicle moves forward, the force of the ground on the tire generates a torque around the steering axis due to this offset. This torque rotates the wheels back to their straight-ahead position. For our scooter the caster angle has been set to zero.

Scrub Radius r_0 : The scrub radius acts as a lever arm on which bumps can act on to affect the steering wheel feedback. Therefore, it mainly affects handling characteristics and driver's comfort. Since the kingpin inclination is zero the scrub radius is restricted by the wheel itself. It has been designed to be as small as physically possible.

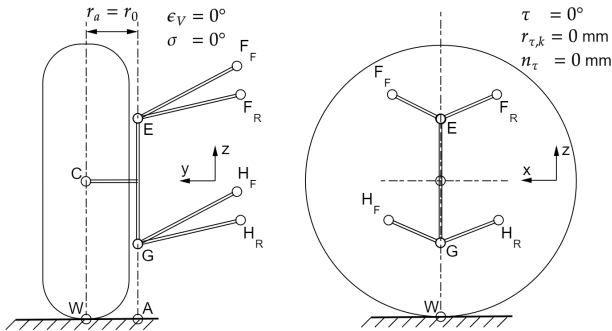


Figure 2 Parameters of the scooter's suspension in rear view on the left and side view on the right. **Note:** For a clearer representation of all parts, the wishbone struts were not shown overlapping on the rear view.

Both front wheels have a shock absorber that is mounted on the lower wishbone and goes through the upper wishbone to its mounting point as shown in **Figure 3**. The steering optimization is done with the shock absorber 30% compressed.

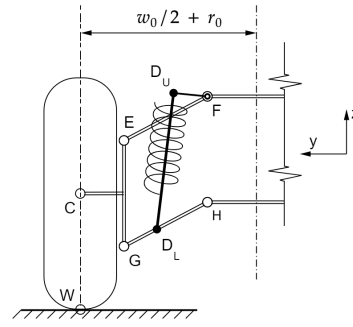


Figure 3 Suspension setup in rear view, with shock absorber with 30% sag.

3 Vehicle Steering Mechanism

The steering mechanism is designed to be either used by tilting the steering bar around an axis parallel to the vehicle's x-axis or by rotating the steering bar around its z-axis. With adding the steering by tilting to the vehicle, it gains the ability to be steered by leaning into curves while the rotation can still achieve higher wheel angles to achieve a sufficient turning circle for autonomous operation on sidewalks. To clarify how both steering modes work, left side of **Figure 4** shows the conventional steering by turning the handle bar by $\theta_z = 10^\circ$ while the right sight shows steering by tilting the handle bar by $\theta_x = 10^\circ$.

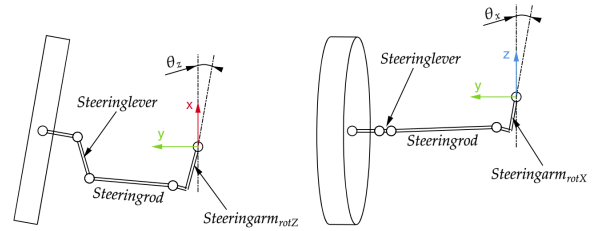


Figure 4 Left side: Steering by rotating the handle bar in top view. Right side: Steering by tilting the handle bar in rear view.

A rendered image of all parts in a position where both steering modes are actuated and all joints have their respective degrees of freedom visualized can be seen in **Figure 5**.

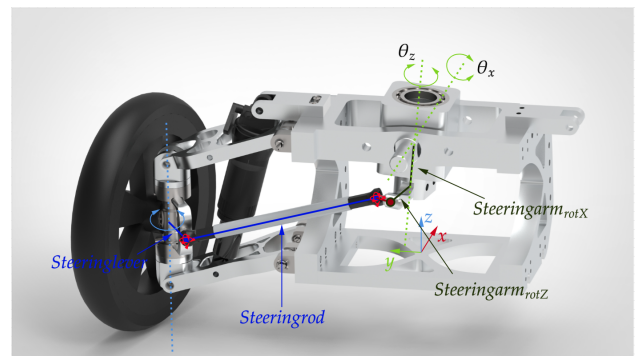


Figure 5 Rendering of the current vehicle setup with all Steering related parts labeled. The degrees of freedom of all joints are visualized.

4 Evaluation criteria for steering mechanisms

For an optimization we need criteria that are measurable and not a matter of own preference. We picked the turning circle and the ackermann condition to optimize the steering parameters.

4.1 Ackermann Condition

The Ackermann condition (or Ackermann steering geometry) pertains to the ideal steering design that allows the inner and outer wheels to turn at the appropriate angles during a turn. According to the Ackermann principle, in a turn, the inner wheel needs to turn at a sharper angle than the outer wheel because it has a smaller radius to cover. This principle reduces tire slip and wear during turns, improving handling and efficiency [6]. The Ackermann condition is met when the extensions of the front wheels' axes intersect at the rear axle as seen in **Figure 6**. If the intersection point is, for example, behind it, the minimum distance to the rear axle is defined as the Ackermann error err_A . To obtain a value that is comparable across different vehicle lengths, the ratio is given relative to the vehicle's wheelbase. Therefore a steering mechanism that meets the ackermann condition perfectly is defined as 100 % Ackermann and parallel steering is defined as 0 % Ackermann:

$$rat_A = \left(\frac{T}{T + err_A} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

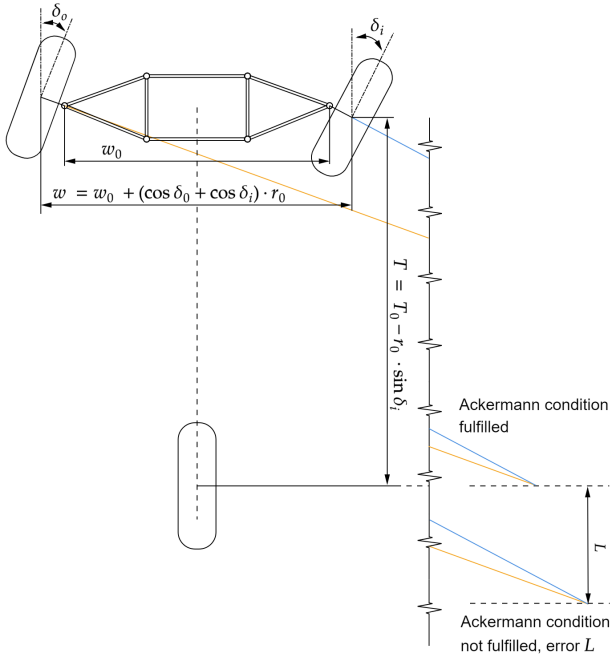


Figure 6 Vehicle in top view with depiction of the Ackermann error.

4.2 Turning Radius

The turning radius is a critical measure of a vehicle's maneuverability. It refers to the smallest circular turn (or the smallest U-turn) that the vehicle can make. A smaller turning radius indicates better maneuverability, allowing the vehicle to navigate tight spaces more effectively. It's a particularly important measure for vehicles intended for urban environments, where narrow streets are common. The turning radius is defined as following:

$$r_T = \frac{T}{\sin \delta_o} \quad (2)$$

5 Optimization

The main objective is to minimize the Ackermann error. As the actual calculation of err_A is very long and purely geometrical, it is not presented in detail. The optimization is run over steering input angles that have been presumed to be the range that is used in such vehicles, currently there is no close match to compare to and this might have to be adapted at a later stage of development. The constriction on the steering mechanism parts result from design space limitations for example a steering rod longer than $w_0/2$ would collide with the wheel.

$$\min_{\theta_x, \theta_z} err_A(\theta_x, \theta_z) \quad (3)$$

$$\text{s.t. } 0^\circ \leq \theta_x \leq 10^\circ \quad (4)$$

$$0^\circ \leq \theta_z \leq 35^\circ \quad (5)$$

$$Steeringrod < w_0/2 \quad (6)$$

$$100\text{mm} \leq Steeringlever \leq 250\text{mm} \quad (7)$$

$$20\text{mm} \leq Steeringarm_{rotX} \leq 100\text{mm} \quad (8)$$

$$50\text{mm} \leq Steeringarm_{rotZ} \leq 150\text{mm} \quad (9)$$

$$r_T \leq 2600\text{mm} \quad (10)$$

Since the steering mechanism is designed in a way that it will inevitably reach a singularity it has to be checked if the singularity occurs in the predefined range of motion.

For the Optimization the programming language Julia [7] is used. The Optimization problem is formulated in the modeling language for mathematical optimization JuMP [8], using the Interior Point optimizer [9].

6 Result

In our selected vehicle configuration and within the defined optimization constraints, we have identified an optimal solution characterized by an absolute Ackermann error of less than 700 mm. This performance metric was observed across steering inputs ranging from $\theta_z = 0^\circ$ to 35° and $\theta_x = 0^\circ$ to 10° , as depicted in **Figure 7**. Furthermore, the relative Ackermann error across these specified angles is detailed in **Figure 8**. Analysis of both figures reveals that the largest Ackermann error occurs near a steering input of 0° , whereas optimal steering performance is achieved within the 5° to 20° range for θ_z . Within this interval, the steering input θ_x significantly influences the Ackermann error. Conversely, outside this range, variations in θ_x appear to

exert negligible impact on steering accuracy.

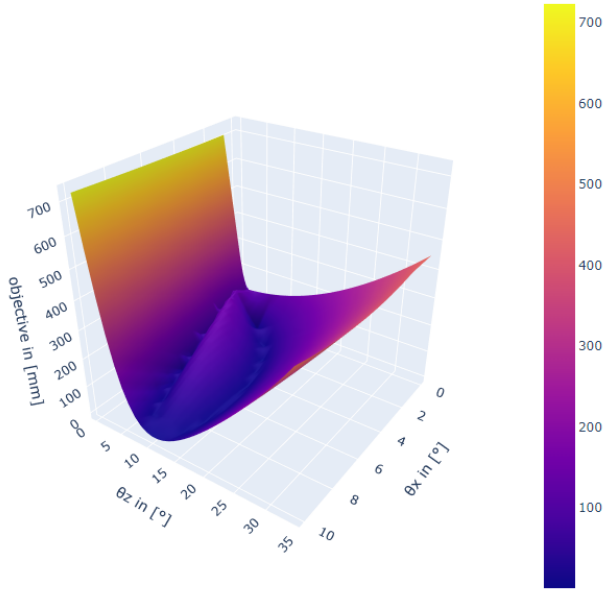


Figure 7 Absolute Ackermann error over input steering angles θ_x and θ_y .

steering inputs and begins to increase noticeably beyond a steering input of $\theta_z = 25^\circ$. Thus, we infer that the most significant impact on tire wear and handling occurs at higher wheel angles, typically associated with lower speeds, suggesting that such effects should be less perceptible.

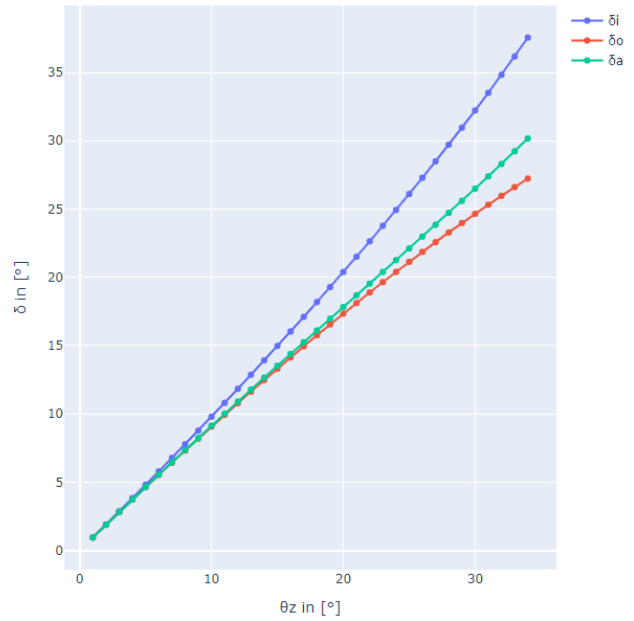


Figure 9 Steering angle of inner wheel δ_i with optimal angle of outer wheel δ_o and real angle of optimized geometry δ_a over θ_z from 0° to 35° at $\theta_x = 0$.

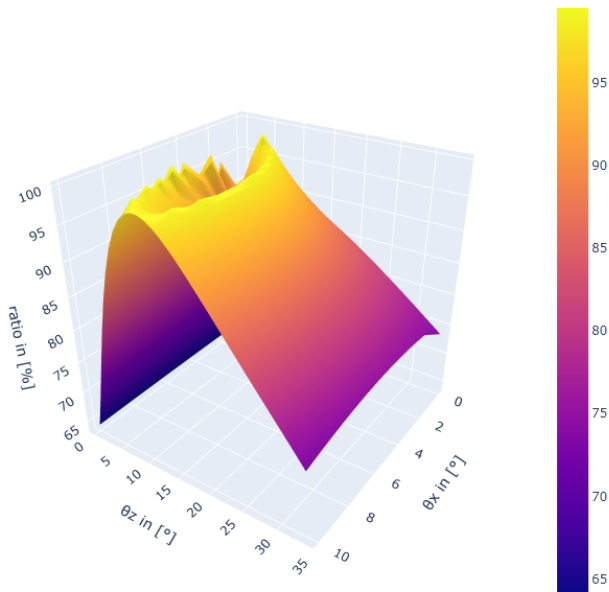


Figure 8 Relative Ackermann error in % over input steering angles θ_x and θ_y .

To more closely investigate the regions exhibiting larger Ackermann errors, we analyzed the angles of the inner (δ_i) and outer (δ_o) wheels relative to the optimal angle according to the Ackermann condition (δ_a). Consistent with previous observations, the steering input θ_x exerts a negligible influence on areas with heightened Ackermann error. Consequently, we explored a plot showcasing δ_i , δ_o , and δ_a across a range of $\theta_z = 0^\circ$ to 35° , at fixed $\theta_x = 0^\circ$ (**Figure 9**) and $\theta_x = 10^\circ$ (**Figure 10**). This analysis revealed that the absolute error in wheel angle remains minimal at lower

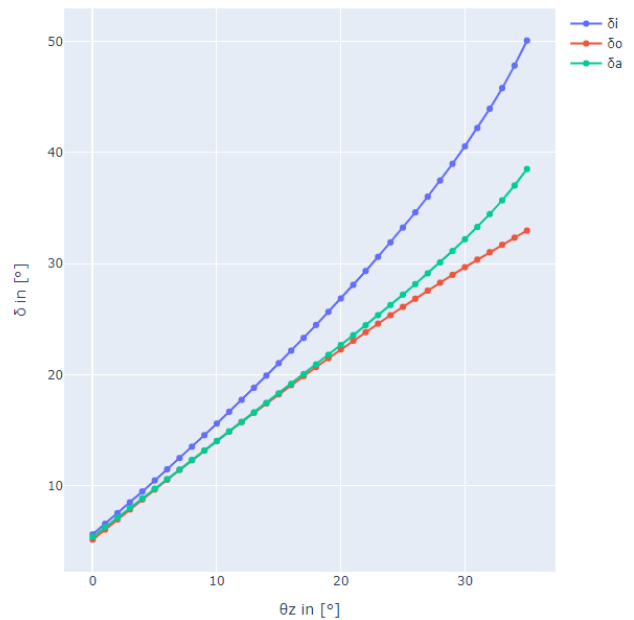


Figure 10 Steering angle of inner wheel δ_i with optimal angle of outer wheel δ_o and real angle of optimized geometry δ_a over θ_z from 0° to 35° at $\theta_x = 10$.

A critical aspect of assessing steering geometry is ensuring that wheel angles are increasing strictly monotonically with respect to increases in either steering input. The adherence of our optimized parameter set to this criterion is illustra-

ted in **Figure 11**, where the resultant steering angle of the inner wheel (δ_i) is plotted as a function of both θ_x and θ_z . Notably, this plot also highlights the maximum wheel angle, correlating to a turning radius of 2.551 m.

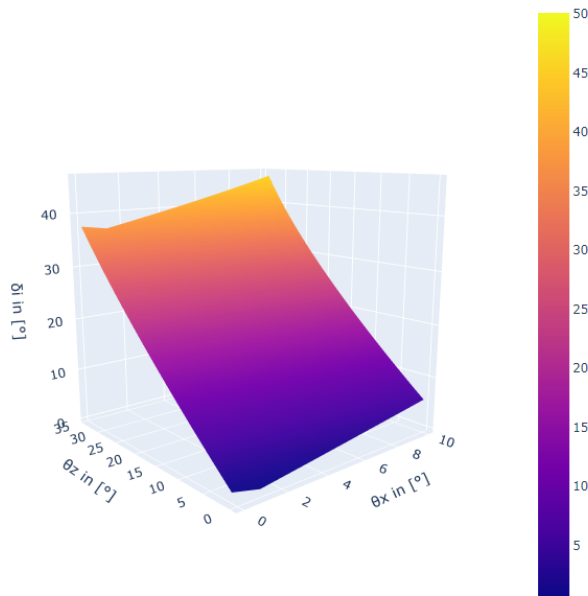


Figure 11 Resulting steering angle δ_i of optimized geometry.

7 Conclusion

A new steering mechanism specialized for semi-autonomous micromobility vehicles has been developed, with a focus on optimizing parameters to closely align with the Ackermann condition. The optimization efforts have led to promising results, demonstrating that the steering mechanism consistently achieves over 65% Ackermann compliance across all steering angles, indicating a high level of performance in various driving scenarios. This performance is noteworthy, especially considering the challenges in making direct comparisons due to the unique size of the vehicles in question. For context, a study by Veneri et al. [6] comparing different steering geometries in race cars found Ackermann ratios ranging from 30% to 50%.

8 Future Work

The subsequent phase involves conducting tests on a vehicle prototype equipped with the newly developed steering mechanism. This step is crucial for gaining a deeper insight into the impact of specific steering and wheel suspension configurations on this vehicle type, and to determine the perceptibility and relevance of these effects. Additionally, the interaction between road feedback and the steering mechanism will be thoroughly evaluated.

Literatur

- [1] Philipp Rode. “Trends and Challenges: Global Urbanisation and Urban Mobility”. In: *Megacity Mo-*

bility Culture. Lecture Notes in Mobility. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 3–21. ISBN: 978-3-642-34734-4. DOI: 10.1007/978-3-642-34735-1_1.

- [2] Joseph Hollingsworth, Brenna Copeland, and Jeremiah X. Johnson. “Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters”. In: *Environmental Research Letters* 14.8 (2019), p. 084031. DOI: 10.1088/1748-9326/ab2da8.
- [3] Lennart Luttkus, Peter Krönes, and Lars Mikelsons. *Scoomatic: Simulation and Validation of a Semi-Autonomous Individual Last-Mile Vehicle*. 2020. DOI: 10.17185/DUEPUBLICO/71204.
- [4] Wolfgang Matschinsky. *Radführungen der Straßenfahrzeuge: Kinematik, Elasto-Kinematik und Konstruktion*. 3., aktualisierte u. erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2007. ISBN: 978-3-540-71197-1.
- [5] Peter Pfeffer and Manfred Harrer. *Lenkungs-handbuch*. Vieweg+Teubner, 2011. ISBN: 978-3-8348-0751-9.
- [6] M. Veneri and M. Massaro. “The effect of Ackermann steering on the performance of race cars”. In: *Vehicle System Dynamics* 59.6 (2021), pp. 907–927. ISSN: 0042-3114. DOI: 10.1080/00423114.2020.1730917.
- [7] Jeff Bezanson et al. “Julia: A Fresh Approach to Numerical Computing”. In: *SIAM Review* 59.1 (2017), pp. 65–98. ISSN: 0036-1445. DOI: 10.1137/141000671.
- [8] Iain Dunning, Joey Huchette, and Miles Lubin. “JuMP: A Modeling Language for Mathematical Optimization”. In: *SIAM Review* 59.2 (2017), pp. 295–320. ISSN: 0036-1445. DOI: 10.1137/15M1020575.
- [9] Andreas Wächter and Lorenz T. Biegler. “On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming”. In: *Mathematical Programming* 106.1 (2006), pp. 25–57. ISSN: 0025-5610. DOI: 10.1007/s10107-004-0559-y.

Dynamische Modellierung geschlossener kinematischer Ketten anhand von URDF-Beschreibungen

Dynamic modeling of closed loop mechanism based on URDF description

Fabian Finkbeiner, Hochschule Heilbronn, 74081 Heilbronn, Deutschland, fabian.finkbeiner@hs-heilbronn.de
 Prof. Dr. Ing. Timo Hufnagel, Hochschule Heilbronn, 74081 Heilbronn, Deutschland, timo.hufnagel@hs-heilbronn.de
 Prof. Dr. Ing. Tobias Bruckmann, Universität Duisburg Essen, Lehrstuhl für Mechatronik, 47057 Duisburg, Deutschland, tobias.bruckmann@uni-due.de

Kurzfassung

Motivation

Für die Simulation und Antriebsdimensionierung parallelkinematischer Manipulatoren werden dynamische Modelle in Form von Bewegungsdifferentialgleichungen verwendet. Mithilfe einer einheitlichen Beschreibung des geometrischen Aufbaus eines Manipulators können diese Bewegungsdifferentialgleichungen automatisiert generiert werden. Für die Beschreibung kinematischer Ketten haben sich mit dem Simulation Description Format (SDF) [1] und dem Unified Robot Description Format (URDF) [2] zwei Dateiformate auf XML-Basis etabliert. SDF unterstützt hierbei bereits die Beschreibung geschlossener kinematischer Ketten, während das URDF ausschließlich für offene kinematische Ketten (Baumstrukturen) vorgesehen ist. An dieser Stelle könnte man URDF für die Modellierung geschlossener kinematischer Ketten generell verwerfen, jedoch hat dieses Format gegenüber SDF einen wesentlichen Vorteil. Die Beschreibung im SDF erfordert nämlich die Kenntnis der Positionen und Winkel aller Körper des Mechanismus in einer initialen Konfiguration. In diesem Beitrag soll eine Erweiterung des URDF zur Beschreibung geschlossener kinematischer Ketten in Bezug auf die dynamische Modellierung vorgestellt werden.

Auswahl des grundlegenden Datenformates

Beide Formate basieren auf der Definition von Gelenk- und Körperkoordinatensystemen. Der maßgebliche Unterschied zeigt sich bei der Definition der Transformationen. Während beim URDF alle Transformationen explizit angegeben werden, werden im SDF die Transformationen zwischen einem Körper und dem Gelenkkoordinatensystem immer anhand der angegebenen Posen berechnet. Daher muss der Mechanismus immer in einer gültigen Konfiguration dargestellt werden. Der Vergleich ist in Abbildung 1 an einem Fünfgelenk dargestellt. Dabei repräsentieren schwarzen Pfeile die Transformationen vom Körperkoordinatensystem zum Gelenkkoordinatensystem und die orangenen Pfeile die Transformationen vom Gelenkkoordinatensystem zum Körperkoordinatensystem. Die gestrichelte orangene Linie stellt das aufgetrennte Gelenk des Fünfgelenks dar und wird durch die URDF-Datei nicht abgebildet.

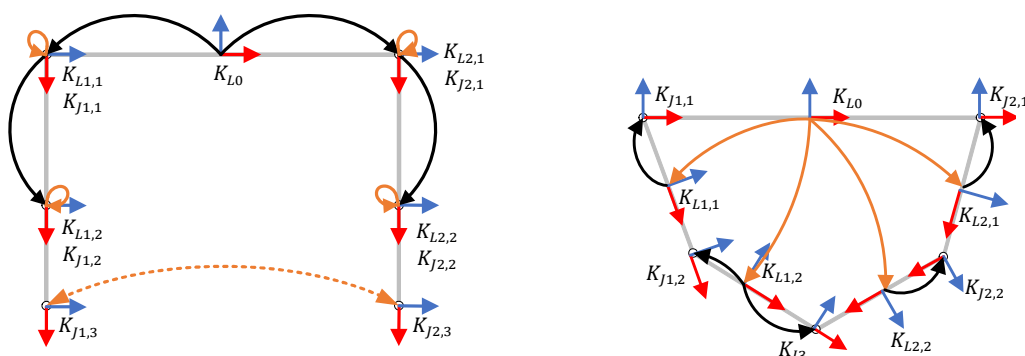


Abbildung 1: Definition der Koordinatensysteme und Transformationen eines Fünfgelenks: links: URDF; rechts: SDF

Für die kinematische und dynamische Analyse geschlossener kinematischer Ketten wird in den Beiträgen [3–7] die geschlossene Kette aufgetrennt, um eine Baumstruktur mit Zwangsbedingungen zu erhalten. Die Arbeiten [4, 6, 7] zeigen, dass alle geometrischen Eigenschaften der geschlossenen Kette in den formulierten Zwangsbedingungen enthalten sind. Der Beitrag [8] nutzt für das Auftrennen die Definition der Schnitte in einer separaten Datei und das SDF. Auf diese Weise entsteht eine Baumstruktur mit Zwangsbedingungen. Allerdings wird für die Definition des SDF eine gültige Konfiguration des Mechanismus benötigt. Die URDF dagegen stellt eine Baumstruktur ohne gültige Konfiguration dar. Eine Erweiterung um die Zwangsbedingungen ermöglicht somit die Beschreibung geschlossener kinematischer Ketten, ohne eine gültige Konfiguration des Mechanismus.

Erweiterung des URDF-Formats bei parallelkinematischen Systemen

Die Erweiterung der URDF soll die Zwangsbedingungen beschreiben, damit die Baumstruktur auf definierte Art geschlossen werden kann. Weiterhin soll die Kompatibilität zum nicht erweiterten Format erhalten bleiben, damit möglichst viele bereits entwickelte Tools verwendet werden können und ausschließlich um die Zwangsbedingungen erweitert werden müssen, um geschlossene kinematische Ketten zu unterstützen.

Um die Kompatibilität der Erweiterung mit dem gängigen Format zu ermöglichen, wird ein neues Element für den Schnitt eingeführt. Die Definition erfolgt mithilfe zweier Koordinatensysteme. Diese Koordinatensysteme liegen im aufgetrennten Körper bzw. Gelenk. Die Formulierung der Zwangsbedingungen ergibt sich durch den Typ der Trennung.

Die resultierende Datei kann mit einem XML-Parser eingelesen und für die anschließende Modellerstellung verwendet werden.

Praktische Umsetzung

Die Baumstruktur sowie die Zwangsbedingungen werden genutzt, um das inverse dynamische Modell der geschlossenen Kette zu ermitteln. Hierfür wird in einem ersten Schritt das inverse dynamische Modell der Baumstruktur gebildet. Um dieses Modell zu schließen, müssen noch zusätzliche Zwangskräfte unbekannter Größe eingepreßt werden. Die Zwangskräfte werden durch eine Projektion auf die Minimalkoordinaten eliminiert. Die Projektion wird aus den Zwangsbedingungen extrahiert.

Für die praktische Umsetzung wird die Antriebsauslegung eines industriellen Deltakinematik beschrieben. Dafür werden die notwendigen Antriebsmomente durch die Vorgabe einer Trajektorie mithilfe des inversen dynamischen Modells berechnet. Durch die URDF-Datei erfolgt die Erstellung des inversen dynamischen Modells automatisiert. Das Modell wird mit einem Matlab-Simscape-Modell und Messdaten eines realen Parallelmanipulators verglichen. Als Trajektorie wird eine Pick-and-Place-Trajektorie in kartesischen Koordinaten vorgegeben. Die Messdaten werden direkt dem Motorregler entnommen. Die Modelldaten werden mithilfe der Getriebeübersetzung ohne Getriebemodell auf die Getriebeantriebsseite übertragen. Die Ergebnisse in Abbildung 2 zeigen, dass die Modellierung durch die Projektionsmethode anhand der URDF-Datei mit dem Matlab-Simscape-Modell sehr gut übereinstimmt.

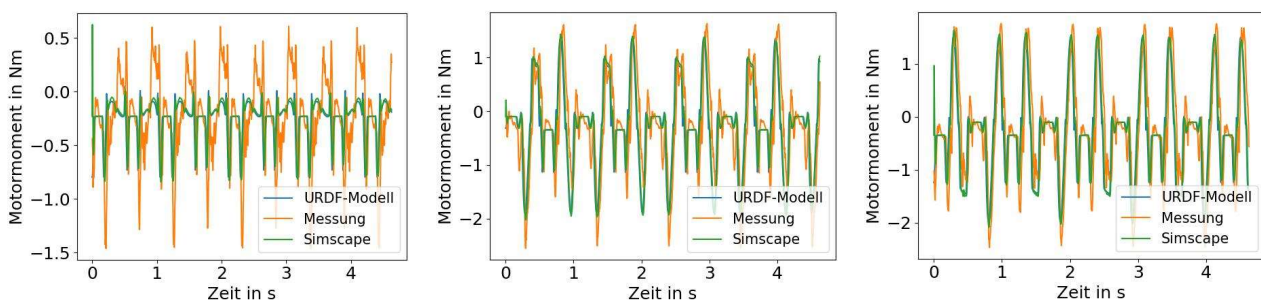


Abbildung 2: Vergleich URDF-Modell, Simscape-Modell und Messdaten: links: Achse 1; mitte: Achse 2; rechts: Achse 3

Die Ergebnisse der Modelle und der Messung zeigen erkennbare Abweichungen. Dies liegt an nichtmodellierten Effekten, wie beispielsweise Reibung oder Getriebesteifigkeit.

Literatur

- [1] Open Source Robotics Foundation. "SDFormat." Zugriff am: 13. November 2023. [Online.] Verfügbar: <http://sdformat.org/>
- [2] ROS. "ROS Wiki -URDF." Zugriff am: 13. November 2023. [Online.] Verfügbar: <http://wiki.ros.org/urdf>
- [3] Andreas Müller, "Dynamics of parallel manipulators with hybrid complex limbs: Modular modeling and parallel computing," *Mechanism and Machine Theory*, Nr. 167, 2022.
- [4] S. Briot und W. Khalil, *Dynamics of parallel robots: From rigid bodies to flexible elements* (Mechanisms and machine science 35). Cham: Springer, 2015.
- [5] T. Hufnagel, "Theoretische und praktische Entwicklung von Regelungskonzepten für redundant angetriebene parallelkinematische Maschinen," Duisburg, Essen, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2013, Universitätsbibliothek Duisburg-Essen, Duisburg, Essen, 2014.
- [6] A. Müller, "On the terminology and geometric aspects of redundant parallel manipulators," *Robotica*, Jg. 31, Nr. 1, S. 137–147, 2013, doi: 10.1017/S0263574712000173.
- [7] J.-P. Merlet, *Parallel Robots* (Springer eBook Collection 74). Dordrecht: Springer, 2000.
- [8] J. Wiartalla, M. Schmitz, M. Mierzwa, B. Corves und M. Hüsing, "Multidirektionale Additive Fertigung: Herausforderungen bei der Umsetzung eines restriktionsfreien Prozesses," 2023, doi: 10.17185/DUEPUBLICO/77394.

Einschätzung der Wahrscheinlichkeit von reibungsinduzierten selbsterregten Vibrationen in Achterbahnfahrten

Assessing the Likelihood of Friction-Induced Self-Excited Vibrations in Roller Coaster Rides

Marc Guillem Zamora Agustí, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, 47057 Duisburg, Deutschland, marc.zamora-agusti@stud.uni-due.de

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Andrés Kecskeméthy, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, 47057 Duisburg, Deutschland, andres.kecsekemethy@uni-due.de

Kurzfassung

Das Auftreten von Vibrationen während einer Achterbahnfahrt kann die Gesamterfahrung erheblich beeinflussen und zur strukturellen Ermüdung beitragen. Trotz ihrer Relevanz bleibt das Verständnis der Ursachen oder die genaue Vorhersage dieser Vibrationen eine ungelöste Herausforderung. Einige Untersuchungen haben die Rolle von Schienenunregelmäßigkeiten sowie die Elastizität der Fahrzeugs in den Schwingungen von Achterbahnsystemen aufgeklärt. Es ist jedoch zu beachten, dass trotz Verbesserungen bei der Schienenherstellung signifikante Vibrationen in modernen Achterbahnen nach wie vor vorhanden sind. Die Erweiterung des Ursachenspektrums für diese Vibrationen zeigt, dass reibungsinduzierte selbsterregte Vibrationen in Achterbahnsystemen auftreten könnten. In der vorliegenden Studie wird die Rolle von reinen selbsterregten Schwingungen im Zusammenhang mit einem autonomen Achterbahnsystem diskutiert. Obwohl die Schwingungsintensität während dieser selbsterregten Zustände geringer ist als bei typischen Messungen, wird gezeigt, dass dieselben Reibungseffekte in auf echten Schienen fahrenden Achterbahnen relevanter werden.

Abstract

The occurrence of vibrations during a roller coaster ride can significantly influence the overall experience and contribute to structural fatigue. Despite its relevance, understanding the causes or accurately predicting these vibrations remains an unresolved challenge. Some studies have elucidated the role of track irregularities as well as the elasticity of the vehicle in the vibrations of roller coaster systems. However, it is noteworthy that significant vibrations still exist in modern roller coasters despite improvements in track manufacturing. The expansion of the spectrum of causes for these vibrations suggests that friction-induced self-excited vibrations could occur in roller coaster systems. In this study, the role of pure self-excited vibrations in the context of an autonomous roller coaster system is discussed. Although the vibration intensity during these self-excited states is lower than in typical measurements, it is demonstrated that the same friction effects become more relevant in roller coasters traveling along real tracks.

1 Einleitung

Die Dynamik von Achterbahnen wird in erster Linie von den g -Kräften bestimmt, die von den Fahrgästen erlebt werden. Das theoretische g -Last-Profil, hier als G bezeichnet, wird typischerweise durch die Simulation der Dynamik eines Achterbahnzugs entlang der idealen, entworfenen Trajektorie bestimmt, auch um die gewünschte Glätte zu gewährleisten. Dies kann durch die Darstellung des Zugs als geschlossene kinematische Kette mit wenigen Freiheitsgraden erreicht werden, normalerweise einem für herkömmliche Achterbahnen.

In der Realität erleben die Passagiere jedoch eine empfundene Beschleunigung \mathcal{G} , die die Überlagerung eines Profils nahe G und zusätzlicher Vibrationen ist. Bis heute sind die Ursachen dieser Vibrationen nicht vollständig verstanden, was Unsicherheit in den Designprozess einführt.

Verschiedene Modelle wurden vorgeschlagen, um die Vibrationen bei Achterbahnfahrten zu analysieren. Ein Viertelfahrzeugmodell mit Trajektorienabweichungen, die als

stationärer Gaußscher Prozess modelliert sind, wird in [13] untersucht. In [3] wird ein Zwei-Rad-Wagen-System unter Berücksichtigung elastischer Passagiere analysiert. Eine umfassende Simulation eines Achterbahnzugs in [6] umfasst ein realistischeres nichtlineares Rad-Schienen-Kontaktmodell basierend auf der Formulierung von Flores et. al. [2] und Schienenabweichungen. Obwohl der letzter Ansatz bis zu einem gewissen Grad eine gute Korrelation mit realen Messungen zeigt, kann er das gesamte Schwingungsspektrum nicht vollständig erklären.

Eine andere Analyse wurde durchgeführt, um Vibrationen in Achterbahnen aus der Perspektive eines selbsterregten Systems zu untersuchen [10–12], basierend auf Reibungskräften im Rad-Schienen-Kontakt [1, 4, 5, 9]. Hopf-Bifurkationen wurden für eine Reihe von Parametern gezeigt. Die praktische Bedeutung dieser Art von anhaltenden Schwingungen in realen Achterbahnen bleibt jedoch unklar. Das Ziel dieser Studie ist es, weitere Einblicke in diese Frage zu geben.



2 Schienenführungsmodell

2.1 Kontaktkräfte

Bild 1 veranschaulicht eines der Rad-Drehgestelle eines Achterbahnwagens. Die Schienentrajektorie \mathcal{K}_r wird durch die bogenlängenparametrisierte Kurve $\mathcal{C}_r(s_r)$ und die Rotationsmatrix $\mathbf{R}_r(s_r) = [\hat{u}_x \ \hat{u}_y \ \hat{u}_z]$ repräsentiert, so dass $\hat{u}_x = d\mathcal{C}_r(s_r)/ds_r$ und \hat{u}_y stets senkrecht zu beiden Schienen bleibt.

Die Kontaktfläche \mathcal{K}_c ergibt sich als Lösung einer Zylinder-Zylinder-Kontaktbedingung zwischen dem Rad und der Schiene. Dabei werden die Normalkraft \underline{E}_N und die Tangentialkraft \underline{E}_T wie folgt gegeben

$$\underline{E}_N = (k\delta^p + c\delta^{p-1}\dot{\delta})\mathcal{H}(\delta)\underline{n}, \quad (1)$$

$$\underline{E}_T = \begin{cases} \mu(v_s)\|\underline{E}_N\| \tanh\left(\frac{\|\underline{E}'_T\|}{\mu(v_s)\|\underline{E}_N\|}\right) \frac{\underline{E}'_T}{\|\underline{E}'_T\|}, & \text{wenn } \|\underline{E}_N\| > 0 \text{ und } \|\underline{E}'_T\| > 0, \\ 0, & \text{andernfalls,} \end{cases} \quad (2)$$

wobei k eine Steifigkeitskonstante, c eine Dämpfungskonstante, δ die starre Eindringtiefe zwischen der Radbandage und der Schiene, p ein Parameter, der die Kontaktsteifigkeit in Abhängigkeit von δ definiert, \mathcal{H} die Heaviside-Funktion, μ der Reibungskoeffizient in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit v_s des Kontaktpunkts auf der Radbandage und \underline{E}'_T die kriechgeschwindigkeitsabhängige Tangentialkraft ohne Berücksichtigung von Sättigungseffekten ist, die in diesem Fall durch Kalkers lineare Theorie gegeben ist.

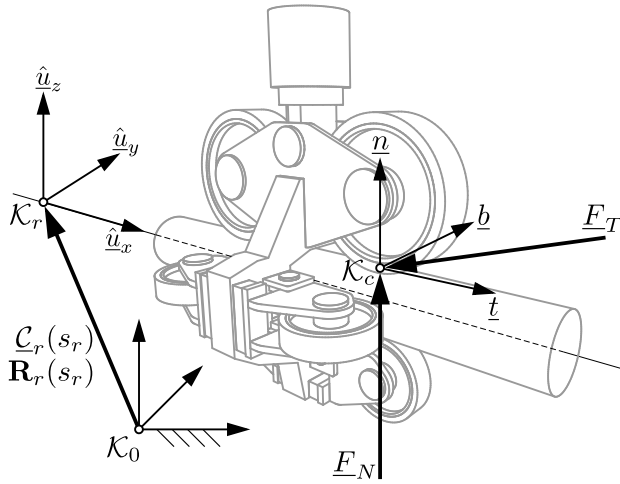


Bild 1 Schematische Darstellung des Rad-Schiene-Kontaktpunkts und der auf das vordere Laufrad wirkenden Kräfte.

Es sind mindestens acht Freiheitsgrade erforderlich, um das Drehgestell darzustellen, wobei zwei den Nick- und Gierrotationen des Tragrahmens entsprechen und sechs die Drehung der Räder entsprechen. Falls die Bewegung der Rahmen, die die Gummifedern der Seiten- und Gegenräder stützen, modelliert wird, werden vier zusätzliche Freiheitsgrade benötigt. In diesem Fall wird jedoch angenom-

men, dass k und c sie berücksichtigen und einen äquivalenten Kontakt darstellen. Sechs Bindungsgleichungen werden verwendet, um die Kontaktpunkte aller Räder zu bestimmen.

2.2 Frequenzverhalten bei Unregelmäßigkeiten

Die tatsächliche Schienenkurve $\tilde{\mathcal{C}}_r(s_r)$ ist eine Überlagerung der theoretischen Kurve und einer Störung, das heißt, $\tilde{\mathcal{C}}_r(s_r) = \mathcal{C}_r(s_r) + \tilde{\delta}(s_r)$. Diese Störung wird durch $\tilde{\delta}(s_r) = \tilde{\delta}_y\hat{u}_y + \tilde{\delta}_z\hat{u}_z$ gegeben.

Unter der Annahme, dass ein Drehgestell entlang einer Schiene mit einem harmonischen Abweichungsprofil mit einer räumlichen Periode λ fährt, die fundamentale momentane Frequenz f wird

$$f(t) = \frac{\dot{s}_r}{\lambda}. \quad (3)$$

Wenn die normalen Kontaktkräfte lineare Funktionen der Eindringtiefe wären, würde das System mit einer Frequenz f (Gleichung 3) vibrieren. Mit dem nichtlinearen Normalenkontaktmodell in Gleichung 1 zeigt das System ein vielfältigeres Frequenzspektrum.

Die Spektrogramme in den Bildern 2 und 3 zeigen die Frequenzantwort eines Dreiwagen-Achterbahnzugs, der entlang einer geraden Strecke mit einem harmonischen Abweichungsprofil $\tilde{\delta}_y = \tilde{\delta}_z$ mit einer räumlichen Periode $\lambda = 5$ m und einem quadratischen Mittelwert $\text{RMS}\{\tilde{\delta}\} = 0.0005$ m fährt. Die Wagen sind mittels Kugelgelenken miteinander verbunden und haben zwei hinteren Drehgestelle, ähnlich dem in Bild 1 gezeigten. Zusätzlich hat der erste Wagen eine rollende Achse, die ebenfalls von zwei Drehgestellen des gleichen Typs geführt wird. Es wird weder Kontaktspiel noch Vorspannung zwischen den Drehgestellen und den Schienen berücksichtigt. Der Fahrzeug wird mit einer konstanten Beschleunigung von ungefähr 0.5 g gezogen, von 1 m/s auf 60 m/s, was einer linearen Variation der fundamentalen momentanen Frequenz f (Gleichung 3) von 0.2 Hz bis 12 Hz entspricht. Es ist klar, dass Erzeugung superharmonischer Frequenzen für einen weiten Bereich von Geschwindigkeiten und in beiden Richtungen vorhanden ist. Die vertikale Komponente vibriert tatsächlich bei superharmonischen Frequenzen stärker als bei der fundamentalen Anregungsfrequenz.

Bilder 4 und 5 zeigen die Ergebnisse für ein Abweichungsprofil mit einem Leistungsdichtespektrum, das zwischen $\lambda = 1.2$ m und $\lambda = 60$ m konstant ist, und sonst überall 0 beträgt, mit einem quadratischen Mittelwert $\text{RMS}\{\tilde{\delta}\} = 0.0005$ m. Das Profil wird als stationärer Gauß-Prozess generiert [8]. Die Frequenzen, die die meiste Energie tragen, variieren nichtlinear mit der Zeit. Die Spärlichkeit scheint ebenfalls mit der Zeit zuzunehmen, was jedoch auf die steigende Schleppgeschwindigkeit zurückzuführen ist. Frequenzsprünge werden ebenfalls beobachtet, wie im Fall eines harmonischen Abweichungsprofils.

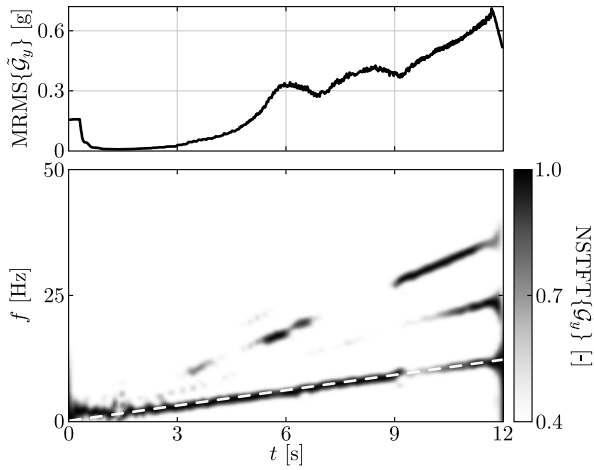


Bild 2 Laterale Vibration des dritten Wagens. Oben: bewogender quadratischer Mittelwert. Unten: normalisierte Kurzzeit-Fourier-Transformation.

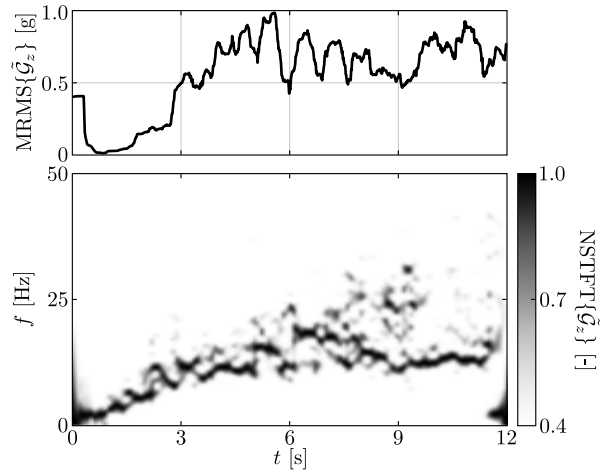


Bild 5 Vertikale Vibration des dritten Wagens. Oben: bewogender quadratischer Mittelwert. Unten: normalisierte Kurzzeit-Fourier-Transformation.

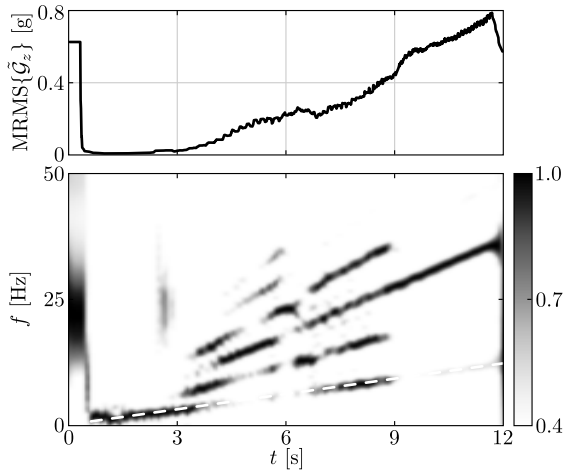


Bild 3 Vertikale Vibration des dritten Wagens. Oben: bewogender quadratischer Mittelwert. Unten: normalisierte Kurzzeit-Fourier-Transformation.

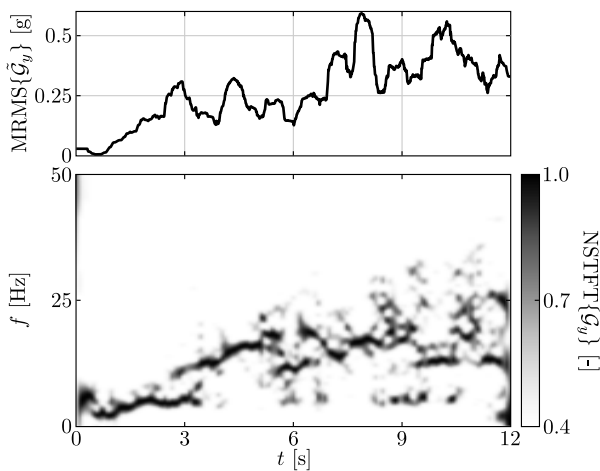


Bild 4 Laterale Vibration des dritten Wagens. Oben: bewogender quadratischer Mittelwert. Unten: normalisierte Kurzzeit-Fourier-Transformation.

3 Reibungsinduzierte selbsterregte Vibrationen

3.1 Modell

Es wird nun angenommen, dass die Schienen keine Unregelmäßigkeiten aufweisen, das heißt, $\tilde{\delta}_y = \tilde{\delta}_z = 0$. Um das Auftreten von anhaltenden Schwingungen als rein selbsterregte zu untersuchen, wird ein autonomes System betrachtet. Insbesondere wird ein einzelner Achterbahnwagen mit konstanter Geschwindigkeit entlang einer Kurve mit konstantem Radius und konstanter Überhöhung gezogen, wobei zwei hintere Drehgestelle wie in Bild 1 dargestellt verwendet werden. Anstelle einer Vorderachse ist der Schlepppunkt über ein Kugelgelenk mit dem Wagen verbunden.

Die Vibrationsstärke wird wie folgt berechnet:

$$\tilde{\mathcal{G}}_u = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{1}{t_f - t_{tr}} \int_{t_{tr}}^{t_f} \left(\epsilon \ddot{r}_c^{(u)} - \mu_u \right)^2 dt}, \quad (4)$$

wo t_{tr} die Übergangszeit, t_f die Endzeit, $\epsilon \ddot{r}_c^{(u)}$ die in \mathcal{K}_c zergelegte absolute lineare Beschleunigung von \mathcal{K}_c (siehe Bild 6), μ_u die Durchschnittsbeschleunigung, g die Erdbeschleunigung und $u \in \{y, z\}$ ist. Die Übergangszeit wird verwendet, um anfängliche Vibrationen zu beseitigen, die durch eine nicht im Gleichgewichtszustand Startkonfiguration verursacht werden.

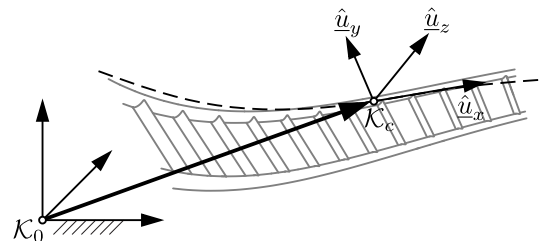


Bild 6 Trajektorie des Massenschwerpunkts eines Achterbahnwagens.

3.2 Ergebnisse

Die Auswirkungen verschiedener Parameter -aufgelistet in Tabelle 1- auf die Vibrationsantwort des in Abschnitt 3.1 vorgestellten Modells werden im Kontext des Versuchsdesigns untersucht.

Bild 7 zeigt das Haupteffektendiagramm für alle Parameter. Es ist klar, dass eine Erhöhung der Reibungssättigungssteifigkeit und der Schleppgeschwindigkeit die Vibrationsstärke erhöht. Dies kann nur auf Selbsterregung zurückzuführen sein, da der Wagen mit konstanter Geschwindigkeit entlang eines idealen Kreiswegs fährt. Eine Erhöhung der theoretischen lateralen g-Belastung deutet ebenfalls auf stärkere Vibrationen hin, während höhere vertikale g-Belastungen das System zu stabilisieren scheinen. Rad-Schiene-Kontaktspiel ($L1$ bei δ_0) ermöglicht eindeutig größere anhaltende Vibrationen, während eine Vorspannung ($L2$ bei δ_0) diese zu begrenzen scheint. Für dieses System scheinen weder der Königszapfenpielraum noch dessen Steifigkeit eine wichtige Rolle zu spielen.

Tabelle 1 Zu untersuchende Parameter.

Parameter	Beschreibung
κ	Steigung der Reibungssättigungsfunktion (Gl. 2)
v	Schleppgeschwindigkeit
G_y, G_z	Theoretische laterale und vertikale g-Lasten
δ_0	Vorspannung der Gummipuffer
e	Königszapfenpielraum
k	Königszapfensteifigkeit

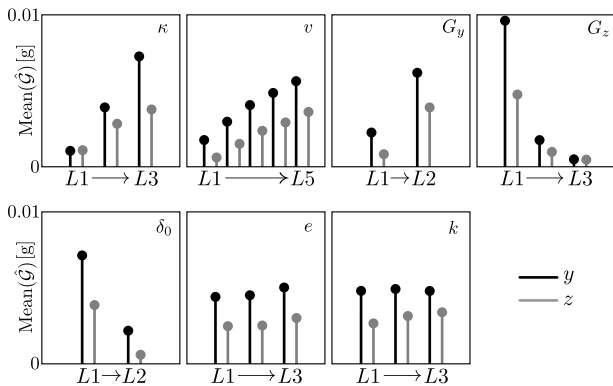


Bild 7 Haupteffektendiagramm verschiedener Parameter auf die Vibrationsintensität.

4 Schwingungsantwort entlang räumlicher Trajektorien

Während das im Abschnitt 3 untersuchte Modell es ermöglicht, reine selbsterregte Zustände zu identifizieren, stellt es kaum ein echtes Achterbahnsystem dar, das durch komplexe räumliche Trajektorien und dramatische Übergänge gekennzeichnet ist. Anhaltende selbsterregte Schwingungen verlieren in einem realen System ihre Bedeutung, doch dieselben Effekte in Abwesenheit von Schienenunregelmäßigkeiten können auf vorübergehende Vibrationen hinweisen, die es wert sind, analysiert zu werden. Als Nächstes

wird die Vibrationsantwort eines Achterbahnzuges untersucht, der auf einer komplexen Strecke ohne Abweichungen fährt.

4.1 Eigenschaften der Achterbahn

Derselbe Achterbahnzug wie der in Abschnitt 2.2 beschriebene wird berücksichtigt. Bild 8 zeigt die Hauptmerkmale der Achterbahn: die lateralen (α_y) und vertikalen (α_z) Streckenkrümmungen, die Torsion des Normalfeldes der Fahrbahnoberfläche (τ), das Geschwindigkeitsprofil v , und die theoretischen lateralen und vertikalen g-Belastungen.

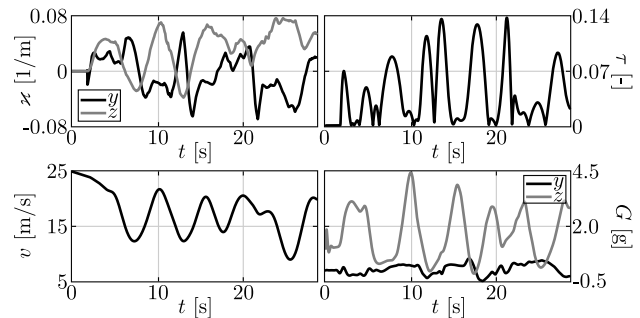


Bild 8 Layout-Merkmale und theoretische dynamische Eigenschaften der untersuchten Achterbahn. Alle Größen werden im zeitlichen Verlauf auf den vorderen Wagen bezogen.

4.2 Ergebnisse

Um verschiedene Szenarien unter gleichen Geschwindigkeiten und dynamischen Belastungen vergleichen zu können, wird der Achterbahnzug mit einer vorgegebenen Geschwindigkeitsfunktion gezogen. Die Schwingungsantwort des Achterbahnzuges wird sowohl ohne als auch mit Kontaktreibung untersucht, wobei letztere sowohl Rollreibung als auch die Kriechkräfte gemäß Gleichung 2 umfasst. Bild 9 zeigt die vertikale Schwingungsantwort des dritten Wagens. In beiden Fällen werden bedeutende Schwingungsniveaus ohne das Vorhandensein von Unregelmäßigkeiten festgestellt. Im Vergleich zum Modell aus Abschnitt 3 erfährt der Achterbahnzug hier kontinuierlich schnelle Änderungen der Trajektorie. Die Variationen in den Frequenzkomponenten scheinen mit den Streckenmerkmalen in Bild 8 einherzugehen. Darüber hinaus verursacht Kontaktreibung bemerkenswert größere Schwingungsniveaus an einigen Stellen. Auch wenn es scheint, dass dies an Abschnitten mit größerer Krümmung und Torsion auftritt, wurde noch kein klarer Muster identifiziert. In Bezug auf die Frequenz scheint es ein anderes Spektrum im Vergleich zum ersten Fall zu zeigen, doch sein veränderliches Verhalten scheint durch die Strecke selbst erklärt zu werden.

Bild 10 zeigt die vertikale Vibration, die einer von einer echten Achterbahn gesammelten Messung entspricht. Im Gegensatz zum untersuchten Modell gibt es ein anhaltendes Vibrationsniveau, das eher mit Radlaufflächen- oder Streckenunebenheiten in Verbindung zu stehen scheint. Die verstreuten Frequenzkomponenten ähneln ebenfalls eher den Ergebnissen in Bild 5. Andererseits werden auch Variationen in den Frequenzkomponenten beobachtet, die mög-

licherweise eher mit den Streckenmerkmalen und dem dynamischen Profil selbst als mit der Frequenz der Abweichungen zusammenhängen.

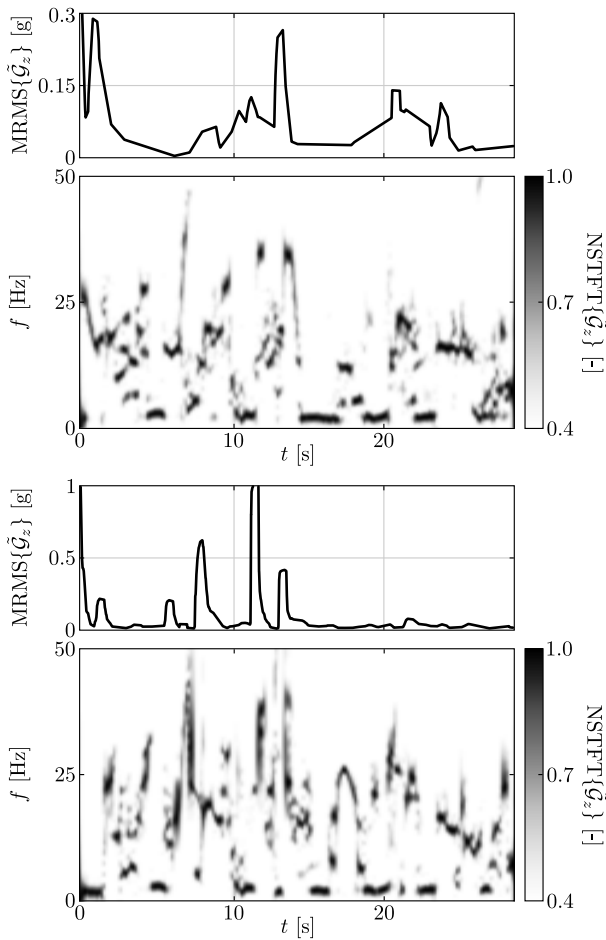


Bild 9 Vertikale Vibration des dritten Wagens. Von oben nach unten: bewegender quadratischer Mittelwert (reibungloser Kontakt), normalisierte Kurzzeit-Fourier-Transformation (reibungloser Kontakt), bewegender quadratischer Mittelwert (reibungsbefahter Kontakt), normalisierte Kurzzeit-Fourier-Transformation (reibungsbefahter Kontakt).

5 Zusammenfassung

Die Studie hat die individuellen Auswirkungen von Schienenunregelmäßigkeiten, Kontaktreibung und der kontinuierlich wechselnden Trajektorie der Strecke auf die Vibrationsantwort eines Achterbahnzugs untersucht. Aufgrund des nichtlinearen Rad-Schiene-Kontakts wurde gezeigt, dass superharmonische Komponenten für einen Bereich von Geschwindigkeiten erzeugt werden, sodass keine direkte Beziehung zwischen der fundamentalen Anregungsfrequenz und dem Frequenzspektrum angenommen werden muss. Reine Reibungsinduzierte selbsterregte Schwingungen wurden anhand Simulationen beobachtet, die bei Vorhandensein von Kontaktspiel und höheren Geschwindigkeiten relevanter zu sein scheinen. Andererseits scheint die Vorspannung der Drehgestelle diese effektiv zu mindern. Darüber hinaus deuten Fahrten entlang komplexer räumlicher Trajektorien auf variierende Frequenzkompo-

nenten hin, was die transiente Natur von Achterbahnsystemen und die Schwankung der natürlichen Frequenzen verdeutlicht. Bei Berücksichtigung von Kontaktreibung wurden auch intensivere Schwingungspegel beobachtet. Obwohl das Konzept anhaltender Schwingungen aufgrund selbsterregter Phänomene in transienten Szenarien weniger relevant erscheint, verändern Reibungseffekte deutlich die Vibrationsantwort und müssen bei der Simulation von Achterbahnvibrationen berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann seitliche Reibung den Laufflächenverschleiß beschleunigen. Die Kombination von Schienenunregelmäßigkeiten, komplexen räumlichen Trajektorien und Kontaktreibung ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

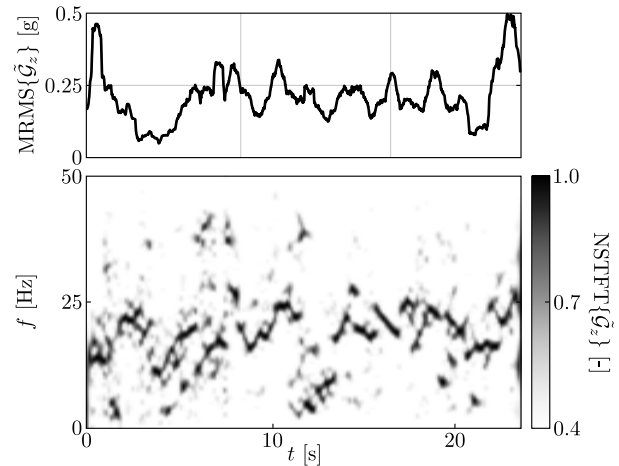


Bild 10 Vertikale Vibration des ersten Wagens auf Sitzhöhe, entsprechend einer Messung einer echten Achterbahn. Oben: bewegender quadratischer Mittelwert. Unten: normalisierte Kurzzeit-Fourier-Transformation.

6 Literatur

- [1] Brearley, M.N.: *Investigation of Castor-Wheel Shimmy*. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 33, No. 4, pp. 491–505, 1980.
- [2] Flores, P.; Lankarani, H.M.: *Contact Force Models for Multibody Dynamics*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [3] Fujita, K.; Katsuoka, K.; Toshimitsu, H.: *Dynamics of Two-Wheels Modeling Roller Coaster Running on a Complicated 3 Dimensional (3D) Trajectory Considering Air Resistance*. Journal of System Design and Dynamics, Vol. 5, No. 3, pp. 403–415, 2011.
- [4] Horvath, H.Z.; Takacs, D.: *Analogue Models of Rocking Suitcases and Snaking Trailers*. Nonlinear Dynamics of Structures, Systems and Devices, pp. 117–126, 2020.
- [5] Lu, J.; Xu, Y.; Hu, C.; Vakakis, A.F.; Bergman, L.A.: *5-DOF Dynamic Model of Vehicle Shimmy System with Clearance at Universal Joint in Steering Handling Mechanism*. Shock and Vibration, Vol. 20, No. 5, pp. 951–961, 2013.
- [6] Malessa, C.S.: *Eine objektorientierte Simulationsumgebung für die Analyse von Schwingungsvorgän-*

gen bei Achterbahnfahrten. Doktorarbeit, Universität Duisburg-Essen, 2016.

- [7] Nakagawa, C.; Katsuhisa, F.: *Motion and Vibration of Multi-Vehicles on a 3D Trajectory*. 5th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control, Vol. 6, Parts A, B, and C, pp. 1331–1340, 2005.
- [8] Podwórna, M; *Modelling Of Random Vertical Irregularities Of Railway Tracks*. International Journal of Applied Mechanics and Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 647–655, 2015.
- [9] Stépán, G.: *Chaotic Motion of Wheels*. Vehicle System Dynamics, Vol. 20, No. 6, pp. 341–351, 1991.
- [10] Zamora Agustí, M.G.; Kecskeméthy, A.: *A first analysis of possible elementary causes of self-excited vibrations in roller coaster rides*. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, Wiley, 2022.
- [11] Zamora Agustí, M.G.; Kecskeméthy, A.: *Self-excitability of roller coaster trains along spatial trajectories*. ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics, 2023.
- [12] Zamora Agustí, M.G.; Kecskeméthy, A.: *Self-excitability of roller coaster trains along spatial trajectories*. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, Wiley, 2023.
- [13] Zheng, L.H.; Liu, Z.; Chen, M.L.; Zhu, Y.T.: *Vibration modeling and position-dependent analysis of spatial trajectory roller coaster*. Archive of Applied Mechanics, Vol. 87, No. 3, pp. 489–502, 2017.

Anforderung und Durchführung von Feldtests an realen Windenergieanlagen mit moderner Regelung

Requirement and realisation of field tests on real wind turbines with modern control systems

Jeffrey Stegink*, Thorben Wintermeyer-Kallen[#], Andreas Klein[#], Julia Kersten*, Reik Bockhahn*, Dirk Machost*, Maximilian Basler[#], Dirk Abel[#], Janos Zierath*

* W2E Wind to Energy GmbH
Grubenstraße 44
18055 Rostock
JStegink@wind-to-energy.de

[#] Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen
Institut für Regelungstechnik
Campus-Boulevard 30
52074 Aachen

Kurzfassung

1 Einleitung

Durch die Energiewende und die damit verbundene Auslegung von immer leistungsfähigeren Windenergieanlagen (WEA) wird die strukturelle Integrität in Hinblick auf eine maximale Lebenserwartung zu einer anspruchsvollen Aufgabe. Derzeit werden Windenergieanlagen mit einer Vielzahl von Einzelregelkreisen betrieben. Dazu gehören unter anderen eine Drehmomentregelung, eine Drehzahlregelung, eine Leistungsregelung, eine individuelle Pitchregelung und weitere, welche jedoch alle das Drehmoment des Generators bzw. die Pitchgeschwindigkeit der Rotorachsen stellen. Zum Problem führt hierbei, dass die Ziele einiger Regelkreise konträr zueinander sind, wodurch sich eine einheitliche Parametrierung über den gesamten Betriebsbereich schwierig gestaltet. Um diesen steigenden Anforderungen gerecht zu werden, finden moderne Regelstrategien Anwendung. Theoretische Untersuchungen dazu finden bereits seit Jahrzehnten statt. Eine adäquate Umsetzung in die Praxis scheidet zumeist an unzureichenden Ressourcen bzw. Zugang zu realen Anlagen. Die Zusammenarbeit der W2E mit der RWTH bietet hier die Möglichkeit, Theorie und Praxis zu vereinen.

2 Problembeschreibung

Aus wirtschaftlicher Sicht werden die klassischen PID-Regelalgorithmen aus der industriellen Praxis verwendet und so ausgelegt, dass diese stets die maximale Ausbeute aus den vorhandenen Umgebungsbedingungen erzielen. Im Gegensatz dazu verfolgt die modellprädiktive Regelung (MPR) das Ziel, aus einer Vielzahl möglicher Szenarien das optimale Regelverhalten zu ermitteln. Durch die Schätzung der aktuellen und die Vorhersage zukünftiger Zustandsgrößen der Windkraftanlagen nimmt die MPR einen proaktiven Charakter im Vergleich zum reaktiven Charakter der klassischen Regelung an. Modellbasierte Prädiktive Regelungen bietet aufgrund der Echtzeit-Optimierung den Vorteil gegenläufige Regelziele, wie Leistungsoptimierung und Lastreduktion, unter Einhaltung der vorgegeben Betriebsgrenzen, optimal zu erreichen. Während der Entwurf von modellprädiktiven Reglern für Windenergieanlagen in Simulationen in akademischen Studien ausführlich untersucht wurde [1], zeigte die Anwendung dieser Regler auf reale Windenergieanlagen lange offene Forschungsfragen auf. Das liegt möglicherweise daran, dass es noch keine vereinheitlichte Richtlinie zur Implementierung von nicht klassischen Reglern auf WEA gibt, die Anzahl an Forschungs-WEA minimal vertreten sind und die Implementierung neuer Regelungen auf einer Anlage eine Zertifizierungsprozedur mit sich zieht. Ein weiteres Problem besteht darin, dass moderne Regelalgorithmen mehr Rechenkapazität benötigen als die bisher eingesetzten PID-Regler und somit an die Grenzen der Echtzeitplattformen stoßen können.

3 Methodik

Seit 2020 wurden vier Feldtests an der WEA 'W2E- 120/3.0fc' der Firma W2E Wind to Energy GmbH durchgeführt [2,3]. Bei der Anlage handelt es sich um eine dreiflügelige Horizontalachsen-Windturbine mit einer Nennleistung von 3 MW, einem Rotordurchmesser von 120 m und einer Nabenhöhe von 100 m. In Vorbereitung auf den Feldtest wurde ein modellbasierter, simulationsgestützter Entwicklungsprozess angewandt. Ein solcher Entwicklungsprozess bietet den Vorteil systematisch die modellprädiktive Regelung, für künftige Feldtests, entwerfen und erproben zu können. Die Teststufen 'System Simulation', 'Software in the Loop (SiL) Test' und 'Hardware in the Loop (HiL) Test' werden in [4] vorgeschlagen. Der Hintergrund hierfür ist die strukturelle Trennung von Meilensteinen im Entwicklungsprozess. Während der SiL-Test für die funktionale Erprobung der MPR in einer etablierten Simulationsumgebung zur Bewertung der simulierten

Systemzustände genutzt wird, wird der HiL-Test sowohl für die Kontrolle auf Echtzeitfähigkeit als auch für die generelle Prüfung der Funktionsfähigkeit des generierten Codes auf der SPS sowie zur Evaluation des Kommunikationssystems soft- und hardwareseitig genutzt. Erst nach erfolgreichem Abschließen dieser Stufen wird der eigentliche Feldtest angesetzt. Zusätzlich zu diesen vorangegangenen Sicherheitsmaßnahmen, läuft während des Feldtests die zertifizierte Software inklusive der konventionellen Reglerstruktur als Fail Safe im Hintergrund. Im Falle eines Versagens des neuen Regelalgorithmus wäre die Anlage damit geschützt. Außerdem erfolgt durch geschultes Personal eine konstante Überprüfung relevanter Systemparameter, wobei an zwei getrennten Stellen manuell eingegriffen werden kann

4 Ergebnisse

In folgender Abbildung 1 werden die Simulationsergebnisse aus dem SiL Test präsentiert. Hier wird aus dem Teillastbereich gestartet, um die Regelung nicht gleich unter Volllast zu prüfen. Nach 600 Sekunden wird die Windgeschwindigkeit erhöht, sodass die Regelung auch unter Volllast erprobt werden kann.

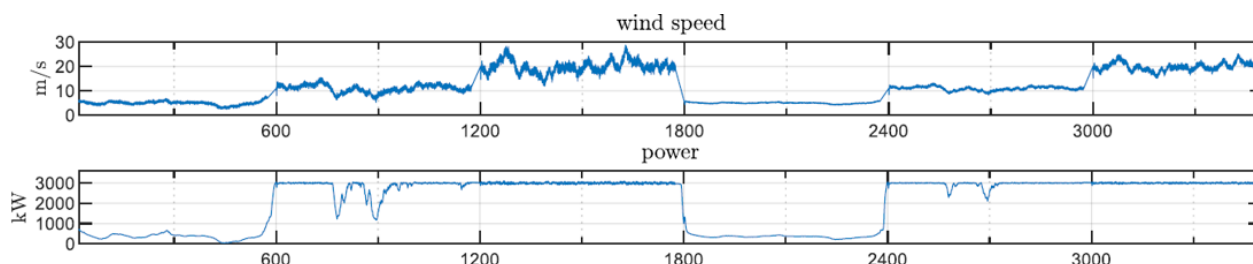


Bild 1 Simulationsergebnisse aus einem SiL Test [2]

In der nächsten Abbildung 2 sind Ergebnisse aus einem Feldtest zu sehen. Insgesamt lief die Anlage unter neuer Regelung etwa 3 Stunden durch.

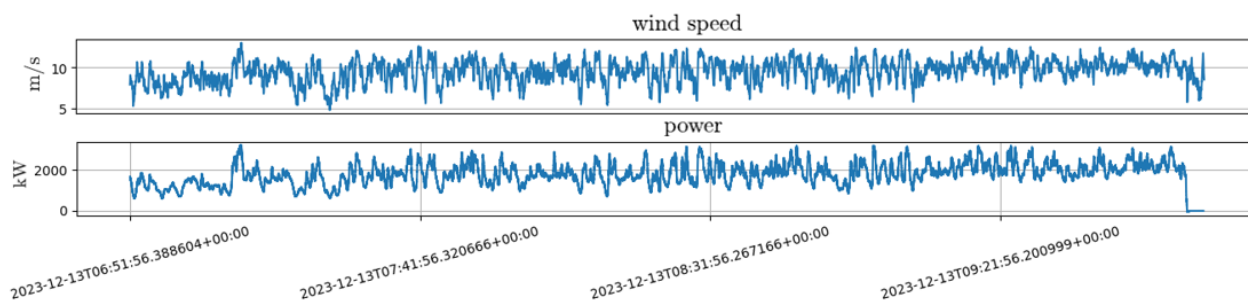


Bild 2 Ergebnisse aus dem Feldtest

5 Zusammenfassung

Die Messzeit für erfolgreich aufgenommene Messdaten erhöhte sich vom ersten Feldtest von 90 min in mehreren Abschnitten auf zwei Mal durchgängig aufgenommene drei Stunden beim vierten Feldtest. Entlang der Zeitachse der durchgeführten Feldtests konnte eine kontinuierliche Verbesserung erzielt werden. Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass der Feldtest ein zeitaufwändiger Prozess werden kann. Bei den simulierten Test kann die Windgeschwindigkeit auf den zu untersuchenden Bereich eingestellt werden. Im Gegensatz dazu kann der Feldversuch mittels Windvorhersagen zeitlich nur grob geplant werden. Zusätzlich ist darauf zu achten, dass für die Inbetriebnahme des neuen Reglers möglichst wenig Wind herrscht, dieser sollte im Idealfall allerdings ansteigen, um das Reglerverhalten für alle Betriebsbereiche zu überprüfen.

Literatur

- [1] LIO, Alan Wai H.: A Review on Applications of Model Predictive Control to Wind Turbines, 2014
- [2] DICKLER, Sebastian: Full-scale field test of a model predictive control system for a 3 MW wind turbine, 2021. – ISSN 0015–7899, S. 313–323
- [3] ZIERATH, JANOS: Model Predictive Control on Wind Turbines - Steps to the Industrial Practice and Perspectives IUTAM Symposium on Optimal Design and Control of Multibody Systems, Hamburg (Germany), 18 Jul - 21 Jul 2022
- [4] DICKLER, Sebastian: Rapid control prototyping of model predictivewind turbine control toward field testing, 2020

Eine integrierte Anwendung zur Untersuchung energieeffizienter, ungleichmäßig übersetzender Getriebe

An Integrated Application for the Investigation of Energy-Efficient, Non-Uniformly Translating Mechanisms

Thomas Knobloch* M.Sc., Knobloch@igmr.rwth-aachen.de

Luca Freiwald* B.Sc., Freiwald@igmr.rwth-aachen.de

Mathias Hüsing*, Prof. Dr.-Ing., Huesing@igmr.rwth-aachen.de

Burkhard Corves*, Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c., Corves@igmr.rwth-aachen.de

*RWTH Aachen University, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, 52062 Aachen, Deutschland

Kurzfassung

Ungleichmäßig übersetzende Getriebe werden in mehreren iterativen Schritten entwickelt. Heutzutage gibt es zahlreiche Softwaresysteme für die Entwicklungsphasen. Selbst einfache Geometriesoftwaresysteme können zur Erstellung und Analyse von Getriebestrukturen verwendet werden. Spezialisierte Getriebeentwurfsoftware unterstützt den Anwender bei der Synthese. Das Getriebe wird dann in der Regel im CAD konstruiert. Für die dynamische Analyse werden Mehrkörpersimulationsprogramme benötigt. Bisher war der computergestützte Mechanismenentwicklungsprozess durch die isolierte Verwendung verschiedener Softwaresysteme gekennzeichnet. In diesem Beitrag wird eine Anwendung vorgestellt, die alle Phasen des Entwicklungsprozesses von der Beschreibung der Bewegungsaufgabe bis zur dynamischen Analyse am Beispiel eines Kurvengetriebes umfasst.

Abstract

Non-uniformly translating mechanisms are developed in several iterative steps. Nowadays, numerous software systems exist for the development phases. Even simple geometry software systems can be used to create and analyse mechanism structures. Specialised mechanism design software supports the user during the synthesis. The mechanism is then usually designed in CAD. Multibody Dynamic software programs are required for the dynamic analysis. To date, the computer-aided mechanism development process has been characterised by the isolated use of different software systems. This paper presents an application which comprises all phases of the development process from the motion task description through to dynamic analysis, using an exemplary cam mechanism.

1 Einleitung

Bewegungsdesign ist eine grundlegende Aufgabe in der Produktentwicklung und zielt darauf ab, Lösungen zur Erfüllung von Bewegungsaufgaben zu entwickeln. Ungleichmäßig übersetzende Getriebe zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine konstante Eingangsbewegung in eine ungleichmäßige, nicht konstante Ausgangsbewegung übersetzen. Auch heutzutage werden diese Getriebe noch häufig in hochdynamischen Maschinen wie Verpackungs- und Textilmaschinen eingesetzt. Im Hinblick auf den Energieverbrauch ist der Antrieb dieser Mechanismen mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit in der Regel nicht die beste Lösung. Da mehr als ein Drittel des weltweiten Energieverbrauchs auf den Industriesektor entfällt, besteht ein langfristiger Ansatz für Nachhaltigkeit darin, die Produktion durch effiziente Prozessgestaltung zu verbessern [1]. Die Senkung des Energieverbrauchs ist besonders wichtig und steht im Einklang mit dem Hauptziel der EU, die Energieeffizienz zu steigern [2]. Ungleichförmig übersetzende Getriebe in hochdynamischen Maschinen laufen oft im Mehrschichtbetrieb und bieten daher ein großes Poten-

zial zur Energieeinsparung. Die sogenannte Eigenbewegung ist die Winkelgeschwindigkeit, mit der sich ein Getriebe ohne äußere Einflüsse bewegt. Abgesehen von Reibung und Prozesskräften behält das Getriebe ein konstantes Energieniveau bei und verliert somit keine nutzbare Energie [3]. Die Eigenbewegung eines ungleichmäßig übersetzenden Getriebes ist durch einen nicht konstanten Winkelgeschwindigkeitsverlauf gekennzeichnet, der durch hochpräzise Servomotoren gesteuert werden kann. Seit der Entwicklung von Servomotoren ist der Betrieb von ungleichmäßig übersetzenden Getrieben in ihrer Eigenbewegung Gegenstand aktueller Forschung. Am Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik (IGMR) der RWTH Aachen konnte bereits gezeigt werden, dass der Betrieb eines Koppelgetriebes in Eigenbewegung zu einer deutlichen Energieeinsparung führt [4]. Kurvengetriebe, die häufig zur Erzeugung von Rasten eingesetzt werden, sind in vielen hochdynamischen Maschinen zu finden. Gegenstand dieses Forschungsprojekts ist die Anwendung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz auf Rastgetriebe mit Kurvenscheiben, insbesonde-



re die Entwicklung von Synthesemethoden und die Untersuchung des Eigenbewegungsbetriebs. Die Kontur der Kurvenscheibe soll digital auf Basis der Bewegungsanforderungen synthetisiert werden, bevor die Eigenbewegung des Kurvengetriebes untersucht wird. Heutzutage gibt es zahlreiche Softwaresysteme für den Entwurf von ungleichmäßig übersetzenden Getrieben. Mit Hilfe von Geometrieprogrammen können Getriebestrukturen erstellt und kinematisch analysiert werden. Spezielle Softwaresysteme für den Entwurf von Mechanismen unterstützen die Getriebesynthese. Der Mechanismus wird dann oft mit Hilfe von CAD-Programmen entworfen. Für die anschließende dynamische Analyse werden Mehrkörper simulationsprogramme benötigt. Bislang ist der computergestützte Getriebeentwicklungsprozess durch die isolierte Verwendung verschiedener Softwaresysteme gekennzeichnet. Dies behindert den Entwicklungsprozess eines Getriebes, insbesondere durch seinen iterativen Charakter. Darüber hinaus werden sich in Zukunft neue Herausforderungen ergeben, da es jungen Ingenieur*innen an Know-how im Bereich der Getriebetechnik mangelt. Dies ist unter anderem auf die abnehmende Zahl von Forschungsinstituten in diesem Fachgebiet zurückzuführen. Folglich besteht ein Bedarf an einer integrierten Softwarelösung für alle Entwicklungsphasen eines ungleichmäßig übersetzenden Getriebes, von der Beschreibung der Bewegungsaufgabe bis zur dynamischen Analyse. Derzeit ist keine Softwarelösung bekannt, die diese Anforderungen vollständig erfüllt. Ein ganzheitlicher Ansatz stellt sicher, dass die Auswirkungen von frühen Konstruktionsentscheidungen auf das spätere Betriebsverhalten des konstruierten Mechanismus direkt abgeschätzt werden können. In diesem Beitrag werden die Anwendungssoftware, ihr Aufbau und die Simulationsergebnisse anhand eines beispielhaften Kurvengetriebes vorgestellt.

2 Phasen des Getriebeentwicklungsprozesses

Die Phasen des Getriebeentwicklungsprozesses sind wie folgt gegliedert [5]:

1. Beschreibung der Bewegungsaufgabe
2. Struktursynthese
3. Maßsynthese
4. Konstruktive Ausgestaltung
5. Dynamische Analyse

Zunächst muss die Bewegungsaufgabe definiert werden. Die Übertragungsfunktion für Übertragungskurvengetriebe kann nach [6] berechnet werden. Zur Definition der Führungsbahn für Führungskurvengetriebe muss zum einen die gewünschte Bahngeometrie in den x - y -Ebenen als Funktion des Antriebswinkels φ beschrieben werden. Zum anderen wird die Zeitfunktion des zurückgelegten Weges benötigt. Für die Struktursynthese stehen beispielsweise Kataloge zur Auswahl einer geeigneten Getriebestruktur

zur Verfügung [7]. In der Maßsynthese werden die kinematischen Parameter des zu entwickelnden Getriebes bestimmt, um die geforderte Bewegungsaufgabe zu erfüllen. Bei Kurvengetrieben besteht zusätzlich die Aufgabe, eine geeignete Arbeitskurve zu berechnen. Mit Hilfe der Bewegungsgesetze nach [6] kann die Bewegung dreigliedriger Kurvengetriebe bereits bei gegebenen kinematischen Parametern vollständig bestimmt werden. Für mehrgliedrige Getriebe- und Führungskurvengetriebe sind zusätzliche Berechnungen zur Bestimmung der Bewegung bei einer gegebenen Arbeitskurve oder umgekehrt erforderlich. Mit [8] und [9] wird eine Lösung nach der sogenannten Modulmethode angeboten. Die Konstruktion der Mechanik wird in der Regel getrennt von der Getriebesynthese in CAD-Systemen durchgeführt. Während für kinematische Berechnungen die Getriebestruktur bereits ausreichend ist, müssen die Getriebeglieder für dynamische Berechnungen mit zusätzlichen Informationen wie Masse oder Massenträgheitsmoment spezifiziert werden [10]. Neben der Kinematik ist die Dynamik ein grundlegender Bestandteil eines jeden Mehrkörpersimulationsprogramms. Das bedeutet, dass die Bewegung eines Mechanismus aufgrund von außen einwirkender Kräfte, zum Beispiel der Schwerkraft oder einem Antriebsmoment, bestimmt werden kann. Die Bewegungsgleichungen der einzelnen Körper bilden zusammen ein Gleichungssystem, das in der Regel nur numerisch gelöst werden kann. Der *Solver* eines Mehrkörpersimulationsprogramms bietet Lösungsmethoden, um die Differentialgleichungssysteme durch numerische Integration zu lösen [11].

3 Eigenbewegung

Für die energetische Optimierung eines Getriebes sind vor allem Ausgleichsmaßnahmen für den Antrieb, der sogenannte Leistungsausgleich, relevant [3]. Zu den Leistungsausgleichsmaßnahmen gehört zum Beispiel der Antrieb eines Getriebes in seiner Eigenbewegung. Diese beschreibt den Bewegungszustand, der in einem konservativen Getriebe bei konstantem Energieniveau auftritt:

$$\dot{\varphi}_e = \sqrt{\frac{\frac{1}{2}J_{red}(\varphi_0) \cdot \dot{\varphi}_0^2 + E_{pot}(\varphi_0) - E_{pot}(\varphi)}{\frac{1}{2}J_{red}(\varphi)}} \quad (1)$$

Dabei bezeichnen $\dot{\varphi}_e$ die Eigenbewegung, $\dot{\varphi}_0$ die Anfangswinkelgeschwindigkeit, J_{red} das reduzierte Massenträgheitsmoment und E_{pot} die potentielle Energie. Da die gespeicherte Energie von der Stellung des Getriebes und seiner Geschwindigkeit abhängt, führen unterschiedliche Anfangszustände eines Getriebes zu unterschiedlichen Eigenbewegungen. Treten keine äußeren Prozesskräfte auf, muss vom Antriebsmotor des Getriebes nur ein kleines Drehmoment aufgebracht werden, um die Reibung zu überwinden. Wenn dissipative Effekte vernachlässigt werden, ist theoretisch kein Antriebsmoment und damit keine Leistung erforderlich. Daher maximiert der Betrieb eines Getriebes in seiner Eigenbewegung die Energieeffizienz [4]. Die Synthese eines Getriebes mit vorgegebener Eigenbewegung (auch *dynamische Synthese* genannt) führt somit

zu zusätzlichen Bedingungen hinsichtlich der dynamischen Eigenschaften im Vergleich zur konventionellen Getriebesynthese. Für eine Schubkurbel beispielsweise beeinflussen bereits 12 Parameter die Funktion der Eigenbewegung. Dazu gehören die Abmessungen und Massen der Glieder sowie die Schwerpunktslagen. Die gewünschte Eigenbewegung kann also durch zahlreiche Kombinationen von Werten für diese Parameter erreicht werden. Darüber hinaus soll der Mechanismus eine bestimmte Bewegungsaufgabe erfüllen, so dass sich zusätzliche Bedingungen hinsichtlich dessen kinematische Parameter ergeben. Aufgrund der großen Anzahl von Parameterkombinationen zur Erfüllung der Bedingungen werden in der dynamischen Synthese Optimierungsalgorithmen eingesetzt, um die Kombinationen zu ermitteln, die die Bedingungen am besten erfüllen. Um die Anzahl der Parameter zu reduzieren, werden die Getriebeglieder vor der Optimierung durch dynamisch äquivalente Systeme vereinfacht. Die Aufgabe des Ingenieurs besteht dann darin, aus den dynamisch äquivalenten Gliedern, die durch wenige Parameter beschrieben werden, reale Glieder mit allen zugehörigen Parametern zu konstruieren. Dies ist oft nur durch iterative Variation der Parameter des realen Getriebeelements möglich. So gibt es z. B. für das Massenträgheitsmoment oft keinen analytischen Ausdruck, aber ein bestimmter Wert muss dennoch eingehalten werden, um den Ergebnissen des Optimierungsalgorithmus zu entsprechen.

Aufgrund dieses zusätzlichen Entwurfsaufwands und der erforderlichen Kenntnisse über mathematische Optimierungsprobleme hat sich die dynamische Synthese trotz ihres Potenzials für Energieeinsparungen in der Praxis noch nicht durchgesetzt. Dies verdeutlicht den Bedarf an einer benutzerfreundlichen Methodik für die Synthese und Optimierung energieeffizienter Mechanismen.

4 Rechnergestützter Entwicklungsprozess

Für die rechnergestützte Getriebeentwicklung stehen zahlreiche Softwarewerkzeuge mit unterschiedlichem Funktionsumfang zur Verfügung. In [13] erfolgt eine Einteilung in:

- Dynamische Getriebesoftware
- Software für Entwurf und Analyse von Getrieben (Getriebeentwurfsoftware)
- CAD-Systeme
- Werkzeuge für die Mehrkörpersimulation

Mit dynamischer Geometriesoftware wie GeoGebra [14] lassen sich geometrische Konstruktionen aus Punkten, Kreisen und Geraden erstellen. Auf diese Weise können ebene Koppelgetriebe strukturell dargestellt werden. Die Werkzeuge dieser Gruppe bieten begrenzte Möglichkeiten zur Definition der Bewegungsaufgabe und zur Synthese. Aufgrund ihrer einfachen Bedienbarkeit sind diese Programme jedoch gut geeignet, um einfache Getriebekonzepte zu visualisieren.

Zu den Softwaresystemen für den Getriebeentwurf gehören Werkzeuge wie *MechDev*, das am IGMR der RWTH Aachen entwickelt wurde [15], die Getriebesoftware *SAM* von Artas [16], die Software *GIM* von der Universität des Baskenlandes [17], das speziell für Kurvengetriebe entwickelte Programm *Optimus Motus* der Nolte-NC-Kurventechnik GmbH [18] oder *GENESYS*, das am Institut für Getriebetechnik der Leibniz Universität Hannover entwickelt wurde [19]. Der Funktionsumfang dieser Anwendungen ist auf die Getriebesynthese fokussiert. Funktionalitäten, die über die Synthese hinausgehen, sind in der Regel nicht oder nur in geringem Umfang verfügbar. Für die Konstruktion der Getriebeglieder werden nach wie vor CAD-Anwendungen benötigt. Eine dynamische Analyse des Mechanismus, die über Kinematik und Kinetostatik hinausgeht, ist mit dieser Softwaregruppe aufgrund fehlender Lösungsmethoden für Differentialgleichungssysteme nicht möglich.

Zu den CAD-Systemen gehören hauptsächlich kommerzielle Anwendungen wie *CATIA* und *SolidWorks* von Dassault Systèmes [20, 21] oder *AutoCAD* und *Inventor* von Autodesk [22, 23]. Im Prinzip können grafische Synthesemethoden auch bei der 2D-Modellierung über Skizzen in CAD-Systemen verwendet werden. Die Synthese in Geometriesoftware ist jedoch intuitiver und weniger zeitaufwändig [13].

Tools für die Mehrkörpersimulation sind Produkte wie *Adams* von Hexagon [24], *Simcenter* von Siemens PLM [25] oder *Simpack* von Dassault Systèmes [26]. Mit *Simscape Multibody* [26] bietet Matlab eine Umgebung zur Simulation von Mehrkörpersystemen. Die Dynamik des Gesamtsystems, das Komponenten aus verschiedenen technischen Domänen enthält, kann analysiert werden. Allen Produkten ist gemeinsam, dass nichtlineare Differentialgleichungssysteme numerisch gelöst werden müssen, um die Dynamik des betrachteten Systems zu beschreiben. Dies unterscheidet die Mehrkörpersimulationen von den anderen Softwaregruppen, in denen nur kinematische und kinetostatische Zusammenhänge dargestellt werden können. Um Systeme möglichst realitätsnah zu modellieren, können Körper als CAD-Modelle in die Mehrkörpersimulation importiert werden. Dadurch kann das dynamische Verhalten eines Systems bereits vor der eigentlichen Konstruktion abgeschätzt werden.

Es gibt derzeit keine bekannte Softwarelösung, die die Anforderungen aller Phasen eines computergestützten Mechanismenentwicklungsprozesses erfüllt. Es besteht daher ein Bedarf an einer integrierten Anwendung, die die Funktionalitäten der verschiedenen Softwaregruppen kombiniert.

5 Entwicklung der Software

Die Entwicklung erfolgt in der Matlab-Zusatzanwendung *App Designer*, die dafür sorgt, dass die erstellte Anwendung in die Matlab-Umgebung integriert wird. **Bild 1** zeigt die Benutzeroberfläche der Anwendung mit einem Führungskurvengetriebe.

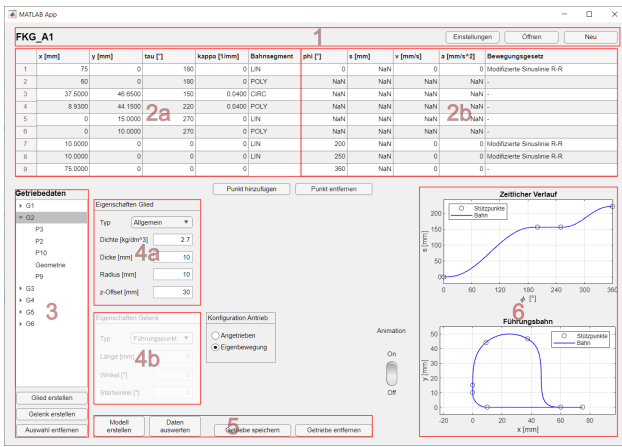


Bild 1 Synthese eines Führungskurvengetriebes mithilfe der entwickelten Anwendung

Der Name des geöffneten Getriebes wird auf der linken Seite in Bereich 1 angezeigt. Auf der rechten Seite befinden sich drei Buttons zum Anlegen eines neuen Getriebes, zum Öffnen eines bestehenden Getriebes oder zum Vornehmen von Einstellungen für das aktuelle Getriebe. Die Antriebsbewegung wird über die Winkelgeschwindigkeit parametrisiert. Außerdem kann die Schrittweite $\Delta\varphi$ des Antriebswinkels eingestellt werden. Dies beeinflusst, wie detailliert alle von φ abhängigen Größen dargestellt werden. Dazu gehören z. B. die Übertragungsfunktion oder die Führungsbahn. Auch für Kurvengetriebe gibt es eigene Einstellungen. Dazu gehört neben dem Rollenradius der Eingriffslieder auch ein Mindestabstand zwischen den Punkten für die Darstellung der Rollenmittelpunktbahn. Auch für die Simulation können Einstellungen vorgenommen werden. Dazu gehören der maximal zulässige Zeitabstand zwischen zwei Simulationsschritten und Einstellungen für die Toleranz des Solvers. Schließlich können weitere Einstellungen vorgenommen werden, wie z. B. die Größe des Schwerfeldes, in dem das Getriebe simuliert werden soll, der Detaillierungsgrad der automatisch konstruierten Getriebeelemente und die Angabe der Anzahl der Punkte, die zur Berechnung der Bogenlänge einer Führungsbahn durch numerische Integration verwendet werden. Im Bereich 2 der Benutzeroberfläche in Bild 1 befindet sich die Bewegungstabelle. Diese wird in der Regel nur für die Entwicklung von Kurvengetrieben benötigt. In der linken Tabelle, Bereich 2a, wird die Geometrie der Führungsbahn definiert. Dazu wird in jeder Zeile der Tabelle ein Stützpunkt, bestehend aus x - und y -Koordinaten, und das Bahnsegment zum nächsten Punkt eingetragen. Für einige Segmente werden zusätzliche Informationen in Form des Tangentenwinkels τ und der Krümmung κ [28] benötigt. Für den zeitlichen Verlauf der Führungsbahn und die Übertragungsfunktion für Übertragungskurvengetriebe werden die gleichen Bewegungsgesetze nach [6] verwendet. Dementsprechend können die Daten für beide Berechnungen in die rechte Hälfte der Tabelle (Bereich 2b) eingetragen werden. Die mittleren drei Spalten müssen an den Kurventriebtypen angepasst werden. Zur Definition des zeitlichen Verlaufs für Führungskurvengetriebe müssen dort der zurückgelegte

te Weg s sowie die Geschwindigkeit v und die Beschleunigung a an den jeweiligen Stützstellen eingetragen werden. Bei Kurvengetrieben mit Rollenhebeln wird für die Berechnung der Übertragungsfunktionen 0. bis 2. Ordnung der Abtriebswinkel ψ einschließlich der ersten und zweiten Ableitung nach φ angegeben. In ähnlicher Weise wird bei Kurvengetrieben mit Rollenstößeln der Abtriebshub s und seine Ableitungen angegeben. Die äußeren Spalten für den Antriebswinkel φ und die Bewegungsgesetze werden für alle Kurvengetriebe-Typen benötigt.

Das beispielhafte Führungskurvengetriebe ist aus [28] entnommen. **Bild 2** zeigt das resultierende Getriebe mit automatisch erzeugten Gliedern und den ermittelten Kurvenscheiben.

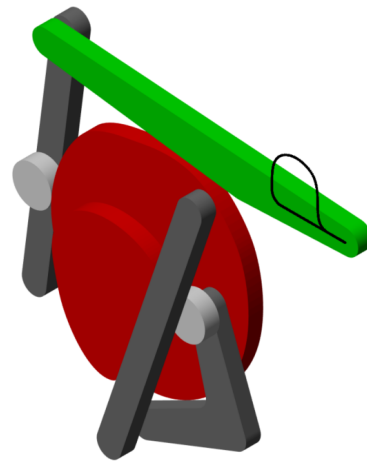


Bild 2 Automatisch erzeugtes Mehrkörpermodell des Führungskurvengetriebes

Die berechnete Führungsbahn ist in **Bild 3** dargestellt.

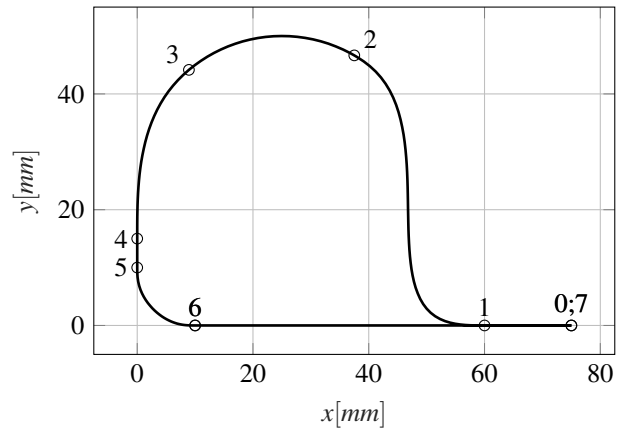


Bild 3 Berechnete Führungsbahn

5.1 Dynamische Analyse des Beispielgetriebes

Zur Bestimmung der Eigenbewegung wird das Antriebsgelenk in der App mit einer Antriebswinkelgeschwindigkeit von $\omega = 10 \text{ rad/s}$ und ohne Antriebsmoment konfiguriert. Reibungs- und Prozesskräfte werden vernachlässigt, so dass dem Getriebe weder Energie zugeführt noch entzogen

wird. Das Energieniveau bleibt also konstant und die Eigenbewegung wird automatisch eingestellt. Anschließend wird dem Simulationsmodell eine Antriebsträgheit mit einem Massenträgheitsmoment von $J_m = 30kgcm^2$ hinzugefügt. **Bild 4** zeigt die Verläufe des Antriebswinkels φ und der Antriebswinkelgeschwindigkeit ω in Eigenbewegung bei einer Erdbeschleunigung von $g = 9,81m/s^2$.

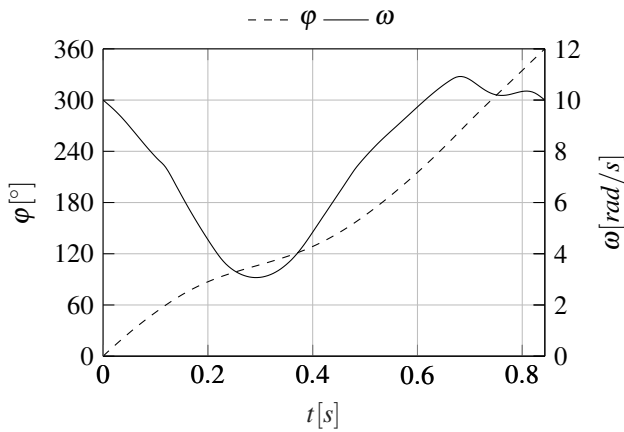


Bild 4 Eigenbewegung des Führungskurvengetriebes

Das Getriebe befindet sich in der Ausgangsstellung bei $t = 0$ gemäß Bild 3. Das Diagramm zeigt die Auswirkung des Betriebs in Eigenbewegung auf die Rastdauer. Diese erstreckt sich über einen Antriebswinkel $200^\circ < \varphi < 250^\circ$ oder über die Zeitspanne $0,57s < t < 0,66s$. Da die Antriebswinkelgeschwindigkeit in diesem Bereich nicht konstant ist, ergibt sich eine andere Rastdauer als bei einem Antrieb mit konstanter Winkelgeschwindigkeit. Dies wird in **Bild 5** verdeutlicht.

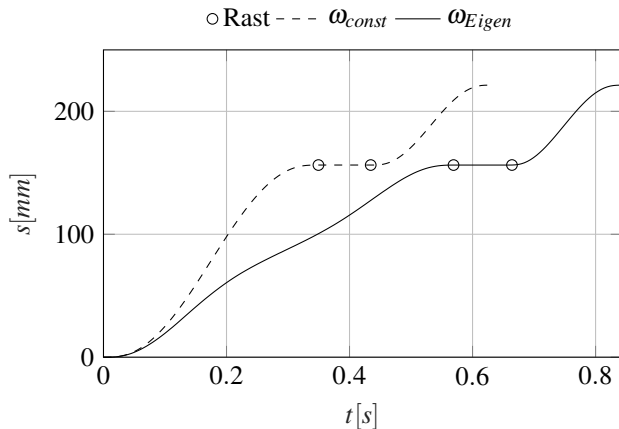


Bild 5 Bewegungsverlauf bei konstantem Antrieb und in Eigenbewegung

Soll trotz des Betriebs in Eigenbewegung eine exakte Rastdauer eingehalten werden, muss dies bei der Definition der Bewegungsaufgabe berücksichtigt werden. Da während der Rastdauer in der Regel alle Getriebeglieder außer dem Antriebsglied (Kurbel oder Kurvenscheibe) stillstehen, wird die gesamte Energie in diesem Glied gespeichert. Daher hat das Antriebsglied während der Rast oft eine erhöhte Winkelgeschwindigkeit. Dementsprechend ist

die Rastdauer bei Eigenbewegung in der Regel kürzer als bei einem Antrieb mit konstanter Drehzahl.

5.2 Erweiterung des Mehrkörpermodells um CAD-Modelle

Sobald die Struktur und die Abmessungen des Mechanismus festgelegt sind, können die automatisch konstruierten Getriebeglieder durch detailliertere CAD-Modelle ersetzt werden, um das Simulationsmodell zu konkretisieren. **Bild 6** zeigt das CAD-Modell des Führungskurvengetriebes.

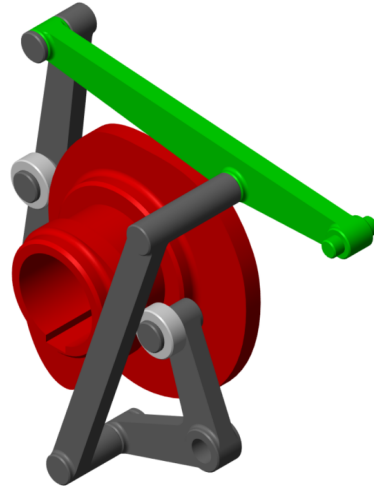


Bild 6 Mit CAD-Software konstruiertes Modell

Bild 7 zeigt die Antriebswinkelgeschwindigkeit in Eigenbewegung mit automatisch konstruierten Bauteilen und CAD-Modellen.

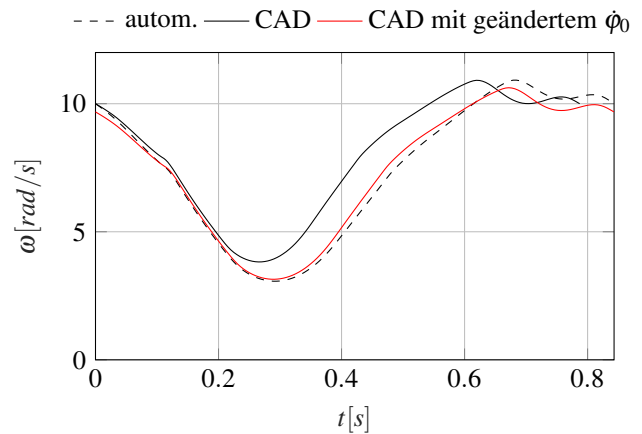


Bild 7 Eigenbewegungen das automatisch und des mit CAD-Software konstruierten Modells

Aufgrund des höheren Massenträgheitsmoments der CAD-Kurvenscheibe liegt die minimale Winkelgeschwindigkeit auf einem höheren Niveau und die Dauer einer Umdrehung ist daher kürzer. Aus diesem Grund erscheint die Funktion zeitlich versetzt. Wird die initiale Winkelgeschwindigkeit auf $\dot{\varphi}_0 = 9,68rad/s$ geändert, so ist die ursprüngliche Dauer einer Umdrehung wieder erfüllt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Entwicklung einer integrierten Software vorgestellt, die während aller Phasen des Getriebe-Entwicklungsprozesses unterstützt. Zu den Entwicklungsphasen gehören dabei die Beschreibung der Bewegungsaufgabe, die anschließende Struktur- und Maßsynthese, die konstruktive Ausgestaltung und eine dynamische Analyse des Getriebes.

Der nächste Schritt ist, die Anwendung um einen Optimierungsalgorithmus für Kurvenscheiben für den Betrieb in Eigenbewegung zu ergänzen. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass die gewünschte Rast, die ursprünglich für eine konstante Antriebsdrehzahl definiert worden ist, nun bei einem Betrieb in Eigenbewegung erfüllt wird. Gleichzeitig sollen Prüfstandsversuche zur Validierung der berechneten Ergebnisse durchgeführt werden.

7 Literatur

- [1] McKane, A.; Prince, L.; de la Rue du Can, S.: *Policies for Promoting Industrial Energy Efficiency in Developing Countries and Transition Economies*. In: Sustainable Industrial Development, Commission for Sustainable Development. (2007) 1-2, ISSN 1867-2590, S. 11-22.
- [2] European Commission: *EU climate action*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en Zuletzt aufgerufen am 25.01.2024.
- [3] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: *VDI-Richtlinie 2149, Blatt 1: Getriebedynamik - Starrkörper-Mechanismen*. VDI, Berlin: Beuth Verlag (2008).
- [4] Schwarzfischer, F.: *Energieeffiziente Bewegungssysteme durch Nutzung der Eigenbewegung*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2019), doi:10.18154/RWTH-2019-01466.
- [5] Heinrich, S.; Berger, M.: *Ein Beitrag zur ganzheitlichen Getriebesynthese für dynamisch stark beanspruchte Mechanismen*. In: Lüth, T. C.; Irlinger, F.; Abdul-Sater, K. (2015), doi:10.14459/2015md1276127.
- [6] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: *VDI-Richtlinie 2143, Blatt 1: Bewegungsgesetze für Kurvengetriebe; Theoretische Grundlagen*. VDI, Berlin: Beuth Verlag (2023).
- [7] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: *VDI-Richtlinie 2727, Blatt 1: Konstruktionskataloge; Lösung von Bewegungsaufgaben mit Getrieben; Grundlagen*. VDI, Berlin: Beuth Verlag (1991).
- [8] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: *VDI-Richtlinie 2729, Blatt 1: Modulare Analyse ebener Gelenkgetriebe mit Dreh- und Schubgelenken - Kinematische Analyse*. VDI, Berlin: Beuth Verlag (2016).
- [9] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: *VDI-Richtlinie 2142, Blatt 1: Auslegung ebener Kurvengetriebe - Grundlagen, Profilverrechnung und Konstruktion*. VDI, Berlin: Beuth Verlag (2018).
- [10] Holzmann, G.: *Technische Mechanik Kinematik und Kinetik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 10., überarbeitete Auflage (2010), doi:10.1007/978-3-8348-9762-6.
- [11] Rill, G.; Schaeffer, T.: *Grundlagen und Methodik der Mehrkörpersimulation: Vertieft in Matlab-Beispielen, Übungen und Anwendungen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2., überarb. und erw. Aufl. (2014), doi:10.1007/978-3-658-06084-8.
- [12] Schwarzfischer, F.; Hüsing, M.; Corves, B.: *Dynamic synthesis of energy-efficient mechanisms*. In: Int. J. Mechanisms and Robotic Systems, Vol. 4, No. 4, (2018), doi:10.1504/IJMRS.2018.096301.
- [13] Prause, I.; Fauroux, J.-C.; Hüsing, M.; Corves, B.: *Using Geometry Sketchers and CAD Tools for Mechanism Synthesis*. In: The 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan, October 25-30, 2015, doi:10.6567/IFTOMM.14TH.WC.OS3.032.
- [14] GeoGebra <https://www.geogebra.org/> Zuletzt aufgerufen am 25.01.2024.
- [15] Müller, M.; Mannheim, T.; Hüsing, M.; Corves, B.: *MechDev – A new Software for Developing Planar Mechanisms*. In: Kecskeméthy, A., Geu Flores, F., Carrera, E., Elias, D. (eds) Interdisciplinary Applications of Kinematics, Mechanisms and Machine Science, vol 71. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-16423-2_15
- [16] Artas Engineering Software: SAM <https://www.artas.nl/de/sam/features/allgemein>
- [17] Petuya, V.; Macho, E.; Altzararra, O.; Pinto, C. and Hernández, A. Educational Software Tools for the Kinematic Analysis of Mechanisms. Computer Applications in Engineering Education, vol. 22, pp. 72-86, 2014
- [18] Nolte NC-Kurventechnik: Optimus Motus <http://www.optimusmotus.de/> Zuletzt aufgerufen am 25.01.2024.
- [19] Braune, R.: *Die Getriebe-, Kinematik- und Mechanismen-Software GENESYS* <https://www.da-rb.de/genesys> Zuletzt aufgerufen am 25.01.2024.
- [20] Dassault Systèmes: CATIA <https://www.3ds.com/products/catia/catia-v5> Zuletzt aufgerufen am 25.01.2024.
- [21] Dassault Systèmes: SolidWorks <https://www.solidworks.com/de/product/solidworks-3d-cad> Zuletzt aufgerufen am 25.01.2024.
- [22] Autodesk: AutoCAD <https://www.autodesk.de/products/autocad> Zuletzt aufgerufen am 25.01.2024.
- [23] Autodesk: Inventor <https://www.autodesk.de/products/inventor> Zuletzt aufgerufen am 25.01.2024.

- [24] Hexagon: Adams <https://hexagon.com/de/products/product-groups/computer-aided-engineering-software/adams> Zuletzt aufgerufen am 25.01.2024.
- [25] Siemens PLM: Simcenter <https://plm.sw.siemens.com/de-DE/simcenter> Zuletzt aufgerufen am 25.01.2024.
- [26] Dassault Systèmes: Simpack <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/simulia/produkte/simpack/> Zuletzt aufgerufen am 25.01.2024.
- [27] The Mathworks Inc.: Simscape Multibody <https://de.mathworks.com/products/simscape-multibody.html> Zuletzt aufgerufen am 25.01.2024.
- [28] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: *VDI-Richtlinie 2741: Kurvengetriebe für Punkt- und Ebenenführung*. VDI, Berlin: Beuth Verlag (2004).

Interaktive Lehre von Maschinendynamik mit Jupyter Notebooks

Interactive Teaching of Machine Dynamics with Jupyter Notebooks

Nils Brückmann*, Christian Mirz*, Mathias Hüsing*, Burkhard Corves*

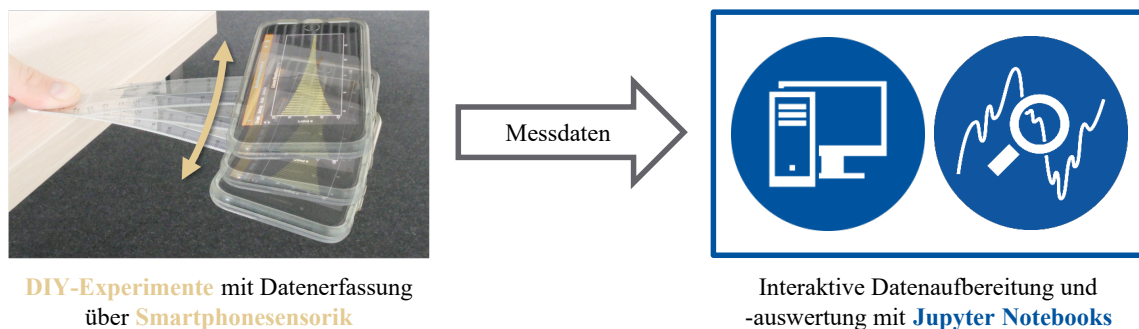
*RWTH Aachen University, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, 52062 Aachen, Deutschland
{brueckmann, mirz, huesing, corves}@igmr.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Mechanische Schwingungen sind sowohl in der industriellen Praxis als auch in unserem Alltag zu finden. Die zur Beschreibung und Analyse benötigten Grundlagen der Maschinen- und Strukturndynamik (GMSD) werden am Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik gelehrt. Zur praxisnahen Vertiefung der gelehnten Inhalte werden den Studierenden die Module „Dynamikspielwiese“ und „Praktische Einführung in die Maschinendynamik“ angeboten. Die Module sind freiwillige Zusatzangebote und können von Studierenden eigenständig im Selbststudium erarbeitet werden.

Mit der „Dynamikspielwiese“ wird Studierenden eine Simulationsumgebung für schwingfähige mechanische Systeme aus der Lehre von GMSD zur Verfügung gestellt. Entsprechend des Namens können Studierende auf eine spielerische Art, ohne die Notwendigkeit aufwendige Berechnungen durchzuführen, ein Verständnis und eine Intuition für das Verhalten dynamischer Systeme aufbauen. In interaktiven Simulationen kann das Schwingverhalten von Ein- und Zweifreiheitsgradsysteme über die Wahl der Systemparameter verändert und analysiert werden.

Die Praxisübung „Praktische Einführung in die Maschinendynamik“ ermöglicht Studierenden die eigenständige Durchführung und Analyse von Schwingungsmessungen. Es werden Experimente zu schwingungstechnischen Systemen und Effekten mit Bezug zur Lehre von GMSD angeboten. Die Experimente sind so konzipiert, dass sie sich von den Studierenden selbstständig mit Alltagsgegenständen zuhause aufbauen, durchführen und auswerten lassen. Dabei wird Smartphonesensorik (Kamera, Beschleunigungssensor und Gyroskop) zur Messdatenaufzeichnung genutzt. Hierzu kommen die von der RWTH entwickelten App phyphox [1] und die Kameraapp zusammen mit der freien Videoanalysesoftware Tracker [2] zum Einsatz. Ein schematischer Ablauf eines Experiments der Praxisübung ist in Bild 1 gezeigt.



DIY-Experimente mit Datenerfassung über Smartphonesensorik

Interaktive Datenaufbereitung und -auswertung mit Jupyter Notebooks

Bild 1 Schematischer Ablauf eines Experiments der Praxisübung „Praktische Einführung in die Maschinendynamik“

Beispielhaft wird in einem Experiment die gemessene erste Eigenfrequenz eines Kontinuumsschwingers mit einer analytischen Näherung verglichen. Als Kontinuumsschwinger wird ein Kunststofflineal eingesetzt. An einem Ende des Lineals wird ein Smartphone befestigt. Das andere Ende des Lineals wird so an einer Tischkante eingespannt, dass das Smartphone und ein Teil des Lineals über die Tischkante hinausstehen. Der über die Tischkante hinausstehende Teil des Lineals kann nach Initialauslenkung frei schwingen. Mithilfe des Smartphones lassen sich die translatorische Beschleunigung oder die rotatorische Geschwindigkeit des frei schwingenden Endes bestimmen. Exemplarisch ist das Experiment links in Bild 1 dargestellt.

Sowohl die Dynamikspielwiese als auch die Auswertung der Experimente der Praxisübung sind als Jupyter Notebooks umgesetzt. Jupyter Notebooks sind webbasierte Dokumente, welche Texte, Gleichungen, Bilder, Abbildungen und Quellcode umfassen können [3]. Die Jupyter Notebooks für die Lehre von GMSD werden den Studierenden über das Jupyter Hub RWTHjupyter der RWTH Aachen University zur Verfügung gestellt. Um das Lernangebot niederschwellig zu gestalten, ist der Quellcode in der Programmiersprache Python geschrieben.

Jupyter Notebooks eignen sich insbesondere für den Einsatz in der Lehre, da innerhalb eines Dokuments text- oder abbildungsbasierte Anleitungen und Erklärungen mit Quellcode alternieren können. Zudem kann über das Jupyter Hub eine endgerätunabhängige Ausführung des Quellcodes sichergestellt werden. Eine Installation einer Entwicklungsumgebung ist nicht erforderlich.

Acknowledgement: Die Praxisübung „Praktische Einführung in die Maschinendynamik“ konnte dank der Lehrförderung Exploratory Teaching Space der RWTH Aachen University und die „Dynamikspielwiese“ dank Qualitätsverbesserungsmitteln (Blended Learning) der RWTH Aachen University umgesetzt werden.

Literatur

- [1] Staacks, S.; Hütz, S.; Heinke, H.; Stampfer, C.: *Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox*. Physics Education. (2018) 53-4, DOI 10.1088/1361-6552/aac05e, S. 045009.
- [2] Brown, D.; Christian, W.; Hanson, R. M: *Tracker - Video Analysis and Modeling Tool*. <https://physlets.org/tracker/>, zuletzt geprüft: 28.11.2023.
- [3] Kluyver, T.; Ragan-Kelley, B.; Pérez, F.; Granger, B.; Bussonnier, M.; Frederic, J.; Kelley, K.; Hamrick, J.; Grout, J.; Corlay, S.; Ivanov, P.; Avila, D.; Abdalla, S.; Willing, C.: *Jupyter Notebooks - a publishing format for reproducible computational workflows*. Positioning and Power in Academic Publishing: Players, Agents and Agendas. (2016), DOI 10.3233/978-1-61499-649-1-87, S. 87-90.

Optimierte Energieeffizienz des zweibeinigen Gehens auf nachgiebigem Untergrund durch elastische Kopplung

Optimized Energy Efficiency of Bipedal Walking on Compliant Ground Using Elastic Coupling

Yinnan Luo^{*1}, Ulrich J. Römer¹, Marten Zirkel², Lena Zentner², Alexander Fidlin¹

¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Mechanik, 76131 Karlsruhe, Deutschland.

²Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Mechanik Nachgiebiger Systeme, 98684 Ilmenau, Deutschland.

*Korrespondierender Autor. Email: yinnan.luo@kit.edu.

Kurzfassung

Energieeffizienz ist von grundlegender Bedeutung für die Entwicklung zweibeiniger Roboter. Insbesondere, wenn ein Roboter eine Energieversorgung mit begrenzter Kapazität - wie beispielsweise in Form eines Akkus - während der Fortbewegung mitführt, ist die Energieeffizienz ausschlaggebend für die Betriebsdauer und die erreichbare Reichweite. Da zweibeinige Gehbewegungen sehr flexibel sind, können solche Roboter in verschiedenen Umgebungen eingesetzt werden. Dies motiviert unser Forschungsziel, einen zweibeinigen Roboter zu entwickeln, der mit hoher Energieeffizienz in variierenden Umgebungen laufen kann. In diesem Beitrag wird spezifisch die periodische Gehbewegung auf nachgiebigem Untergrund untersucht, deren Energieeffizienz durch das elastische Koppeln von Robotersegmenten mithilfe von nachgiebigen Mechanismen verbessert wird.

Das ebene Robotermodell besteht aus fünf Starrkörper-Segmenten für einen Oberkörper, zwei Oberschenkel, und zwei Unterschenkel (Bild 1, links). Das untere Ende des Beins ist als Punktfuß modelliert, weswegen kein Drehmoment im Kontakt zwischen Boden und Bein übertragen werden kann. Vier elektrische Antriebsstränge sind in den zwei Hüft- und zwei Kniegelenken integriert. Daher entsteht ein unter-aktuiertes Mehrkörpermodell, dessen Gehbewegung bei einer konstanten Durchschnittsgeschwindigkeit - definiert als $v = \ell_{\text{Schritt}}/t_{\text{Schritt}}$ mit Schrittlänge ℓ_{Schritt} und Schrittdauer t_{Schritt} - als periodisch angenommen wird.

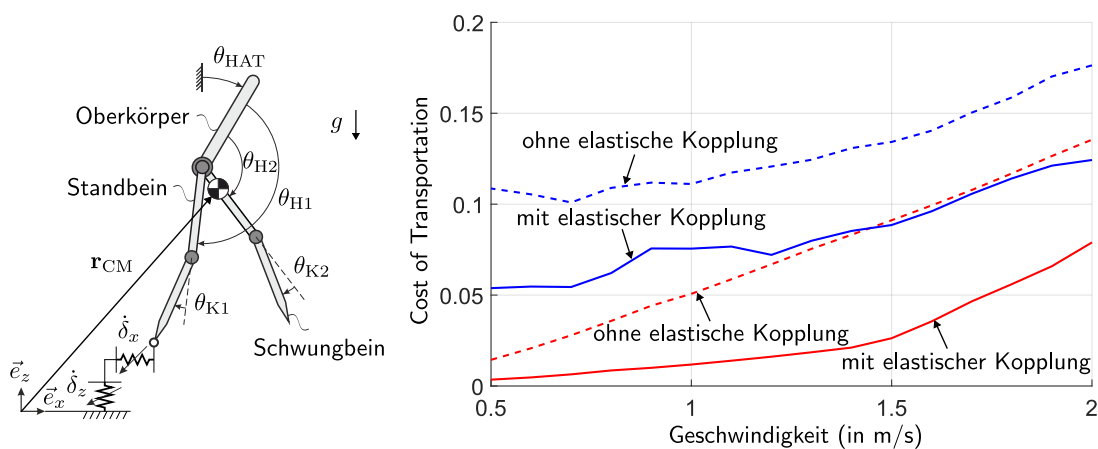


Bild 1 Links: Robotermodell mit fünf Starrkörper-Segmenten. Rechts: Optimierte CoT für Gehen auf (rot) hartem und (blau) nachgiebigem Untergrund.

Da die Energieeffizienz des Roboters einerseits vom verwendeten Regelungskonzept und andererseits von den Eigenschaften des mechanischen Systems abhängig ist, wird ein Optimierungsverfahren entwickelt, durch das die Parameter von Regler und System gleichzeitig optimiert werden [1]. Die Zielfunktion der Optimierung ist die dimensionlose Cost of Transportation ($CoT = E_{zu}/mg\ell_{\text{Schritt}}$), die ein Maß für die Energieeffizienz der Fortbewegung ist. Dabei ist E_{zu} die gesamte zugeführte (elektrische) Energie, m die Masse, und g die Erdbeschleunigung. Um eine stabile periodische Gehbewegung zu erzeugen, wird das Regelungskonzept Hybrid Zero Dynamics (HZD) Control ausgewählt. Ein Vorteil dieser Regelungsstrategie ist die hohe Energieeffizienz, weil der Roboter die passive Dynamik des mechanischen Systems - freie Schwingung des Starrkörper-Systems - für die Gehbewegung ausnutzt [2]. Außerdem wird der Oberkörper des Roboters über nachgiebige Mechanismen elastisch mit den Oberschenkeln verbunden. Durch Anpassen der Mechanismensteifigkeit wird die passive Dynamik des Robotersystems modifiziert. Die nichtlinearen Kennlinien der Mechanismen werden somit als mechanische Parameter numerisch optimiert [3]. Nach der Optimierung stimmt die Frequenz der freien Schwingungen des Roboters mit der Schrittfrequenz der Gehbewegung überein. Durch Ausnutzen der Resonanzbewegung kann sich der

Roboter mit sehr hoher Energieeffizienz fortbewegen, wie beispielsweise von Autoren bereits für das effiziente Gehen auf hartem Untergrund mit verschiedenen Neigungswinkeln untersucht wurde [4].

In diesem Beitrag sollen die periodische Gehbewegung und die Effizienzstudie für nachgiebige Untergründe erweitert werden. Im Gegensatz zum harten Untergrund, bei dem der Kontakt durch einen diskreten plastischen Stoß abgebildet wird [5], wird der Kontaktvorgang auf weichem Untergrund durch einen kontinuierlichen dynamischen Prozess der Bodenverformung approximiert [6]. Das Kontaktmodell und die Parameter des Bodens (Material: Torf) werden aus den Studien [7] und [8] übernommen. Das nachgiebige Kontaktmodell resultiert aus einer Kombination von nichtlinearer Steifigkeit und nichtlinearer Dämpfung. Dabei wird Energie während der Kompression des Bodens gespeichert und wieder bei der Restitution freigegeben. Das Modell hat drei nicht-aktuierte Freiheitsgrade, die durch die Schwerpunktslage \mathbf{r}_{CM} und die absolute Körperorientierung θ_{HAT} beschrieben werden. Die vier aktuierten Gelenkwinkel in Hüfte und Knie werden durch den Regler auf die jeweilige Referenztrajektorie (Bézier-Polynome) synchronisiert. Falls keine Regelabweichung vorhanden ist, lässt sich die Synchronisierung als virtuelle Zwangsbedingung verstehen, und die volle Systemdynamik wird durch die (Null-)Dynamik der nicht-aktuierten Freiheitsgrade repräsentiert. Mittels eines Multiple-Shooting-Verfahrens wird die periodische Lösung dieser Nulldynamik berechnet, aus der sich in Kombination mit den Referenztrajektorien alle Systemzustände rekonstruieren lassen. Damit werden die Energieeffizienz (CoT) und die physikalischen Nebenbedingungen beim Gehen ausgewertet.

Die optimierte CoT für das Gehen bei verschiedenen konstanten Geschwindigkeiten ($v \in [0.5, \dots, 2.0]$ m/s) ist in Bild 1 (rechts) dargestellt. Laut Simulation kann der Energieverbrauch durch den Einsatz von optimalen elastischen Kopplungen zwischen Oberkörper und Oberschenkeln um 63,3% auf hartem, und um 35,3% auf nachgiebigem Untergrund reduziert werden. Außerdem generiert die Optimierung die Wunschkennlinie der elastischen Kopplung, die durch nachgiebige Mechanismen zu realisieren sind [9]. Da die Parameter von Regler und der elastischen Kopplung gleichzeitig optimiert werden, findet dieser Algorithmus optimale Bewegungsmuster, deren Schrittfrequenzen ähnlich zur Frequenz freier Schwingungen der Beine sind. Mit anderen Worten, läuft der Roboter sowohl auf hartem als auch auf nachgiebigem Untergrund in Resonanz mit hoher Energieeffizienz. Die Effizienz auf weichem Untergrund ist generell schlechter als bei hartem Untergrund, weil die Gangart aus Sicht der Effizienz nicht optimal ist. Auf hartem Untergrund läuft der Roboter mit minimaler Beteiligung von Aktoren und kleinen Relativbewegungen der Segmente, um Energie zu sparen. Das ist jedoch auf weichem Untergrund nicht möglich, weil die Kontaktbedingungen viel anspruchsvoller durch den Regler sichergestellt werden müssen. Um die Bewegung zu stabilisieren müssen alle Aktoren stets stark beschleunigen und bremsen, was viel Energieverbrauch verursacht.

Zusammenfassend zeigt die Studie, dass das Gehen auf weichem Untergrund im Vergleich zu hartem Untergrund weniger effizient ist. Die Anwendung nachgiebiger Mechanismen im Roboterdesign ist vorteilhaft um die Effizienz zu verbessern: auf hartem Untergrund werden 63,3% Energie gespart, auf weichem Untergrund 35,3%. Aktuell wird ein Roboterprototyp entwickelt, um die Simulationsergebnisse im Experiment zu validieren.

Die Arbeit ist durch Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert, Grant FI 1761/4-1 | ZE 714/16-1.

Literatur

- [1] Römer, U.J., Kuhs, C., Krause, M.J., Fidlín, A.: *Simultaneous optimization of gait and design parameters for bipedal robots*. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). (2016), S. 1374–1381.
- [2] Westervelt, E.R., Grizzle, J.W., Koditschek, D.E.: *Hybrid zero dynamics of planar biped walkers*. IEEE Transactions on Automatic Control. (2003) **48**(1), S. 42–56.
- [3] Luo, Y., Römer, U.J., Zentner, L., Fidlín, A.: *Improving Energy Efficiency of a Bipedal Walker with Optimized Nonlinear Elastic Coupling*. Advances in Nonlinear Dynamics. (2022), S. 253–262.
- [4] Luo, Y., Zirkel, M., Römer, U.J., Zentner, L., Fidlín, A.: *Improving energy efficiency of bipedal walking using nonlinear compliant mechanisms*. Proc. Appl. Math. Mech. (2021) **21**(1), e202100197.
- [5] Pfeiffer, F.: *On non-smooth multibody dynamics*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. (2012) **226**(2), S. 147–177.
- [6] Flores, P.: *Contact mechanics for dynamical systems: a comprehensive review*. Multibody System Dynamics. (2022) **54**(2), S. 127–177.
- [7] Carvalho, A.S., Martins, J.M.: *Exact restitution and generalizations for the Hunt–Crossley contact model*. Mechanism and Machine Theory. (2019) **139**, S. 174–194.
- [8] Silva, M.F., Machado, J.A.T., Lopes, A.M.: *Modelling and simulation of artificial locomotion systems*. Robotica (2005) **23**(5), S. 595–606.
- [9] Zirkel, M., Luo, Y., Römer, U.J., Fidlín, A., Zentner, L.: *Parameter Study of Compliant Elements for a Bipedal Robot to Increase Its Walking Efficiency*. Microactuators, Microsensors and Micromechanisms. (2021), S. 58–75.

Generierung eines muskuloskelettalen Mehrkörpermodells des Tibiofemoralgelenks basierend auf experimentellen Untersuchungen am Humanpräparat mittels 6-Freiheitsgrad Gelenksimulator

Generation of a musculoskeletal multibody model of the tibiofemoral joint based on experimental studies on a human specimen using a sixdegree of freedom joint simulator

Paul Henke (1), Johanna Meier (1), Leo Ruehrmund (1), Saskia Brendle (2, 3), Sven Krueger (3), Thomas M. Grupp (2, 3), Christoph Woernle (4), Christoph Lutter (1), Rainer Bader (1), Maeruan Kebbach (1)

¹ Universitätsmedizin Rostock, Orthopädische Klinik und Poliklinik, Rostock, Deutschland

² Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie, Ludwig-Maximilians-Universität München, Deutschland

³ Aesculap AG, Research & Development, Tuttlingen, Deutschland

⁴ Universität Rostock, Lehrstuhl für Technische Mechanik/Dynamik, Rostock, Deutschland

Kurzfassung

Die Kinematik und Kinetik des humanen Kniegelenks wird durch Einflussgrößen wie z.B. die Weichteilsituation stark beeinflusst. Ein wichtiger Faktor bei der Implantation von Knieendoprothesen stellt somit das Weichteilmanagement dar [1]. Ein besseres Verständnis des Weichteilmanagements erfordert eine Spezifizierung der interindividuellen Unterschiede. Um die Kinematik und Kinetik des nativen und endoprothetisch versorgten Kniegelenks zu analysieren und die Auswirkungen verschiedener Implantatdesigns untersuchen zu können, eignet sich die muskuloskelettale Mehrkörpersimulation (MMKS) [2]. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein Präparat-spezifisches MMKS-Modell auf Basis experimenteller Untersuchungen an einem Humanpräparat mittels Gelenksimulator zu generieren.

Dazu wurde ein natives humanes Kniepräparat (fresh-frozen) während einer passiven Knieflexion im VIVO™-Gelenksimulator (AMTI, Watertown, USA) untersucht, welcher über eine hybride Kraft-Lage-Regelung aller sechs Freiheitsgrade (FHG) verfügt. Die Ausrichtung der Koordinatensysteme und Lastübergabe erfolgte entsprechend der Grood und Suntay – Konvention [3].

Die Knochen und Knorpelflächen wurden anhand eines CT-Datensatzes des Kniepräparats segmentiert und rekonstruiert. Die Bandansatzpunkte wurden mit Hilfe des CT-Datensatzes bestimmt oder anhand von knöchernen Landmarken detektiert. Innerhalb des MMKS-Modells wurden Femur und Tibia über ein Gelenk mit einer rheonomen und fünf skleronomen Bindungen modelliert. Der Knieflexionswinkel als rheonomer FHG konnte somit zu jedem Zeitpunkt vorgegeben werden, während sich die verbleibenden fünf skleronomen FHG entsprechend des dynamischen Gleichgewichtszustands einstellten. Zwischen den tibialen und femoralen Knorpelflächen wurde ein Kontaktmodell implementiert. Die Bänder wurden als nichtlineare Federkraftelemente modelliert, wobei die Bändeigenschaften (Referenzdehnungen und Steifigkeiten) zunächst der Literatur entnommen wurden [2]. Zusätzlich wurde sowohl im Experiment als auch in dem MMKS-Modell eine konstante tibiofemorale Kompressionskraft von 50 N aufgebracht.

Die tibiofemorale Kinematik des MMKS-Modells zeigte eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Daten. Der root mean square error (RMSE) zwischen Experiment und Simulation lag für die Translationsbewegungen unter 1,61 mm bzw. für die Rotationen unter 2,12°.

Im Rahmen dieser Studie konnte ein Präparat-spezifisches MMKS-Modell des Tibiofemoralgelenks aufgebaut werden, wobei eine gute Übereinstimmung zwischen experimentell ermittelter und simulierter Gelenkinematik erzielt wurde. In zukünftigen Arbeiten sollen experimentell durchgeführte Laxizitätsuntersuchungen unter verschiedenen Resektionsstufen des Bandapparats dazu dienen, diesen präziser an die Physiologie des Präparates anzupassen und dessen Einfluss auf die Kniegelenkskinematik und –kinetik zu quantifizieren. Dies soll dazu beitragen, die Erkenntnisse für ein individuell angepasstes Weichteilmanagement im Rahmen der Knieendoprothesen-Implantation vertiefen zu können.

Literatur

- [1] Matsuda, S., *Ligament balancing in total knee arthroplasty - Medial stabilizing technique*, ASIA-PACIFIC JOURNAL OF SPORTS MEDICINE, ARTHROSCOPY, REHABILITATION AND TECHNOLOGY. (2015), doi: 10.1016/j.asmart.2015.07.002
- [2] Kebbach, M. et al, *Musculoskeletal Multibody Simulation Analysis on the Impact of Patellar Component Design and Positioning on Joint Dynamics after Unconstrained Total Knee Arthroplasty*, MATERIALS. (2020), doi: 10.3390/ma13102365
- [3] Grood, E. S., Suntay, W. J., *A Joint Coordinate System for the Clinical Description of Three-Dimensional Motions: Application to the Knee*, JOURNAL OF BIOMECHANICAL ENGINEERING: (1983), doi: 10.1115/1.3138397





Abbildung 1: Experimentelles Setup am VIVO™ Gelenksimulator (links) und muskuloskelettales Mehrkörpermodell der unteren Extremität mit implementierten Bandstrukturen (rechts).

Theoretische Untersuchungen zu einer neuartigen Handorthese

Theoretical studies on a new type of dynamic hand orthosis

Leon Schaeffer, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, leon.schaeffer@oth-regensburg.de
David Herrmann, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, david.herrmann@st.oth-regensburg.de
Theresa Schmausser, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, thesa.schmausser@st.oth-regensburg.de
Melanie Liebrecht, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, melanie.liebrecht@st.oth-regensburg.de
Felix Rambach, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, felix.rambach@st.oth-regensburg.de
Valter Böhm, OTH Regensburg, Fakultät Maschinenbau, 93053 Regensburg, valter.boehm@oth-regensburg.de

Kurzfassung

Die menschliche Hand zeigt ein bemerkenswertes Maß an Beweglichkeit und Anpassungsfähigkeit, die ihrer komplexen und feinen anatomischen Struktur zugeschrieben wird. Sie besteht aus einer komplexen Anordnung von Knochen, Gelenken, Sehnen und Bändern in einem begrenzten Raum, was zu erheblichen Belastungen während täglicher Aktivitäten führt. Etwa ein Fünftel aller Notfälle beinhaltet Verletzungen an Hand, Fingern und Handgelenken. Die vorherrschenden Arten von Verletzungen umfassen Schnittverletzungen (38,1% - 45%), Frakturen (19,3% - 42%), Verletzungen des Weichgewebes (28,7% - 33,3%) und Verstauchungen (8% - 20%) [1–8].

Die Behandlung dieser verschiedenen Handverletzungen umfasst die Verwendung von nicht beweglichen (statischen) Handorthesen und beweglichen (dynamischen) Handorthesen. Eine frühzeitige Bewegungstherapie spielt eine zentrale Rolle bei der Erleichterung einer raschen und vollumfänglich Heilung. Ihre Wirksamkeit wird erhöht, wenn sie mit dem frühzeitigen Einsatz von Orthesen kombiniert wird, insbesondere von dynamischen Orthesen, die bewegungsorientierte Ansätze unterstützen und den Heilungsprozess beschleunigen. Ein optimaler Nutzen wird erreicht, wenn die Orthese so früh wie möglich getragen wird.

Derzeitige dynamischen Handorthesen können jedoch die natürliche Bewegung des Handgelenks aufgrund ihrer begrenzten Bewegungsmöglichkeit oft nur bedingt nachbilden, wie beispielsweise nur Beugung/Streckung [9–11] oder nur Pronation/Supination [12–14], was ihre Praktikabilität im täglichen Gebrauch einschränkt. Orthesen, die Bewegungsmöglichkeiten in mehreren Richtungen erlauben, sind entweder sperrig oder erfordern zusätzliche externe Antriebe und Ausrüstung, die der Patient tragen muss [15–17]. In [18] wird eine potenzielle leichte, anpassungsfähige Orthese mit drei Bewegungsmöglichkeiten unter Verwendung eines nachgiebigen Mechanismus gezeigt. Für die Anwendung sind weiterhin extern angebrachte Motoren erforderlich, was die Benutzerfreundlichkeit einschränkt. Dieses Problem wurde bei mehreren Orthesen identifiziert, die zwei oder mehr Bewegungsmöglichkeiten ermöglichen, wie in [19–21].

Daher lässt sich eine Notwendigkeit für die Entwicklung von Orthesen ableiten, die diese Herausforderungen bewältigen können: individuelle Patientenbedürfnisse, Benutzerfreundlichkeit, Passform, Steifigkeit und multiaxiale Gelenkbeweglichkeit. Diese Orthesen sollten sich durch ein flaches Design und die Fähigkeit auszeichnen, zwei oder mehr Bewegungsmöglichkeiten zu ermöglichen und dabei unabhängig von extern angelegten Antriebseinheiten funktionieren. Die Anwendung mechanisch vorgespannter nachgiebiger Strukturen im biomedizinischen Kontext bietet vielversprechende innovative Aussichten. In [22] wird ein Handgelenk für Roboter und Prothesen auf Basis dieser Strukturen vorgestellt, die die Möglichkeiten dieser Strukturen zeigt. Daraus ableitend soll in diesem Beitrag die Verwendung dieser Strukturen als Basis für dynamische Handorthesen untersucht werden.

Zu diesem Zweck wird in diesem Beitrag ein dreidimensionales nachgiebiges Tensegrity-Gelenk betrachtet, das in früheren Arbeiten [23–25] in einer zweidimensionalen Form vorgestellt wurde. Das Gelenk besteht aus zwei starren, auf Druck beanspruchten Segmenten, die durch fünf nachgiebige, auf Zug beanspruchte Segmente verbunden sind, die typischerweise durch Federn mit konstanter Steifigkeit [26–28] realisiert werden, während alternative Ansätze mit Elastomeren in [29] and [30] diskutiert werden. Durch eine sorgfältige Auswahl der Parameter, einschließlich der Steifigkeit der Segmente und der anfänglichen Länge der ungespannten Segmente, lässt sich der Bewegungsumfang an die spezifischen therapeutischen Anforderungen anpassen, wobei die anatomischen Eigenschaften der Hand und die Steifigkeit der Gesamtstruktur berücksichtigt werden. Die definierte richtungsabhängige Steifigkeit der Orthese erlaubt die Definition des möglichen Bewegungsbereiches des Handgelenkes. Darüber hinaus kann die Orthese so angepasst werden, dass Bewegungen in definierten Richtungen verhindert und so das Handgelenk richtungsabhängig ruhiggestellt werden.

Theoretische Untersuchungen, die ein Verständnis der komplexen Wirkzusammenhänge dieser vorgespannten, nachgiebigen dynamischen Handorthesen erlauben, bilden die Grundlage in der Entwicklung individueller dynamischer Handorthesen, die an die anatomischen Gegebenheiten und therapeutischen Bedürfnisse der einzelnen Patienten angepasst werden können.

In diesem Beitrag werden ausgewählte Untersuchungen zur Anwendbarkeit von nachgiebigen Tensegrity-Strukturen, im Zusammenhang mit dynamischen Handorthesen auf Basis der zuvor beschriebenen Struktur, vorgestellt. Der erste Schritt bei der Entwicklung dieser Systeme ist die Bestimmung der Gleichgewichtslage des Systems ohne äußere Lasten. Die

Herausforderung liegt hier in der Vorhersage des komplexen Strukturverhaltens, resultierend aus der Vorspannung der einzelnen Segmente. Dieser Prozess wird als Formfindung bezeichnet [31]. Die Gleichgewichtslage der dynamischen Orthese wird durch einen Formfindungsalgorithmus auf Basis der geometrisch nicht linearen statischen Finiten Element Methode (FEM) bestimmt. Der Formfindungsalgorithmus basiert auf dem von [32] vorgestellten Ansatz, der eine modifizierte Version der von [33] vorgestellten Methode ist und ist in Matlab® implementiert.

In der hier vorgestellten Untersuchung wird ein dreidimensionales mechanisches Modell der Orthese unter Einbeziehung der Handgelenksregion hinsichtlich der Formfindung als Erweiterung der bisherigen elementaren zweidimensionalen Betrachtungen in [23–25] herangezogen. Ziel der Untersuchung ist es, aufgrund der Vielzahl der möglichen Einflussparameter, ein detailliertes Verständnis für das Verhalten der Struktur im dreidimensionalen Raum zu bekommen, wenn diese Parameter verändert werden. Weiterhin werden die Steifigkeit und die resultierende Kraft im Handgelenk unter dem Einfluss verschiedener Orthesenparameter sowie anatomischen Gegebenheiten charakterisiert. Diese weitere Untersuchung, die sogenannte Eigenschaftsanalyse (Bewertung des gesamten statisch-mechanisches Verhalten) baut auf der Formfindung auf. Zusätzlich sollen auch externe, die Bewegung der Hand auslösende, Kräfte mit einbezogen werden.

In künftigen Arbeiten, die auf den grundlegenden Untersuchungen dieses Beitrags aufbauen, werden weitere theoretische Untersuchungen zum Verhalten der Struktur auch unter Berücksichtigung dynamischer Lasten durchgeführt. Die Handanatomie wird mit einem erweiterten detaillierteren Modell berücksichtigt. Die theoretischen Ergebnisse werden mit Experimenten an einem ersten Demonstrator verifiziert. Diese Untersuchungen bilden die Basis für die Vision, dynamische Handorthesen anhand realer anatomischer Gegebenheiten von individuellen Patienten bereitzustellen. Hierzu wird langfristig eine Methodik für die individuelle Anpassung und Herstellung der Orthesen entwickelt.

Literatur

- [1] Nieminen, S., Nurmi, M. & Isberg, U. Hand injuries in Finland. *Scandinavian Journal Of Plastic And Reconstructive Surgery*. 15, 57-60 (1981)
- [2] Smith, M., Auchincloss, J. & Ali, M. Causes and consequences of hand injury. *Journal Of Hand Surgery*. 10, 288-292 (1985)
- [3] Angermann, P. & Lohmann, M. Injuries to the Hand and Wrist. A Study of 50,272 Injuries. *Journal Of Hand Surgery*. 18, 642-644 (1993)
- [4] Bhende, M., Dandrea, L. & Davis, H. Hand injuries in children presenting to a pediatric emergency department. *Annals Of Emergency Medicine*. 22, 1519-1523 (1993)
- [5] Vadivelu, R., Dias, J., Burke, F. & Stanton, J. Hand injuries in children: a prospective study. *Journal Of Pediatric Orthopaedics*. 26, 29-35 (2006)
- [6] Trybus, M., Lorkowski, J., Brongel, L. & Hladki, W. Causes and consequences of hand injuries. *The American Journal Of Surgery*. 192, 52-57 (2006)
- [7] Dias, J. & Garcia-Elias, M. Hand injury costs. *Injury*. 37, 1071-1077 (2006)
- [8] Robinson, L., Sarkies, M., Brown, T. & O'Brien, L. Direct, indirect and intangible costs of acute hand and wrist injuries: A systematic review. *Injury*. 47, 2614-2626 (2016)
- [9] Lambelet, C., Lyu, M., Woolley, D., Gassert, R. & Wenderoth, N. The eWrist ? A wearable wrist exoskeleton with sEMG-based force control for stroke rehabilitation. *2017 International Conference On Rehabilitation Robotics (ICORR)*. pp. 726-733 (2017)
- [10] Sutton, L., Moein, H., Rafiee, A., Madden, J. & Menon, C. Design of an assistive wrist orthosis using conductive nylon actuators. *2016 6th IEEE International Conference On Biomedical Robotics And Biomechanics (BioRob)*. pp. 1074-1079 (2016)
- [11] Sangha, S., Elnady, A. & Menon, C. A compact robotic orthosis for wrist assistance. *2016 6th IEEE International Conference On Biomedical Robotics And Biomechanics (BioRob)*. pp. 1080-1085 (2016)
- [12] Kiguchi, K., Esaki, R. & Fukuda, T. Development of a wearable exoskeleton for daily forearm motion assist. *Advanced Robotics*. 19 pp. 751-771 (2005,1)
- [13] Realmuto, J. & Sanger, T. A robotic forearm orthosis using soft fabric-based helical actuators. *2019 2nd IEEE International Conference On Soft Robotics (RoboSoft)*. pp. 591-596 (2019)
- [14] Park, S., Yi, J., Kim, D., Lee, Y., Koo, H. & Park, Y. A Lightweight, Soft Wearable Sleeve for Rehabilitation of Forearm Pronation and Supination. *2019 2nd IEEE International Conference On Soft Robotics (RoboSoft)*. pp. 636-641 (2019)
- [15] Meng, W., Sheng, B., Klinger, M., Liu, Q., Zhou, Z. & Xie, S. Design and control of a robotic wrist orthosis for joint rehabilitation. *2015 IEEE International Conference On Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. pp. 1235-1240 (2015)
- [16] Bartlett, N., Lyau, V., Raiford, W., Holland, D., Gafford, J., Ellis, T. & Walsh, C. A Soft Robotic Orthosis for Wrist

- Rehabilitation. *ASME Design Of Medical Devices Conference*. (2015,4,2015)
- [17] Hope, J. & Mcdaid, A. Development of Wearable Wrist and Forearm Exoskeleton with Shape Memory Alloy Actuators. *Journal Of Intelligent & Robotic Systems*. 86 (2017,6)
 - [18] Tsabedze, T., Hartman, E., Brennan, C. & Zhang, J. A Compliant Robotic Wrist Orthosis Driven by Twisted String Actuators. *2021 International Symposium On Medical Robotics (ISMR)*. pp. 1-7 (2021)
 - [19] Tsabedze, T., Hartman, E., Abrego, E., Brennan, C. & Zhang, J. TSA-BRAG: A Twisted String Actuator-powered Biomimetic Robotic Assistive Glove. *2020 International Symposium On Medical Robotics (ISMR)*. pp. 159-165 (2020)
 - [20] Higuma, T., Kiguchi, K. & Arata, J. Low-Profile Two-Degree-of-Freedom Wrist Exoskeleton Device Using Multiple Spring Blades. *IEEE Robotics And Automation Letters*. 3, 305-311 (2018)
 - [21] Dittli, J., Vasileiou, C., Asanovski, H., Lieber, J., Lin, J., Meyer-Heim, A., Van Hedel, H., Gassert, R. & Lamberg, O. Design of a compliant, stabilizing wrist mechanism for a pediatric hand exoskeleton. *2022 International Conference On Rehabilitation Robotics (ICORR)*. pp. 1-6 (2022)
 - [22] Lee, G., Hong, G. & Choi, Y. Tendon-Driven Compliant Prosthetic Wrist Consisting of Three Rows Based on the Concept of Tensegrity Structure. *IEEE Robotics And Automation Letters*. 6, 3956-3963 (2021)
 - [23] Schaeffer, L., Herrmann, D. & Böhm, V. Preliminary Theoretical Considerations of a Hand Orthosis Based on a Prestressed, Compliant Structure. *2023 International Symposium On Medical Robotics (ISMR)*. pp. 1-7
 - [24] Schaeffer, L., Herrmann, D. & Böhm, V. Concept of a wrist Hand Orthosis based on a prestressed compliant structure. *2023 7th International Conference On Biomedical Engineering And Applications (ICBEA)*. pp. 98-103 (2023)
 - [25] Schaeffer, L., Herrmann, D., Böhm, V. & Ilmenau Scientific Colloquium. Theoretical considerations on a 2D compliant tensegrity joint in context of a biomedical application. *Engineering For A Changing World: Proceedings; 60th ISC, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau*. (2023,11)
 - [26] Böhm, V. Mechanics of Tensegrity Structures and their Application in mobile Robotics. Habilitation Thesis, Ilmenau University of Technology (2016)
 - [27] Kaufhold, T., Schale, F., Böhm, V. & Zimmermann, K. Indoor locomotion experiments of a spherical mobile robot based on a tensegrity structure with curved compressed members. *2017 IEEE International Conference On Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. pp. 523-528 (2017)
 - [28] Sumi, S., Böhm, V. & Zimmermann, K. A multistable tensegrity structure with a gripper application. *Mechanism And Machine Theory*. 114 pp. 204-217 (2017)
 - [29] Schorr, P., Schale, F., Otterbach, J. M., Zentner, L., Zimmermann, K. & Böhm, V. Investigation of a Multistable Tensegrity Robot applied as Tilting Locomotion System. *2020 IEEE International Conference On Robotics And Automation (ICRA)*. pp. 2932-2938 (2020)
 - [30] Zappetti, D., Jeong, S., Shintake, J. & Floreano, D. Phase Changing Materials-Based Variable-Stiffness Tensegrity Structures. *Soft Robotics*. 7, 362-369 (2020)
 - [31] Juan, S. & Mirats Tur, J. Tensegrity frameworks: Static analysis review. *Mechanism And Machine Theory*. 43, 859-881 (2008)
 - [32] Böhm, V., Sumi, S., Kaufhold, T. & Zimmermann, K. Compliant multistable tensegrity structures. *Mechanism And Machine Theory*. 115 pp. 130-148 (2017)
 - [33] Zhang, L., Li, Y., Cao, Y. & Feng, X. Stiffness matrix based Form-finding method of tensegrity structures. *Engineering Structures*. 8 pp. 36-48 (2014)

Entwicklung einer Handprothese hinsichtlich verbesserter Nachbildung der natürlichen Bewegung

Development of a Hand Prosthesis for Improved Imitation of Natural Movement

M. Eng. Sebastian Kurz, sebastiankurz95@googlemail.com, Prof. Dr.-Ing. Harold Schreiber, Hochschule Koblenz, Fachbereich Ingenieurwesen, 56075 Koblenz, schreiber@hs-koblenz.de

Kurzfassung

Mit „Prothesen“ bezeichnet die Medizin künstlich erstellte Ersatzprodukte für Gliedmaßen. Erste Prothesen (Fußzehen) sind ca. 3500 Jahre alt. Wurden im Mittelalter noch starre Stelzen als Beinprothese genutzt, wurden bereits im 16. Jahrhundert Beinprothesen mit gefedertem Fuß und beweglichem Kniegelenk verwendet. Insbesondere die großen Kriege der Neuzeit – und die damit verbundenen Amputationen – leisteten dem Prothesenbau enormen Vorschub. Prothesen wurden komfortabler und wurden optisch immer schwerer von menschlichen Gliedmaßen unterscheidbar. Mit modernen Beinprothesen reichen die sportlichen Leistungen von Prothesenträgern bereits an die der nicht-amputierten Kollegen heran.

Die Bewegungsabläufe in der Hand sind dagegen so komplex, dass es bis heute keine befriedigend wirkende Handprothese gibt. Interessanterweise hatte bereits die 1504 entwickelte Handprothese von Götz von Berlichingen eine enorm komplexe Greifmechanik, die es ihm ermöglichte, weiterhin in Schlachten sein Schwert zu führen.

Ein Problem bei Handprothesen ist der sehr kleine Bauraum. Jeder Finger hat drei zunächst unabhängig voneinander bewegliche Glieder (auch der Daumen!), so dass 15 Aktoren untergebracht werden müssten – bis heute nicht realistisch realisierbar. Eine gute Näherung dieser komplexen Bewegungsabläufe, die die erforderliche Anzahl an Aktoren auf fünf reduziert, ergibt sich durch die folgenden, in modernen Prothesen angewendeten Vereinfachungen [2]:

- Versteifen des distal liegenden Gelenks DIP = starre Kopplung der beiden äußeren Fingerglieder
- Zwangsläufige Kopplung des jeweils inneren (proximalen) und mittleren (medialen) Gliedes im Gelenk PIP

(der Daumen wird gesondert behandelt). Hierdurch ist es möglich, jeweils mit nur einem einzelnen Motor einen Finger vollständig zu schließen. Die zwangsläufige Kopplung im geringen Bauraum lässt sich geeignet durch zwei Lenker eines 4-gliedrigen Koppelgetriebes realisieren (**Bild 2**):

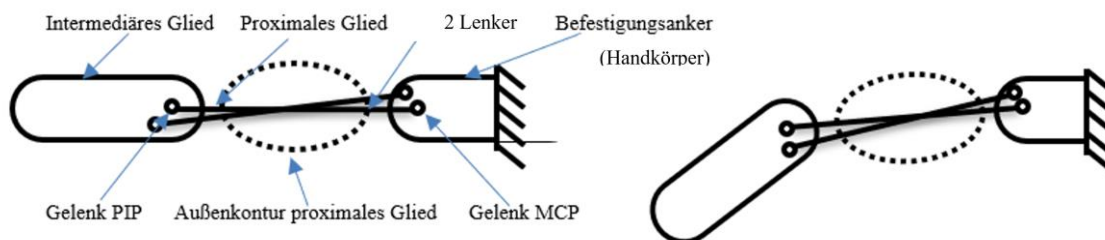


Bild 2: Kopplung des proximalen und medialen Gliedes durch 2 Lenker

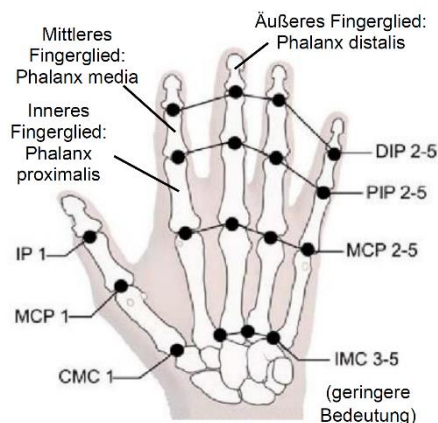


Bild 1: Bezeichnung der Gelenke [1]

Dieser Mechanismus ermöglicht bereits ein natürlich anmutendes Schließen der Hand, erlaubt jedoch durch die Zwangsläufigkeit aller Fingerglieder nur ein einziges Bewegungsmuster und nicht immer einen sicheren Griff.

Bei der menschlichen Hand beugen sich alle Fingerglieder unabhängig voneinander so weit, bis entweder ein angestrebter Gelenkwinkel erreicht oder das Objekt vollständig umfasst wird, also alle Glieder in Kontakt mit dem zu greifenden Objekt stehen. Bei der zwangsläufigen Prothese dagegen kann der Aktor nur so lange aktiv wirken, bis eines der Fingerglieder als erstes auf das Objekt trifft. Trifft beispielsweise zuerst das proximale Glied auf, bleibt der gesamte Finger stehen und das Objekt wird nur unsicher gegriffen. Griffmuster wie der Pinzett- oder Spanngriff (**Bild 3**), bei denen die Glieder unabhängig voneinander bewegt bzw. zumindest eine andere zwangsläufige Bewegungsfunktion erfüllen müssten, sind von vornherein ausgeschlossen.

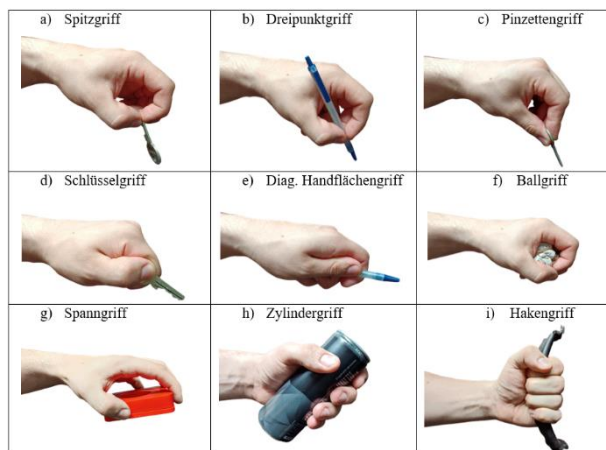


Bild 3: Griffmuster

Diese Limitierungen spielten in der Vergangenheit noch eine untergeordnete Rolle, da der Anwender ohnehin nicht die Möglichkeit hatte, die Prothese ausreichend differenziert für komplexe Griffmuster zu bewegen. Durch immer kleiner werdende Aktoren und insbesondere durch die kontinuierliche Innovation auf den Gebieten „Machine Learning“ und „Brain-Machine-Interfaces“ (BCIs, die Bewegung der Aktoren wird nicht programmiert, sondern direkt durch Gehirnströme gesteuert [4]) wird es zunehmend erforderlich, Prothesen zu entwickeln, die mechanisch und aktorisch in der Lage sind, diese komplexen Bewegungsmuster überhaupt erst realisieren zu können.

Um dieses gesteigerte Potential hinsichtlich der Kommunikation Mensch-Prothese voll auszuschöpfen, ist es mittlerweile möglich, eine individuelle Steuerung der einzelnen Gelenke jedes Fingers zu realisieren. Hierzu wird der in **Bild 2** dargestellte und in der Praxis etablierte mechanische Ansatz vollständig verworfen. Die Gelenke MCP und PIP werden nicht länger durch die zwei Lenker gekoppelt. Anstelle dessen kann der im proximalen Glied vorliegende Bauraum für die Integration weiterer Aktoren verwendet werden. Wurde bisher 1 Linearaktor pro Finger zentral im Handkörper angeordnet, ist im hier vorgestellten Ansatz in jedem proximalen Fingerlied ein weiterer Aktor zum direkten, unabhängigen Antrieb des Gelenks PIP angeordnet.

Aufgrund des geringen Bauraums, insbesondere des kleinen Fingers, birgt bereits dieser 1 zusätzliche Antrieb große Herausforderungen an die mechanische Konstruktion und die Auswahl eines geeigneten Aktors. So müssen in dem kleinen Finger (ein Zylinder mit den Abmessungen 18 mm x 18 mm x 40 mm) die Lagerung der Gelenke MCP und PIP, ein Elektromotor, ein Getriebe und ein Positions- und Kraftsensor integriert werden, ohne von der Geometrie einer menschlichen Hand deutlich abzuweichen. Hierzu werden die proximalen Fingerglieder in zwei Halbschalen aufgeteilt, welche zum einen auf der Innenseite als Gehäuse für die Elektronik und zum anderen auf der Außenseite als strukturelle Komponente der Prothese zum Einsatz kommen. Die resultierenden geometrisch komplexen Bauteile werden anschließend additiv gefertigt. Die Erstellung eines Prototyps erfolgt durch die 3-D-Druckverfahren MJF (Multi Jet Fusion) und LPBF (Laser Powder Bed Fusion). Diese Fertigungsverfahren wurden aufgrund der komplexen Geometrie der Bauteile, sowie den hohen mechanischen Belastungen anderen additiven Fertigungsverfahren vorgezogen.

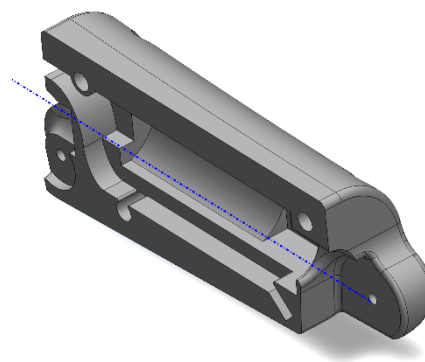


Bild 4: Gehäuseschale des proximalen Elements, Rotationsachse des Motors in blau

In das in **Bild 4** abgebildete proximale Element kann ein „Mikro-Getriebe-Gleichstrommotor“ integriert werden. Um die Rotation der Abtriebswelle auf das nachliegende Fingerglied zu übertragen, wird es mit diesem durch ein Schneckengetriebe verbunden. Das Schneckengetriebe erhöht einerseits das maximal wirkende Drehmoment und dient zeitgleich als Selbsthemmung. Die Finger verbleiben nach Erreichen des gewünschten Drehmomentes in ihrer Position und können nicht durch von außen auf sie wirkende Kräfte geöffnet werden. Somit müssen die Motoren nicht länger bestromt werden. Dies reduziert erheblich den Energieverbrauch und die Gefahr des Überhitzens.

Literatur

- [1] Kenhub GmbH. (2023, 28. August). *Anatomie der Hand*. <https://www.kenhub.com/de/library/anatomie/anatomie-der-Hand>.
- [2] Kurz, S.: *Entwicklung einer myoelektrischen Handprothese*. Bachelorthesis. Koblenz: Hochschule Koblenz, 2020.
- [3] Ottobock GmbH. (2023, 27. August). bebionic Hand EQD <https://www.ottobock.com/en-ex/product/8E70>.
- [4] Tsujimura, T., Yamamoto, S., Izumi, K. (2012). *Hand Sign Classification Employing Myoelectric Signals of Forearm*. In: Intech Open. Computational Intelligence in Electromyography Analysis. A Perspective on Current Applications and Future Challenges. DOI: 10.5772/51080. 2012

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/81581
URN: urn:nbn:de:hbz:465-20240618-154948-3

© 2024 die Autorinnen und Autoren.
Es gelten die in den einzelnen Tagungsbeiträgen genannten Rechte/Lizenzen.