

Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

www.VDI-Mechatroniktagung.de

Optimierungsbasierte Entwicklung einer Hochleistungskinematik unter Berücksichtigung von Dynamik und Steifigkeit

Optimisation-based Development of High Performance Manipulators under Consideration of Dynamics and Stiffness

Jascha N. Paris¹⁾, Sven Rink¹⁾, Stefan Kurtenbach²⁾, Mathias Hüsing¹⁾, Burkhard Corves¹⁾

¹⁾ RWTH Aachen University, Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, 52074 Aachen, Deutschland, paris@igmr.rwth-aachen.de

²⁾ Trapo AG, 48712 Hochmoor, Deutschland, skurtenbach@trapo.de

Kurzfassung

Lagenpalettierer verpacken Produkte effizient auf einheitlichen und einfach zu handhabenden Paletten. Eine durch solch einen Palettierer zu erfüllende Aufgabe ist die flächensparende Anordnung der zugeführten Produkte in einzelne Lagen. Im Rahmen einer Kooperation zwischen der Trapo AG, einem Anbieter von Fördersystemen, Automatisierungstechnik in der Logistik, Greifersystemen und Palettiersystemen und dem Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik der RWTH Aachen soll eine Hochleistungskinematik zur Bildung dieser Lagen ausgelegt werden. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein neuartiges optimierungsbasiertes Vorgehen unter Berücksichtigung der Dynamik und Steifigkeit vorgestellt. Für die gewählte parallele fünfgliedrige Struktur wird ein Satz von Parametern definiert, der die kinematischen und dynamischen Eigenschaften sowie die Steifigkeitseigenschaften beschreibt. Ein daraus erstelltes Modell des Roboters wird anhand von Beispielaufgaben hinsichtlich der benötigten Antriebsmomente und der Verformung des Roboters optimiert. Zur Erstellung des benötigten Steifigkeitsmodells wird die Matrix-Struktur-Analyse angewandt.

Abstract

Palletisers pack products highly efficiently on uniform and easy-to-handle pallets. One of the tasks to be performed by such palletisers is the space-saving arrangement of the fed products in individual layers, which are then stacked on the pallet. As part of a cooperation between Trapo AG, a supplier of conveyor systems, automation technology in logistics, gripper systems and palletising systems, and the Institute for Mechanism Theory, Machine Dynamics and Robotics of RWTH Aachen University, a high-performance kinematic system for building these layers is to be designed. In the context of this contribution, a novel optimization-based approach will be presented, taking into account dynamics and stiffness. For the selected parallel fivebar structure, a set of parameters is defined which describes the kinematic and dynamic properties as well as the stiffness properties. A model of the robot created from this will be optimised with regard to the required drive torques and the deformation of the robot on the basis of example tasks. The Matrix-Structure-Analysis is used to create an efficient stiffness model.

1 Einleitung

Um Waren und Produkte effizient vom Produzenten zum Kunden zu bringen, werden häufig Paletten und insbesondere Euro-Paletten verwendet. Diese erlauben eine gute Raumausnutzung im Transportwesen, da viele Systeme für diese Paletten ausgelegt sind. Weiterhin lassen sich Paletten, anders als viele der verpackten Transportgüter, gut handhaben. Um die Produkte am Ende einer Fertigungsstraße auf Paletten zu verpacken, werden sogenannte Palettierer eingesetzt [1]. Vollautomatische Lösungen ordnen die Produkte raumsparend auf der Palette an, was einzeln, säulen- oder lagenweise geschehen kann. Für Produkte mit gleicher Höhe oder gänzlich homogenen Maßen eignet sich insbesondere der lagenweise Aufbau [2]. Dabei werden aus den Produkten Lagen mit einem möglichst hohen Flächennutzungsgrad gebildet und anschließend auf die Palette bzw. auf die bereits vorhandenen Lagen abgelegt. Die Lage kann entweder über der Palette gebildet werden und danach gemeinsam mit der Palette und den bereits abge-

legten Lagen abgesetzt [3] oder als Ganzes beispielsweise mit einem Knickarmroboter auf einer Palette abgelegt [4] werden.

Die eigentliche Lagenbildung erfolgt durch die Kombination verschiedener Elemente. Dies können beispielsweise kontinuierliche und diskontinuierliche Förderbänder, Anschläge, Verteilrechen, Drehkörbe, einachsige Wende- und Schiebevorrichtungen, aber auch Kinematiken mit mehreren Freiheitsgraden wie Portal- und Deltaroboter [5] sein. Die Lösungen unterscheiden sich vor allem in den von ihnen realisierbaren Lagenbildern, ihrer Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Produktgrößen und ihren Palettierkapazitäten.

Die Trapo AG ist ein Anbieter von Fördersystemen, Automatisierungstechnik in der Logistik, Greifersystemen und Palettiersystemen. Im Rahmen einer Kooperation zwischen der Trapo AG und dem Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik der RWTH Aachen wurde eine Hochleistungskinematik zur Lagenbildung ausgelegt. Diese Kinematik fängt die Produkte auf einem kontinuier-

lich zuführenden Förderband ein und legt sie mit der richtigen Position und Orientierung auf einem diskontinuierlichen Förderband ab. Um die in der Grundfläche rechteckigen Produkte ins Lagenbild einzusortieren und zusätzlich eine bestimmte Seite des Produkts von außen sichtbar machen zu können, werden Orientierungen zwischen -90 Grad und 180 Grad benötigt. Da die betrachteten Produkte nicht von oben greifbar sind, wird ein Vakuum-Winkelgreifer eingesetzt. Dieser Greifer hebt das Produkt nicht an, daher müssen bereits abgelegte Produkte umfahren werden. Zusammen mit entsprechend angepassten Trajektorien sollen so, mit Paketen mit einer Masse von bis zu fünf Kilogramm, Zykluszeiten von durchschnittlich einer Sekunde realisiert werden.

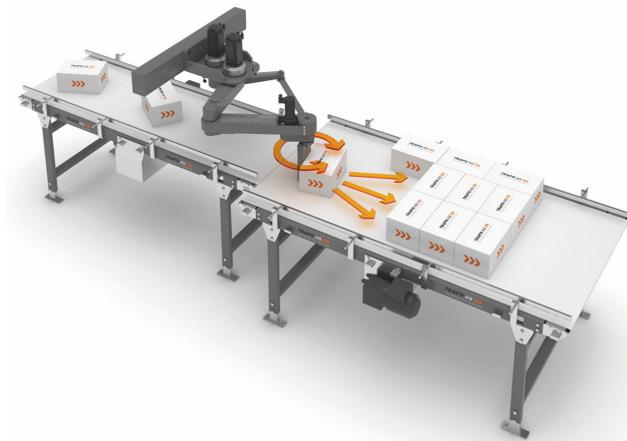


Abbildung 1 Trapo AG Hochleistungs-Lagen-Palettierer HLP Serie

Der im Rahmen des Projekts verfolgte Lösungsansatz sieht zur Lagenbildung eine horizontal oberhalb der Förderbänder aufgehängte fünfgliedrige Parallelkinematik (**Bild 1**) vor. Diese hat zwei translatorische Freiheitsgrade in einer Ebene und kann durch das Hinzufügen einer translatorischen Aktuation senkrecht zu dieser Ebene und einer rotatorischen sogenannte Schönflies-Bewegungen des Endeffektors ausführen [6]. Aufgrund der Ähnlichkeit zum weit verbreiteten seriellen SCARA-Roboter wird die Kinematik auch als Parallel-SCARA oder Doppelarm-SCARA bezeichnet. Bisher betrachtete Anwendungen dieser Struktur sind schnelle Pick-and-Place-Aufgaben [7], 3D-Druck im Heimbereich, Mikrohandhabung [8] und die Verwendung zu Ausbildungszwecken [9], bisher jedoch nicht die Lagenbildung. Ebenfalls für Pick-and-Place-Anwendungen werden fünfgliedrige Kinematiken unter der Bezeichnung „Delta 2“ genutzt. Diese werden vertikal aufgehängt und die Orientierung ihres Endeffektors wird passiv durch Parallelogramme parallel zum Förderband gehalten. Zur Lagenbildung bietet die gewählte Struktur einige Vorteile gegenüber existierenden Lösungen: die Vielfalt der erstellbaren Lagenbilder im Vergleich zu Systemen mit fest eingebauten Drehvorrichtungen, die die Lagen Reihe für Reihe aufbauen, hat sie mit anderen robotischen Lösungen gemein. Im Gegensatz zu Portal-Robotern können die zwei Hauptantriebe fest im Gestell eingebaut werden, was eine

signifikante Reduzierung der bewegten Massen zur Folge hat. Außerdem sorgt der parallele Aufbau für eine höhere spezifische Steifigkeit. Dies ist zwar alles auch bei Delta-Robotern der Fall, jedoch kann für die zweiachsige Positionierbewegung im Vergleich ein Motor eingespart werden. In Kombination mit den vergleichsweise geringen Genauigkeitsanforderungen durch die Aufgabe, kann mit dieser fünfgliedrigen Parallelkinematik ein günstiger und trotzdem schneller Lagenbildungsroboter entworfen werden. Gründe, die bisher gegen den Einsatz einer solchen Struktur gesprochen haben, können die nicht vorhandene Marktverfügbarkeit von Fertiglösungen und die im Vergleich zu einachsigen Lösungen und Portal-Robotern komplizierte Berechnung der Struktur sein.

2 Vorgehen

Der Entwicklungsprozess für Mechanismen und Roboter ist iterativ und gliedert sich nach gängigen Konstruktionsprozessen und Niemeyer et al. [10] grob in die folgenden Schritte: Erstellen der Bewegungsaufgabe, Struktursynthese, Maßsynthese und die Ausgestaltung der Bauteile. Da die Maßsynthese von den Lasten abhängt und die Trägheitskräfte wiederum von der Kinematik, muss zwischen der Ausgestaltung und der Synthese häufig iteriert werden. Das Institut für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik der RWTH Aachen University besitzt viel Erfahrung bei der kundenspezifischen Synthese und Auslegung von Bewegungseinrichtungen. Industriepartner, wie die Trapo AG, hingegen kennen alle Prozessdetails und besitzen viel Expertise bei der Konstruktion unter Berücksichtigung der eigenen Fertigung, Montage und umliegenden Anlagenteilen. In gemeinsamen Projekten können neue Produkte dadurch effizient entwickelt werden. Allerdings ergeben sich durch diese Schnittstelle weitere Iterationen. Erst nach der Auslegung erfolgt eine Bewertung der Lösungen durch den Auftraggeber. Dabei werden Probleme der aktuellen Lösung sichtbar und Änderungswünsche müssen berücksichtigt werden. Den Gesamtprozess zeigt **Bild 2**.

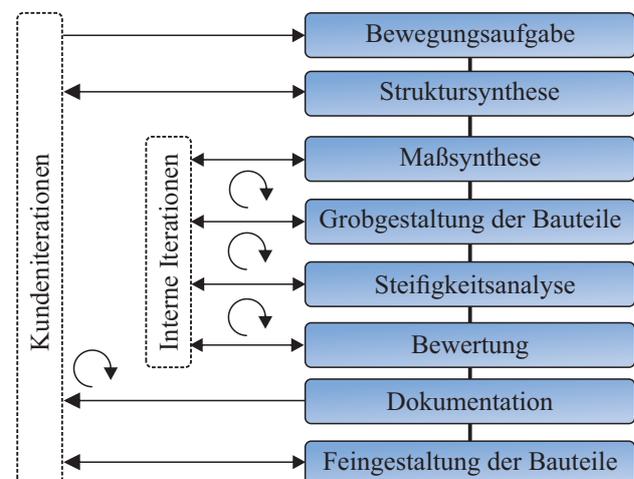


Abbildung 2 Klassisches Vorgehen bei der kundenspezifischen Auslegung von Bewegungseinrichtungen

In diesem Beitrag wird ein neues Vorgehen vorgestellt, wodurch manuelle Iterationen vermieden werden. Die Anwendung von Expertenwissen verschiebt sich dabei von der Durchführung der Synthese hin zum Modellieren und Aufstellen der Optimierungsfunktion bzw. Zielfunktion.

Es wird eine Optimierungsroutine erstellt, die basierend auf einem parametrischen Dynamikmodell sowie einem Steifigkeitsmodell eine Lösung generiert und diese automatisiert in einem Bericht dokumentiert. Dieses Dokument enthält die Leistungsdaten, die geometrischen Parameter, die Antriebsdaten und die benötigten Flächenträgheitsmomente von verschiedenen möglichen Lösungen. Auf dieser Basis kann der Kunde Änderungswünsche äußern, die dann durch erfahrene Kinematiker in eine angepasste Zielfunktion übersetzt werden können. Dadurch lassen sich Änderungen in kurzer Zeit umsetzen. Die Feingestaltung der Bauteile wird durch die vorhandenen Zielgrößen für die Eigenschaften der Glieder und Gelenke geleitet. Das angepasste Vorgehen zeigt **Bild 3**.

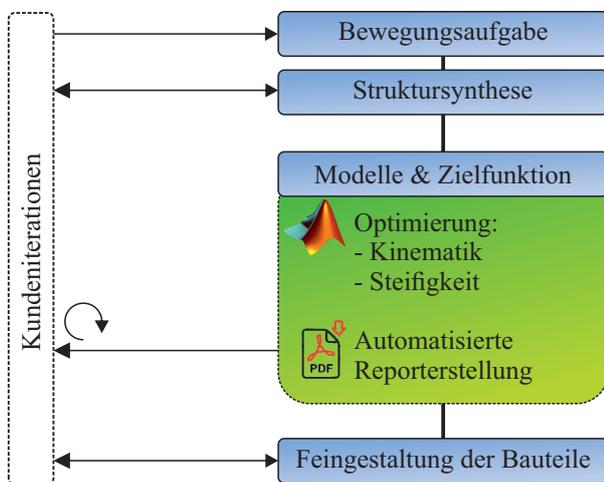


Abbildung 3 Optimierungsbasiertes Vorgehen bei der Roboterentwicklung zur Reduzierung der benötigten Iterationen

Die Verwendung einer optimierungsbasierten Auslegung führt nicht dazu, dass kein Expertenwissen mehr benötigt wird. Vielmehr ist es nötig die Modelle und die Optimierung sehr präzise aufzustellen, um zu den gewünschten Ergebnissen zu gelangen. Es ist allerdings möglich die Zahl der Iterationen zu verringern und die Reaktionszeit bei der Berücksichtigung von Änderungen deutlich zu verkürzen.

3 Mehrkörpersimulation

Die Mehrkörpersimulation wird genutzt, um für eine vorgegebene Bewegung die wirkenden Schnitt- und Antriebskräfte zu ermitteln. Für die Bestimmung der maximalen Verformung werden die Schnittkräfte benötigt. Die Bewertung von Lösungen wird später auch anhand der benötigten Antriebsmomente und -leistung erfolgen, sodass diese ebenfalls berechnet werden müssen. Die zugrundeliegende Bewegungsaufgabe besteht dabei aus den Greifer- und Paketbahnen. Zusätzlich sind die Paketmasse und -trägheit anzugeben.

Zu den Parametern des Modells gehören die Getriebebelängen, Anbringung der Motoren und die Profilquerschnitte. Zusätzliche Annahmen müssen für die Reibung, die Masse von Zusatzkomponenten (Lager, Kabel, etc.) und die Schichtung getroffen werden.

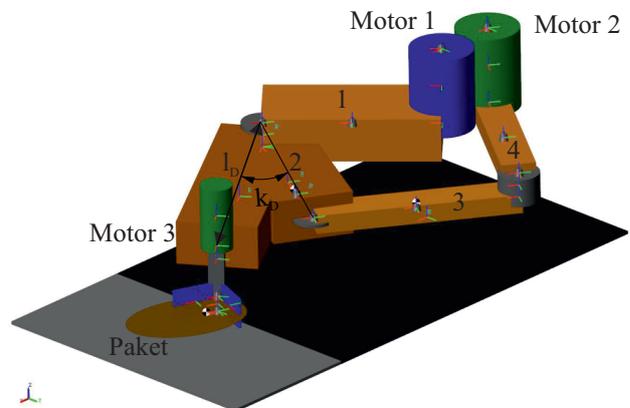


Abbildung 4 Parametrisches Mehrkörpersimulationsmodell

Die Simulation wird in Simulink von Mathworks durchgeführt. Dadurch ist zum einen eine schnelle Modellierung durch Bausteine für Antriebe, Glieder und Gelenke realisierbar. Zum anderen wird das System direkt visualisiert und kann zur Diskussion verwendet werden, vergleiche **Bild 4**.

4 Steifigkeitsmodellierung

Aufgrund der wirkenden externen Lasten, bestehend aus Trägheits- und Reibungskräften von Paket, Gliedern und Gelenken, verformt sich die gesamte Struktur. Diese Verformungen führen zu einer verschlechterten Genauigkeit oder sogar zu Schwingungen. Die benötigte Genauigkeit bei der Positionierung der Pakete ist vergleichsweise gering. Dennoch sollte die Deformation auf wenige Millimeter beschränkt und für den Endkunden nicht sichtbar sein. Für die Vorhersage der zu erwartenden Verformung bzw. für die Auslegung der Profilquerschnitte und Lagerstellen ist ein Steifigkeitsmodell notwendig. Häufig wird die Finite-Elemente-Analyse (FEA) eingesetzt, um Deformationen oder Spannungszustände zu ermitteln. Diese kann zwar relativ genaue Ergebnisse liefern, ist aber auch rechenintensiv. Eine Alternative, die vor allem bei der Berechnung von parallelen Kinematiken verwendet wird, ist die Matrix-Struktur-Analyse (MSA), vergleiche [11, S. 45. ff.]. Diese stellt einen guten Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit dar und ist daher bei einer Optimierung zu bevorzugen. Die ursprüngliche MSA ist limitiert auf Balkenelemente und erst die Erweiterungen von Deblaise et al. [12] ermöglichen die Verwendung von kinematischen Beziehungen und die Berücksichtigung von Randbedingungen sowie Gelenksteifigkeiten. Prinzipiell ist die Funktionsweise von FEA und MSA vergleichbar: Beide reduzieren die kinematische Struktur auf nachgiebige Balkenelemente verbunden mit steifen Knoten, vergleiche **Bild 5**.

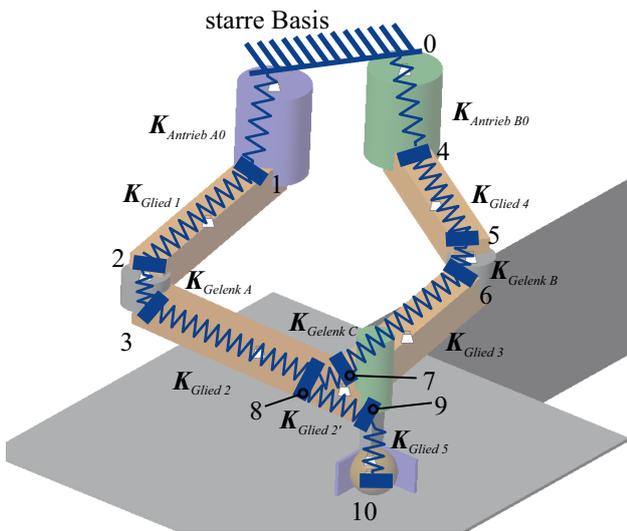


Abbildung 5 Ersatzmodell für die Steifigkeitsberechnung

Das Vorgehen bei der Berechnung mittels der MSA zeigt **Bild 6**. Zunächst werden die Elemente, also Glieder und Gelenke, einzeln betrachtet und deren Steifigkeit als Matrix formuliert. Diese werden dann entsprechend der Elementlagen in das global Koordinatensystem transformiert und letztlich zusammengesetzt. Die Gesamtsteifigkeitsmatrix repräsentiert die Steifigkeit der gesamten Struktur. Die Trägheitskräfte müssen durch Flächenlasten angesetzt werden. Dann lassen sich die Verschiebungen und Schnittlasten berechnen. Zur Überprüfung der Annahmen in der Mehrkörpersimulation können diese Schnittlasten mit den Schnittkräften verglichen werden. Die Gesamtverschiebung am Greifer dient nun als Vergleichskriterium.

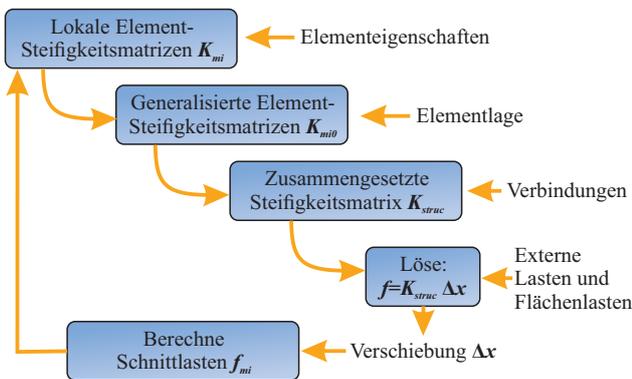


Abbildung 6 Vorgehen bei der Matrix-Struktur-Analyse

5 Optimierung

Bei der Optimierung werden die Designparameter des Gesamtsystems systematisch mit einem genetischen Optimierungsverfahren variiert, um eine Lösung zur bestmöglichen Erfüllung der Zielkriterien zu finden.

Die Zielkriterien setzen sich aus den Antriebsgrößen, den Lasten und der Verformung für eine Referenztrajektorie zusammen. Diese Referenztrajektorie stellt typische Able-

geaufgaben und die entsprechenden Rückbewegungen dar und wird in **Bild 7** gezeigt. Den Geschwindigkeitsverlauf des Greifers zeigt **Bild 8**. Um möglichst kleine Motoren einsetzen zu können, müssen die maximalen Momente und Drehzahlen möglichst gering sein. Weiterhin wird der Gesamtenergieverbrauch minimiert, um die kinematischen Eigenschaften über die gesamte Bahn zu bewerten. Die maximalen Schnittkräfte und Lagerlasten bestimmen die konstruktive Gestaltung des Systems und sind zu minimieren. Auch die Verformung sollte minimal sein.

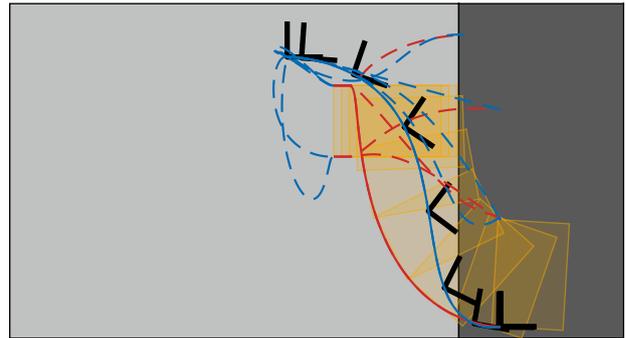


Abbildung 7 Greifer- und Paketbahnen für die Optimierung

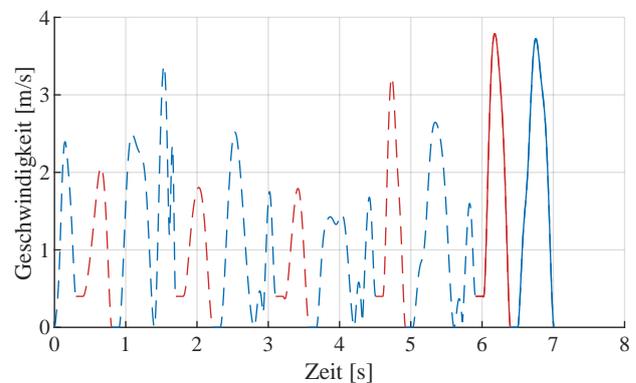


Abbildung 8 Geschwindigkeitsverlauf der Testbahnen

Damit ein Vergleich der einzelnen Größen möglich ist, wird für jede Kenngröße eine Zielgröße definiert. Anschließend wird eine multikriterielle Optimierung mit dem NSGA-II Algorithmus durchgeführt, siehe [13]. Dieser Algorithmus gehört zu den genetischen Optimierungsalgorithmen und liefert als Ergebnis mehrere Lösungen auf einer sog. Pareto-Front. Einzelne Kriterien einer jeden Lösung der Pareto-Front können nur verbessert werden, indem andere Kriterien verschlechtert werden. Bei einem genetischen Algorithmus wird bei einer Iteration von einer Generation gesprochen und bei einer Kombination von Designparametern von einem Individuum. Der iterative Ablauf der Optimierung ist:

1. Variation der Designparameter auf Basis der letzten Generation
2. Mehrkörpersimulation für alle Individuen
3. Überprüfung der Randbedingungen, ggf. Abbruch
4. Berechnung der Verformung mittels MSA
5. Auswertung weiterer Kriterien, ggf. Abbruch
6. Berechnung der Zielfunktion
7. Auswahl der besten Lösungen

Die Ergebnisse der Optimierung werden automatisiert in einem Bericht zusammengefasst und erlauben damit eine weitere Gewichtung und Auswahl durch den Betrachter bzw. Kunden. Neben einer Einzeldarstellung mit Steckbrief zu jeder Lösung, wird eine Gegenüberstellung aller Lösungen bezüglich der Zielkriterien und der Designparameter erstellt.

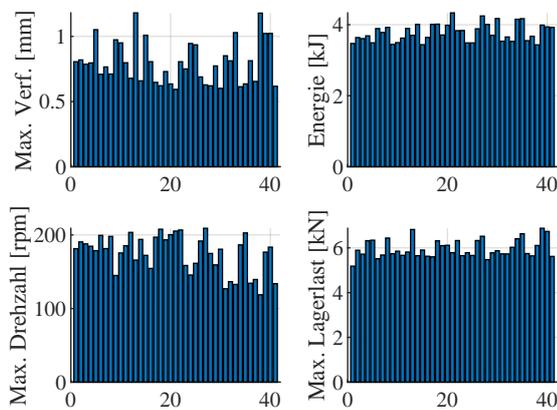


Abbildung 9 Ergebnisausgabe der Leistungsdaten

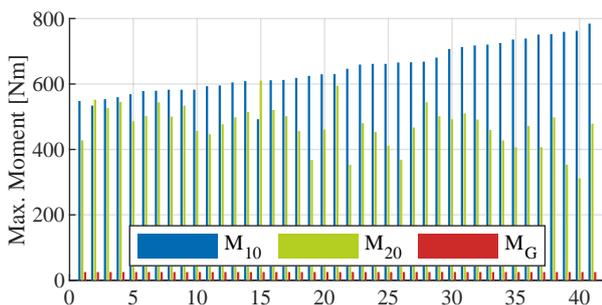


Abbildung 10 Ergebnisausgabe der Leistungsdaten

Die Übersicht zu den Zielkriterien zeigt **Bild 9** und die maximalen Momente zeigt **Bild 10**. Es ist erkennbar, dass alle Lösungen ähnliche Leistungsdaten aufweisen und insbesondere die Unterschiede bei der aufgenommenen Energie aufgrund der Bewegungsvorgabe gering sind. Bei den maximalen Momenten kann die Entscheidung getroffen werden, ob ein großer und ein kleiner Antriebsmotor (z.B. bei

Lösung 22 und 40) gewählt oder zwei gleich starke Antriebsmotoren (z.B. bei Lösung 2 und 21) verwendet werden sollen. Bei den Verformungen gibt es einige Ausreißer, die zu vermeiden sind.

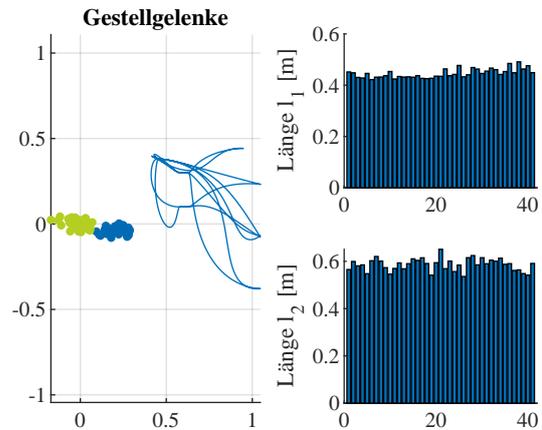


Abbildung 11 Ergebnisausgabe der geometrischen Parameter

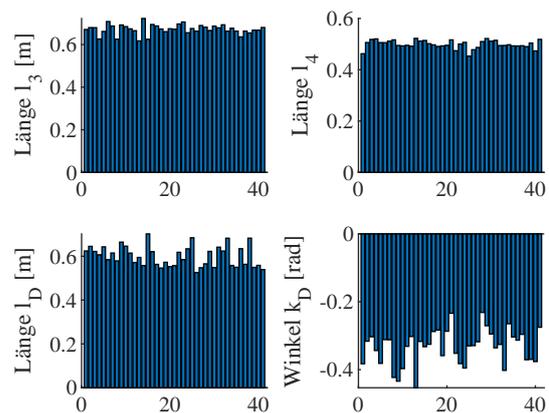


Abbildung 12 Ergebnisausgabe der geometrischen Parameter

Die kinematischen Designparameter aller Lösungen der Pareto-Front zeigen **Bild 11** und **Bild 12**. Ausgenommen sind hier die Parameter der Profile, die zur Erreichung der errechneten Verformung bzw. Steifigkeit benötigt werden. Erkennbar ist, dass sowohl alle Gliedlängen als auch die Lagerstellen der Motoren für die gestellte Bewegungsaufgabe in einem ähnlichen Bereich liegen. Die meiste Variation lässt die Platzierung des Drehantriebs des Greifers auf der Koppel zu. Wird zu diesem Zeitpunkt festgestellt, dass beispielsweise die Lagerstellen in einem ungünstigen Bereich liegen, können die Randbedingungen weiter eingeschränkt werden. Ansonsten wird bei dem vorliegenden Ergebnis die Wahl einer Lösung eher auf der Erfüllung der Zielkriterien basieren.

6 Ergebnis

Dieser Beitrag zeigt das optimierungsbasierte Vorgehen zur Entwicklung von Bewegungseinrichtungen am Beispiel ei-

nes Hochleistungs-Palettierers. Das Besondere dabei ist die Berücksichtigung eines Mehrkörpersimulations- und eines Steifigkeitsmodells. Zwar steigt der Aufwand bei der Formulierung der Modelle, der Optimierung sowie der Zielfunktion, jedoch können Änderungen und neue Randbedingungen schnell berücksichtigt werden. Insbesondere bei Entwicklungen über Abteilungsgrenzen hinweg, ist dies vorteilhaft. Auch die automatisierte Erstellung von Ergebnisdokumentationen ist hilfreich und kann auch für die Entwicklung von Baureihen genutzt werden. Weiterhin zeigt sich der Einsatz der Matrix-Struktur-Analyse als geeignet bei der Auslegung von Robotern.

Die entwickelte Kinematik erfüllt die Randbedingungen der Aufgabe und besitzt im Vergleich zu bestehenden Lösungen eine höhere Leistungsfähigkeit. Die HLP Serie der Trapo AG, siehe **Bild 13**, wird inzwischen vertrieben und ist ein gutes Beispiel für die Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschulen.



Abbildung 13 Trapo AG HLP Serie

Literatur

- [1] VDI, *VDI-Richtlinie 3638 - Palettiermaschinen*, Juli 1995.
- [2] D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier und K. Furmans, Hrsg., *Handbuch Logistik*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-72929-7.
- [3] Langhammer GmbH, *Lagenpalettierer PA8*, <https://www.langhammer.de/de/produkte/lagenpalettierer-pa8.html>, 2018.
- [4] Profipack Verpackungsmaschinen GmbH, *Roboter Palettierung*, <https://www.profipack.at/de/produkte/roboter-palettierung>, 2018.
- [5] Krones AG, *Krones Robobox T*, <https://www.krones.com/de/produkte/maschinen/gruppiersystem-robobox-t.php>, 2018.
- [6] J. Hervé, “The Lie group of rigid body displacements, a fundamental tool for mechanism design”, *Mechanism and Machine Theory*, Bd. 34, Nr. 5, S. 719–730, 1999. DOI: 10.1016/s0094-114x(98)00051-2.
- [7] Gerhard Schubert GmbH, *Technologie-Systemkomponenten*, <https://www.schubert.group/de/technologie/systemkomponenten.html>, 2018.
- [8] Mitsubishi Electric Europe B.V., *MELFA Roboter – RP-Serie*, <https://de3a.mitsubishielectric.com/fa/de/products/rbt/robot/local/rp>, 2018.
- [9] L. Campos, F. Bourbonnais, I. A. Bonev und P. Bigras, “Development of a Five-Bar Parallel Robot With Large Workspace”, in *Volume 2: 34th Annual Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B*, ASME, 2010. DOI: 10.1115/detc2010-28962.
- [10] J. Niemeyer, G. Dittrich und B. Corves, *Methodische Entwicklung von Prinziplösungen bei der Auslegung ungleichmäßig übersetzender Getriebe unter Verwendung eines praxisorientierten interaktiven Wissensspeichers: Techn. Hochsch., Diss.–Aachen, 2002*, Ser. Berichte aus der Konstruktionstechnik. Aachen: Shaker, 2003, ISBN: 3832215182.
- [11] T. Detert, “Kinematic Accuracy and Self-Calibration of an Object Integrative Handling System”, Diss., RWTH Aachen University, 2018.
- [12] D. Deblaise, X. Hernot und P. Maurine, “A systematic analytical method for PKM stiffness matrix calculation”, in *Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, Hrsg., 2006, S. 4213–4219. DOI: 10.1109/ROBOT.2006.1642350.
- [13] Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and T. Meyarivan, “A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II”, in *IEEE transactions on evolutionary computation*, New York, 2002.