

Konzeptstudie einer 6D-temperaturstabilen Verstelleinheit

Masterarbeit

ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplomingenieur (Dipl. Ing.)
der Studienrichtung Maschinenbau
unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Haas
betreut von **Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Jörg Edler**
Institut für Fertigungstechnik

eingereicht an der Technischen Universität Graz
Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften
von

BUMBERGER Roman
0931052

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Graz, am.....
(Datum/date)

.....
(Unterschrift/signature)

Danksagung

Die vorliegende Abschlussarbeit stellt das Ende meines Studiums an der Technischen Universität Graz dar. Um eine solche Arbeit in dieser Form erst zu ermöglichen, ist neben dem Verfasser noch eine Vielzahl anderer Personen nötig.

Zum einen sind das die Betreuer und mittelbaren Ansprechpersonen vom Institut für Fertigungstechnik: Prof. Dr. Franz Haas und Dr. Jörg Edler.

Einen besonderen Dank geht auch an den Studentischen Mitarbeiter Martin Scharf, mit dem ich an diesem Projekt eng zusammengearbeitet habe.

Unserem Industriepartner, der *Dr. Johannes Heidenhain GmbH*, sei ebenfalls gedankt. Ohne diese wäre es nicht zu diesem Projekt gekommen.

Abschließend möchte ich meiner Familie danken, die mich während der letzten Jahre immer unterstützt und so mein Studium möglich gemacht haben.

Meinen aufrichtigen Dank!

Roman Bumberger

Kurzfassung

Diese Masterarbeit behandelt die Konzeptstudie einer temperaturstabilen 6D-Verstelleinheit. Anhand von Vorgaben des Unternehmens *Heidenhain* soll eine solche Einheit am Institut für Fertigungstechnik an der Technischen Universität Graz entstehen.

Vorab werden die in der Industrie erhältlichen 6D-Positionierer analysiert und auf ihre Eignung bezüglich der gewünschten Anforderungen verglichen. Hierfür werden anhand eines eigens erstellten, unabhängigen Bewertungsbogens eine Reihe in Frage kommender Systeme gegenübergestellt. Auf Grundlage dieser Bewertungsbögen wird entschieden, die Umsetzung einer Parallelkinematik anzustreben, im Speziellen eines Hexapoden.

Neben der Bewertung von erwerbbaaren Hexapoden werden auch Bauelemente für den Entwurf eines eigenen Hexapoden näher betrachtet.

Für eine eigene Realisierung ist das Verstehen der kinematischen Zusammenhänge eines Hexapoden unumgänglich. Daher wird in einem eigenen Kapitel beschrieben, wie die Rückwärts- und die Vorwärtskinematik dieser Vorrichtungen anzuwenden sind. In einer eigenen Studienarbeit wurden diese Beziehungen in Form eines MATLAB-Programmes erstellt, um kinematische Anforderungen zu ermitteln. Auf die Ergebnissen dieser eigenen Studienarbeit wird in verschiedenen Abschnitten Bezug genommen, da diese Resultate essentiell für die Neuentwicklung sind.

Durch hohe Steifigkeitsanforderungen wird in einem eigenen Kapitel die Steifigkeit eines Hexapoden beschrieben und analysiert. Auf Basis einer Reihe Finite Elemente Analysen, welche in ANSYS durchgeführt wurden, wird die optimale Geometrie eines Hexapoden bezüglich Steifigkeit gesucht. Die Steifigkeiten eines Hexapoden werden in Diagrammen in Abhängigkeit der Bauhöhe abgebildet und mit weiteren untersuchten Kinematiken verglichen, um dessen Vorzüge hervorzuheben. Im Abschluss werden Beziehungen aufgestellt, die den Zusammenhang zwischen den Einzelsteifigkeiten der Verbindungsstreben und den Gesamtsteifigkeiten eines Hexapoden beschreiben.

Durch die Kombination der kinematischen Studie und Steifigkeitsanalyse werden die Anforderungen an den Aktor in den Stäben definiert. Eine unkonventionelle Lösung der Bewegungsumsetzung behandelt die Entwicklung eines fluidischen Aktors. Hierbei werden durch elastische Verformungen die Verfahrswege erzeugt. Diese neue Technologie wird auf die theoretische Realisierbarkeit überprüft.

Im Abschluss wird ein Überblick über die Konzeptstudie gegeben und die weitere Vorgangsweise am Institut für Fertigungstechnik erläutert.

Abstract

This master's thesis describes the development of a 6D temperature-stable positioning device. On the basis of the requirements of the company Heidenhain such a positioning device shall be produced at the Institute of Production Engineering of the Technical University of Graz.

In the beginning existing 6D positioning devices are analysed and compared to the requirements. For that purpose an independent assessment form is created to gain a better understanding of the products. Based on this evaluation, the aim of this thesis is the completion of the company requirements using parallel kinematics, especially a hexapod.

Not only the existing 6D positioning devices are analysed, but also the single parts used later for developing a concept of an own hexapod.

For the development of a hexapod it is crucial to understand the kinematics. Therefore one chapter is dedicated to an explanation of the backward- and forward-kinematics and how to use it. A specially developed MATLAB program is used to solve these kinematic problems. This program is able to calculate the requirements for the six actors of the hexapod. These resulting actor demands are then used in this master's thesis.

There is a high requirement for the stiffness of the positioning device; therefore one chapter consists of stiffness calculations of the hexapod. On the basis of a set of finite element analysis, the optimum geometry of the hexapod is investigated. This is done in the software ANSYS. But not only the hexapod itself, other parallel kinematics are also investigated for the stiffness. In the end of the stiffness analysis the connection between the overall stiffness and the stiffness of one actor is described.

Based on the requirements of the actor an unconventional actor solution is investigated. It analyses, if an fluid driven actor made of flexure elements can fulfil the demands. Here the elastic material properties should be used for gaining stiffness. This technology is researched on theoretical basis.

In the end of this thesis an overview of the work done is given and the current work necessary for this project at the Institute of Production Engineering is shown.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Statutory Declaration	II
Danksagung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
1. Einführung	1
1.1. Projektstart	1
1.2. Systemanforderungen	1
1.2.1. Anforderungen an die Positionierung der Encoder	1
1.2.2. Anforderungen an die zu entwickelnde Vorrichtung	2
1.3. Interpretation der Anforderungen	3
1.3.1. Translatorische Anforderungen	3
1.3.2. Rotatorische Anforderungen	3
1.4. Technische Grundbegriffe	4
1.4.1. Absolute Genauigkeit (accuracy of pose, AP)	4
1.4.2. Wiederholgenauigkeit (repeatability of pose, RP)	4
1.4.3. Auflösung	4
2. Literatur	5
2.1. Bestehende Systeme	5
2.1.1. Positionierungsplattform	5
2.1.2. Serielle und parallele Kinematik	6
2.1.3. Parallele Kinematik	8
2.2. Bewertung möglicher Komponenten	12
2.2.1. Piezoantriebe	12
2.2.2. Elektrische Antriebe	14
2.2.3. Hybrid-Antrieb	14
2.2.4. Gelenke	15
2.2.5. Materialien	17
3. Lastenheft	19
3.1. Modifizierte Systemanforderungen	19
3.2. Typenfestlegung	19
3.3. Aufgabengebiete	20
3.3.1. Kinematikstudie	200

3.3.2.	Steifigkeitsanalyse	21
3.3.3.	Fluidischer Aktor mit Formstrukturen.....	21
4.	Kinematikstudie	22
4.1.	Allgemeiner Aufbau.....	22
4.2.	Rückwärtskinematik	23
4.3.	Vorwärtskinematik.....	24
4.4.	MATLAB-Kinematik-Tool.....	25
5.	Steifigkeitsanalyse	26
5.1.	Steifigkeitsberechnung mittels Finite Elemente Methode.....	26
5.1.1.	Modellieren mit SolidWorks.....	26
5.1.2.	Berechnung mit ANSYS und Auswertung in Excel	27
5.1.3.	Zusammenspiel der Programme	27
5.2.	Steifigkeit eines Hexapoden bei verschiedenen Ausführungen	28
5.3.	Hexapodmodell aus einem Bauteil ohne Kontaktbedingungen	30
5.4.	Hexapodmodell mit reibungsfreien Kugelgelenken.....	31
5.5.	Hexapod mit reibungsfreien Kugelgelenken mit starr ausgeführter Plattform und Gelenkpfannen.....	32
5.6.	Vergleich der Ergebnisse	33
5.7.	Doppelter Tricept in X-Ausrichtung.....	34
5.8.	Doppelter Tricept in Y-Ausrichtung.....	35
5.9.	Vergleich verschiedener Systeme	36
5.10.	Änderung der Steifigkeit eines Hexapoden bei verschiedenen Lagen.....	36
5.11.	Zusammenfassung	37
6.	Fluidischer Aktor mit Formstrukturen	38
6.1.	Formstrukturen.....	38
6.2.	Fluidischer Aktor	39
6.2.1.	Geometrie	39
6.2.2.	Materialien	40
6.2.3.	Berechnungsmethodik.....	41
6.2.4.	Geometrie- Optimierung.....	43
6.2.5.	Herstellung.....	45
6.2.6.	Messung	46
6.2.7.	Konzept-Entwurf.....	47
6.2.8.	Zusammenfassung.....	48

7. Ergebnisse und Diskussion	49
7.1. Erkenntnisse aus dem MATLAB-Kinematiktool	49
7.2. Vergleich zu anderen Hexapoden	51
7.3. Weitere Vorgangsweise	51
Literaturverzeichnis	53
Abbildungsverzeichnis.....	55
Tabellenverzeichnis.....	57
Anhang	58
Anhang A: zu Kapitel 1: Einführung	58
Anhang B: zu Kapitel 2: Literatur	63
Anhang C: zu Kapitel 3: Lastenheft:.....	72
Anhang D: zu Kapitel 4: Kinematikstudie	76
Anhang E: zu Kapitel 5: Steifigkeitsanalyse	76
Anhang F: zu Kapitel 6: Fluidischer Aktor	82
Anhang G: zu Kapitel 7: Ergebnisse und Diskussion	106

1. Einführung

Diese Arbeit ist Teil eines Kooperationsprojektes zwischen dem *Institut für Fertigungstechnik* an der *Technischen Universität Graz* und dem Unternehmen *Dr. Johannes Heidenhain GmbH*.

1.1. Projektstart

Die *Dr. Johannes Heidenhain GmbH* ist ein deutscher Hersteller hochgenauer Messgeräte für Länge und Winkel, außerdem werden CNC-Steuerungen hergestellt.¹ In der Abteilung MG-E-IV werden derzeit Tests zur Untersuchung des Anbaueinflusses mit einer piezobewegten 5-Achsverstelleinheit durchgeführt. Solche Untersuchungen erfordern eine gezielte Veränderung der Encoderposition gegenüber der Maßverkörperung. Aufgrund neuer Entwicklungen von Messgeräten bietet diese Verstelleinheit nicht mehr die nötigen Verfahrenswege.

Zudem soll eine neue Vorrichtung auch die Möglichkeit bieten, den Anbaueinfluss gemeinsam mit dem Betriebstemperatureinfluss zu untersuchen. Dafür sollen Tests bei unterschiedlichen Temperaturen in einer Klimakammer durchgeführt werden.

„Es ist eine Vorrichtung (6-Achsversteller) zur Untersuchung des Anbaueinflusses auf das Signalverhalten und die Interpolationsfehler von offenen Längen- und Winkelmessgeräten zu entwickeln.“²

Auf Anfrage des Unternehmens Heidenhain ist ein neues Projekt am Institut für Fertigungstechnik an der TU-Graz entstanden. Genaue Anforderungen wurden in Form eines Lastenheftes übermittelt. Dieses ist im Anhang A zu finden.

1.2. Systemanforderungen

Das von der Firma erstellte Lastenheft fordert keine spezielle Technologie oder Aussehen der Verstelleinheit und wurde in dieser Hinsicht sehr allgemein gehalten. Lediglich die Anforderungen wurden spezifiziert. Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte des Lastenheftes wiedergegeben³.

1.2.1. Anforderungen an die Positionierung der Encoder

Der 6-Achs-Versteller soll direkt auf einer von Heidenhain zu konstruierenden Verfahrenseinheit montiert werden.

Zur Verfahrensstrategie ist gegeben, dass sowohl einzelne Freiheitsgrade, als auch beliebige Kombinationen der sechs Freiheitsgrade verfahren werden sollen. Außerdem ist ein gleichzeitiges Anfahren aller Maximallagen erforderlich. Diese Maximallagen sowie alle Anforderungen sind in Tabelle 1.1 angegeben und Abbildung 1.1 stellt eine Skizze der Koordinatenrichtung dar.

¹ Vgl. Heidenhain (2015), Onlinequelle [01.07.2015]

² Vgl. Heidenhain/Pucher/Urban (2014), S. 2.

³ Vgl. Heidenhain/Pucher/Urban (2014), S. 3 ff.

	Abtaststand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]	Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]
Erforderlicher Verfahrenweg	$\pm 3 \text{ mm}$	$\pm 3 \text{ mm}$	$\pm 3 \text{ mm}$	$\pm 60 \text{ mRad}$	$\pm 60 \text{ mRad}$	$\pm 60 \text{ mRad}$
Kleinste Schrittweite	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{Rad}$
Anbaureproduzierbarkeit (Montage, danach Feinabgleich)	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{Rad}$
Absolute Verstellgenauigkeit	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{Rad}$
Wiederholgenauigkeit	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$
Umkehrspiel	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$
Max. Geschwindigkeit	$> 0,5 \text{ mm/s}$	$> 0,5 \text{ mm/s}$	$> 0,5 \text{ mm/s}$	$> 0,5 \text{ mRad/s}$	$> 0,5 \text{ mRad/s}$	$> 0,5 \text{ mRad/s}$
Steifigkeit	$4 \text{ N}/\mu\text{m}$	$4 \text{ N}/\mu\text{m}$	$4 \text{ N}/\mu\text{m}$	2 Nm/mRad	2 Nm/mRad	2 Nm/mRad

Tabelle 1.1: Anforderungen,
Quelle: Heidenhain/Pucher/Urban (2014), S. 4 (leicht modifiziert).

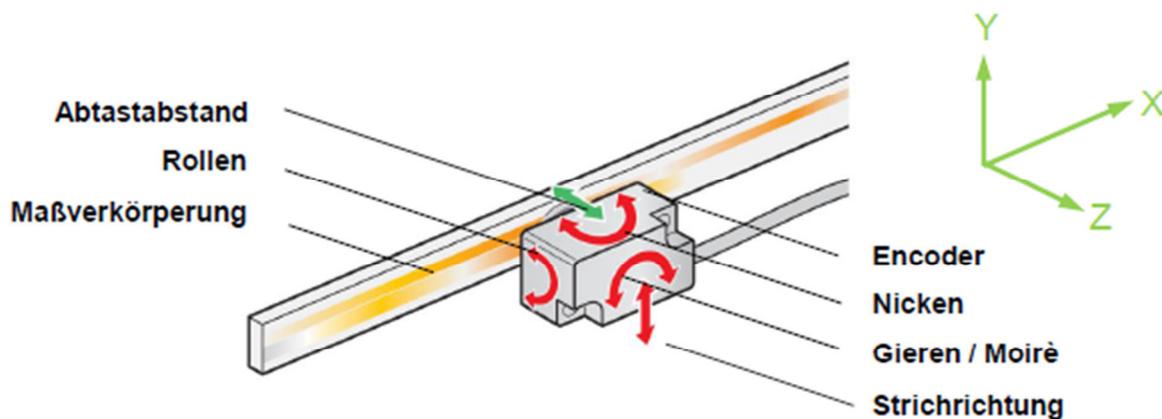
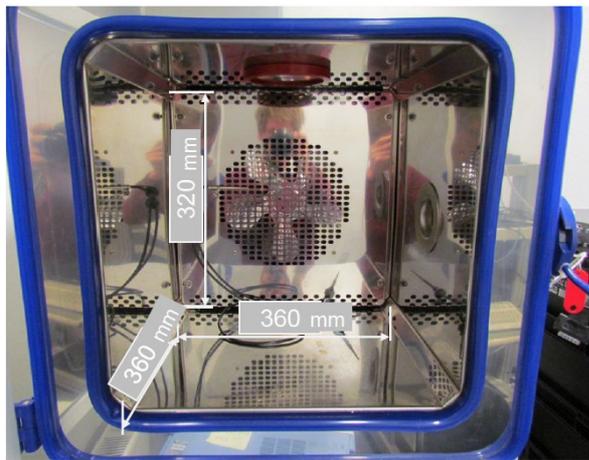


Abbildung 1.1: Koordinatendefinition,
Quelle: Heidenhain/Pucher/Urban (2014), S. 4.

1.2.2. Anforderungen an die zu entwickelnde Vorrichtung

- Prüfung im Temperaturbereich von -20°C ... $+80^{\circ}\text{C}$ in einer Klimakammer
- schneller Anbau der Prüflinge mit hoher Anbaureproduzierbarkeit an den 6D-Versteller
- im Zuge der Konstruktion kann eine Orientierung festgelegt werden, dadurch wird die geforderte Traglast ($0,5 \text{ kg}$) bei anderer Orientierung obsolet
- $170\text{mm} \times 340\text{mm} \times 150\text{mm}$ (BxTxH) – Abmessungen des verfügbaren Raums für eine 6D-Verstelleinheit (vgl. Abbildung 1.2)
- es sollen mindestens zwei Verfahreinheiten incl. 6-Achsversteller nebeneinander in der Klimakammer betrieben werden
- maximales Gewicht von 3kg



Verfügbarer Innenraum der Klimakammer



Verbleibender Innenraum über der Voice-Coil-Verfahrvorrichtung

Abbildung 1.2: Klimakammer,
Quelle: Heidenhain/Pucher/Urban (2014), S. 6.

Dies sind die wichtigsten relevanten Anforderungen an die zu erstellende Verfahreinheit. Das vollständige Lastenheft befindet sich im Anhang A.

1.3. Interpretation der Anforderungen

Die Anforderungen an die Verstelleinheit sind in Tabelle 1.1 für jede Orientierung separat angegeben. Es ist ersichtlich, dass alle Angaben in translatorischer Richtung identisch sind. Ebenso sind die rotatorischen Anforderungen in alle drei Richtungen identisch. Im Folgenden sollen die wichtigsten Forderungen beschrieben werden.

1.3.1. Translatorische Anforderungen

Der erforderliche Fahrweg beträgt ± 3 Millimeter für jede Achse, somit 6 Millimeter gesamt. Außerdem ist ein gleichzeitiges Anfahren aller Extremlagen gefordert. Dadurch erschließt sich ein kubischer Arbeitsraum mit je 6 Millimeter Seitenlänge. Die Diagonale errechnet sich durch Multiplikation mit $\sqrt{3}$ und ergibt 10,4 Millimeter.

Alle geforderten Genauigkeiten befinden sich im Mikrometer-Bereich und eine Steifigkeit von $4 \text{ N}/\mu\text{m}$ ist erwünscht. Dieser hohe Wert ist von Heidenhain durch mögliche Schwingungen im Gesamtsystem begründet.

1.3.2. Rotatorische Anforderungen

Der erforderliche Winkel beträgt ± 60 mRad für jede Achse, somit 120 mRad gesamt. Umgerechnet ergibt dies eine Winkelbewegung von knapp 7 Grad. Wiederrum gilt, alle Extremlagen sollen gleichzeitig angefahren werden. Somit soll auch eine gleichzeitige Bewegung mit den translatorischen Achsen möglich sein. Dadurch ergeben sich notwendige Fahrwege, welche auf den ersten Blick im Lastenheft nicht erkennbar sind.

Es sei angemerkt, dass sich die geforderten Genauigkeiten alle im Mikro-Radian-Bereich befinden. Eine rotatorische Steifigkeit von $2 \text{ Nm}/\text{mRad}$ ist erwünscht.

1.4. Technische Grundbegriffe

1.4.1. Absolute Genauigkeit (accuracy of pose, AP)

Diese beschreibt die Abweichung zwischen einer Sollposition und dem geometrischen Mittelpunkt der Istpositionen.

1.4.2. Wiederholgenauigkeit (repeatability of pose, RP)

Diese ist unabhängig von der Sollposition. Sie beschreibt wie genau ein Roboter die gleiche Position bei mehrmaligem Anfahren wieder erreichen kann. Dadurch wird die durchschnittliche Abweichung zwischen den Endpositionen bei stets gleichem Ziel beschrieben.⁴

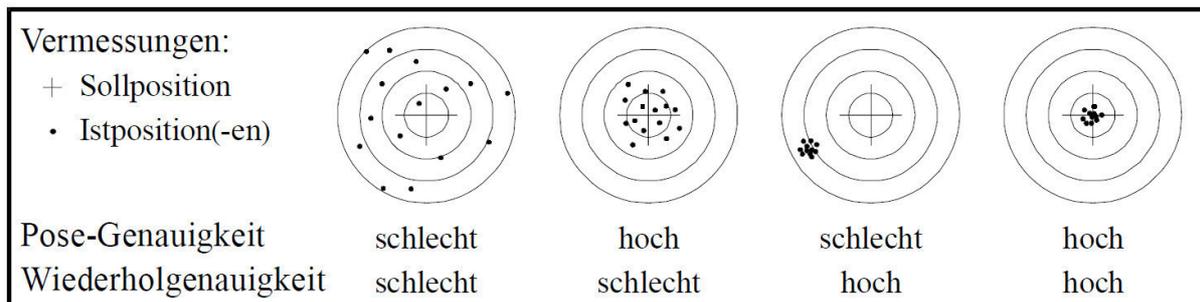


Abbildung 1.3: Absolute Genauigkeit und Wiederholgenauigkeit,
Quelle: Beyer (2004), S. 6.

1.4.3. Auflösung

Die Auflösung beschreibt die kleinste noch messbare Änderung einer Position.

⁴ Vgl. Beyer (2004), S. 6.

2. Literatur

Für den Start dieses Projekt wird nach bestehenden Systemen und Möglichkeiten der Realisierung gesucht. Hierfür werden sowohl Gesamtlösungen als auch einzelne Komponenten gesucht welche, die Anforderungen erfüllen können.

2.1. Bestehende Systeme

In Hinblick auf bereits vorhandene Systeme mit sechs Freiheitsgraden sind verschiedene Lösungsansätze zu finden. Grob unterteilen lassen sich diese in:

- Positionierungsplattform
- serielle Kinematik und
- parallele Kinematik.

Da es sich um eine Vielzahl verschiedener Hersteller handelt, ist ein direkter Vergleich der Produkteigenschaften schwierig. Daher wird ein eigener Bewertungsbogen erstellt und für jedes Produkt werden die relevanten Daten aus der Produktbeschreibung übertragen. Diese gesammelten Bewertungsbögen sind im Anhang B ersichtlich, welche einen einfachen Vergleich der verschiedenen Systeme zulassen. Somit wurde eine bessere Übersicht erlangt.

Außerdem wurden die angegebenen Werte anhand eines Ampelsystems beurteilt. Rote Werte waren weit außerhalb der Anforderungen seitens Heidenhain, gelbe Werte waren beinahe ausreichend und grüne Werte innerhalb der Toleranz. Dieses Prinzip findet auch in Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 Verwendung.

Je nach Hersteller und Produkt werden meist nicht alle relevanten Daten angegeben, allerdings konnten anhand der Bewertungsbögen die verschiedenen Lösungsansätze besser verstanden werden. Durch Begutachten der Bewertungsbögen einer Produktfamilie kann auf das generelle Verhalten geschlossen werden.

2.1.1. Positionierungsplattform

Verschiedene Hersteller bieten mehrachsige Positionierungsplattformen an, welche auf Piezogrundlagen beruhen (vgl. 2.2.2. Elektrische Antriebe). Diese Produktfamilie weist allgemein eine sehr gute Genauigkeit auf, wodurch diese als erstes in Betracht gezogen wurde. Allerdings sind die benötigten Verfahrswege mit diesen Produkten nicht realisierbar. Grund dafür ist die nicht ausreichend große Längendehnung eines Piezokristalles.



*Abbildung 2.1: Positionierungsplattform,
Quelle: Physik Instrumente (2015), Onlinequelle [03.08.2015].*

2.1.2. Serielle und parallele Kinematik

Eine serielle Kinematik basiert darauf, dass alle Bewegungsachsen nacheinander aufgebaut sind. Folglich müssen weiter „unten“ gelegene Verstärker höhere Lasten tragen als „obere“ Verstärker und dadurch leistungsstärker ausgeführt sein (vgl. Abbildung 2.2).

Im Vergleich dazu hat die parallele Kinematik parallel geschaltete Bewegungsachsen und daher besitzt jeder Verstärker eine direkte Anbindung zum Endeffektor.

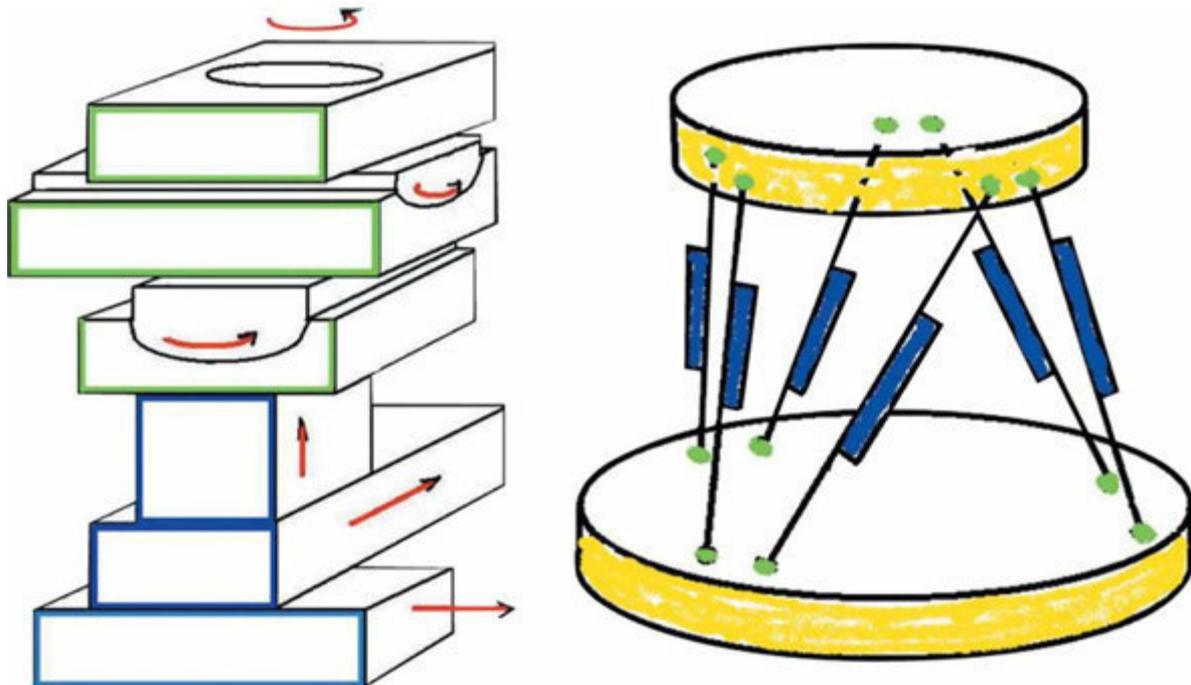


Abbildung 2.2: Serielle Kinematik (links) und parallele Kinematik (rechts),
Quelle: McMahan (2015), Onlinequelle [03.08.2015].

In Tabelle 2.1 sind die wichtigsten allgemeinen Unterschiede zwischen diesen beiden kinematischen Systemen dargestellt. Diese Tatsachen haben sich auch in der Recherche von vorhandenen Systemen wiederspiegelt.

Besonders für die Auswahl eines geeigneten Systems waren die geringen Steifigkeitswerte der seriellen Kinematik ausschlaggebend. Diese befinden sich bei weitem außerhalb der Spezifikationen. Da die Parallelkinematik die Anforderungen besser erfüllen kann, wurde in weiterer Folge vermehrt darauf eingegangen.

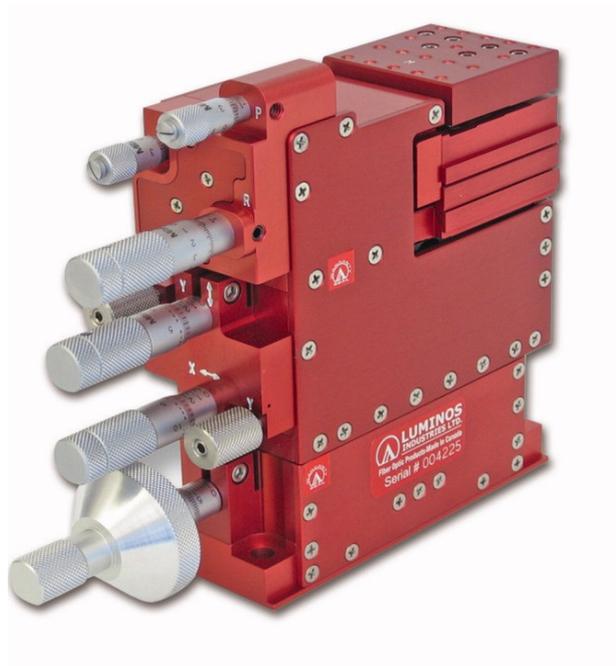


Abbildung 2.3: Serieller Sechachspositionierer
Quelle: QiOptic (2015), Onlinequelle [03.08.2015].

	Parallelkinematik	Serielles, gestapeltes Design
<u>Abmessungen</u>	kompakter bis zu hoher Aufbau	relativ hoher Aufbau
<u>Bewegte Masse</u>	<ul style="list-style-type: none"> alle Aktoren wirken auf die gleiche Plattform. Achsen können identisch ausgelegt werden. 	<ul style="list-style-type: none"> jeder Aktor trägt die weiter "oben" platzierten Versteller plus die Last jeder Aktor bedient einen Freiheitsgrad <ul style="list-style-type: none"> alle Achsen unterschiedlich
<u>Dynamik</u>	hoch, da geringe Masse	dynamische Achsen sollen möglichst weit "oben" montiert werden
<u>Steifigkeit</u>	Gesamtsteifigkeit ist höher als ein einzelnes Glied $k_{ges} > k_{Einzelsteifigkeit}$	Gesamtsteifigkeit ist niedriger als das schwächsten Glied $k_{ges} < k_{Einzelsteifigkeit}$
<u>Genauigkeit</u>	Die Abweichungen aller Aktoren verhalten sich gleich. Komplexer Kompensierungsalgorithmus.	Die Abweichungen eines Aktors bleibt im System. Einfache Kompensierung.
<u>Arbeitsraum</u>	grundsätzlich eingeschränkt	festgelegt durch Auswahl der Führungen
<u>Steuerung</u>	kompliziert, da mehrere Versteller gleichzeitig verfahren müssen	einfach

Tabelle 2.1: Serielle und parallele Kinematik (Beurteilung im Ampelsystem),
Quelle: In Anlehnung an Physik Instrumente (2015), Onlinequelle [03.08.2015] und in
Anlehnung an McMahon (2015), Onlinequelle [03.08.2015].

2.1.3. Parallele Kinematik

Über die ganze Literaturrecherche hinweg zeigt die parallele Kinematik bessere Ergebnisse als die serielle Kinematik. Somit ist schon absehbar in welche Richtung sich dieses Projekt entwickelt.

Parallelkinematische Maschinen basieren darauf, dass alle Bewegungsachsen auf eine bewegte Plattform angreifen. Dadurch ist immer ein gleichzeitiges Bewegen aller Achsen notwendig und das System wird als parallel bezeichnet.

Dies kann durch zwei unterschiedliche Methoden realisiert werden. Entweder werden die Verbindungsstreben mit fixen Ankerpunkten längenveränderlich ausgeführt, oder es werden Verbindungsstreben konstanter Länge benützt wobei die Ankerpunkte verschoben werden (vgl. Abbildung 2.4).

Die Bauform mit sechs längenveränderlichen Verbindungsstreben bezeichnet man als Hexapoden, dieser liefert sechs Freiheitsgrade.

Die Bauweise mit längenkonstanten Verbindungsstreben und beweglichen Ankerpunkten bezeichnet man als SpaceFAB. Hier wird die Umsetzung von sechs Freiheitsgraden erzielt, indem sechs Stäbe eine eindimensionale Bewegung der Ankerpunkte oder drei Stäbe eine zweidimensionale Bewegung der Ankerpunkte durchführen.



Abbildung 2.4: Hexapod (links) und SpaceFAB mit drei Stäben und drei XY-Verstelltische (rechts),

Quelle: Physik Instrumente (2015), Onlinequelle [03.08.2015].

In Tabelle 2.2 werden die in der Literatur allgemeinen Unterschiede zwischen diesen beiden Systemen gegenübergestellt. Aufgrund des vorhandenen Bauraumes ist die Geometrie des Hexapoden besser geeignet, da nur eine beschränkte Grundfläche aber hohe Bauhöhe zur Verfügung steht. Im Hinblick auf lineare und rotatorische Stellwege bieten beide Systeme ausreichende Bedingungen. Letztendlich werden für die Steifigkeiten nur von Hexapoden Werte gefunden, für einen SpaceFAB werden von keinem Hersteller Werte in Datenblättern angegeben. Genauere Informationen über diese Systeme behandeln die nächsten beiden Unterpunkte.

	Hexapod	SpaceFAB
<u>Design</u>	6 Beine mit variabler Länge	3 bzw.6 Beine mit konstanter Länge, Bewegung durch verfahren der Ankerpunkte
<u>Geometrie</u>	kompakte Grundfläche, hohe Bauhöhe	große Grundfläche, niedrige Bauhöhe
<u>Lineare Stellwege [X,Y]</u>	begrenzt	groß
<u>Linearer Stellweg [Z]</u>	groß	begrenzt
<u>Rotatorische Stellwege [θ_x, θ_y]</u>	groß	begrenzt
<u>Rotatorische Stellwege [θ_z]</u>	begrenzt	groß
<u>Steifigkeit [X,Y]</u>	niedrig	hoch
<u>Steifigkeit [Z]</u>	hoch	niedrig

Tabelle 2.2: Gegenüberstellung parallele Kinematik (Beurteilung im Ampelsystem),
Quelle: In Anlehnung an Physik Instrumente (2015), Onlinequelle [03.08.2015].

2.1.3.1. Hexapod

Bei der Recherche nach paralleler Kinematik wird schnell ersichtlich, dass hauptsächlich Hexapoden zu finden sind. Es gibt verschiedene Hersteller, die beide Produktarten anbieten, allerdings wird selbst hier das Hauptaugenmerk auf die Hexapoden gerichtet. Daher wird in weiterer Folge der Fokus vermehrt auf Hexapoden gelegt.

Beim Hexapod, im englischen besser bekannt als „Gough-Stewart Platform“ gibt es eine Typenunterscheidung anhand der Anbringung der Ankerpunkte, hierfür siehe Abbildung 2.5. Es ist zwar möglich die Ankerpunkte für zwei Verbindungsstreben zu konstruieren, allerdings ist dies in den zu erwerbenden Produkten sehr selten umgesetzt. Hauptsächlich ist daher der Typ 6-6 zu finden, wobei die Anbringung der Ankerpunkte darauf schließen lässt, dass Unternehmen versuchen möglichst den Typ 3-3 nachzuahmen.

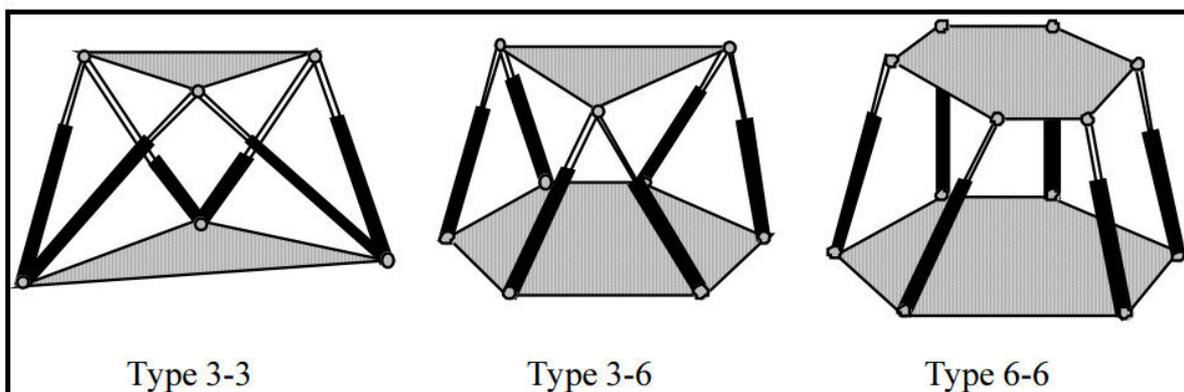


Abbildung 2.5: „Gough-Stewart Platform“
Quelle: Ben-Horin/Shoham/Djerassi (1999), S. 2 Onlinequelle [03.08.2015].

Eine Parallelkinematik mit drei langenveranderlichen Verbindungsstreben und somit drei Freiheitsgraden ist der Tricept. Somit sind nur Translation in $[z]$ und Rotation über die $[x]$ - und $[y]$ - Achse möglich. Hierfür gibt es allerdings die Überlegung, einen zusatzlichen Stab einzubauen und somit das System überbestimmt auszulegen, mit dem Ziel die Steifigkeit zu erhöhen. Einen Entwurf zeigt die Abbildung 2.6 (links). Der zusatzliche Stab (Passive Leg) dient nicht der Positionierung, sondern verhalt sich passiv und ist lediglich eine weitere Stütze. Diese Überlegung kann natürlich auch auf einen Hexapoden übertragen werden (vgl. Abbildung 2.6 rechts).⁵

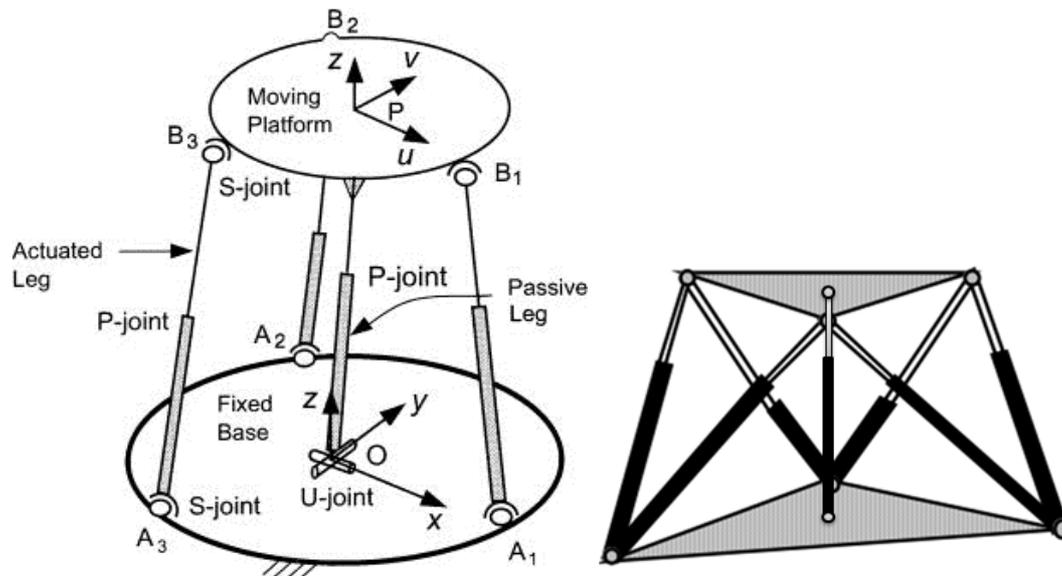


Abbildung 2.6: Tricept überbestimmt (links), Hexapod überbestimmt (rechts)
 Quelle: Sammer/Lung-Wen (2002), Onlinequelle [03.08.2015] und
 Ben-Horin/Shoham/Djerassi (1999), S. 2 (modifiziert) Onlinequelle [03.08.2015].

2.1.3.2. SpaceFAB

Im Vergleich zu Hexapoden gibt es nur sehr wenige Hersteller, die einen SpaceFAB anbieten. Außerdem halten sich diese bei der Veröffentlichung technischer Daten stark zurück. Allerdings kann aus den gegebenen Informationen herausgelesen werden, dass die Eigenschaften ahnlich denen der Hexapoden sind.

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten einen SpaceFAB auszuführen. Die klassische Variante ist die Verwendung von drei starren Stäben, wobei sich die Basis-Ankerpunkte in X- und Y- Richtung bewegen können, diese Variante ist in Abbildung 2.4 ersichtlich. Weiters besteht die Option, sechs starre Stäbe zu verwenden, wobei sich die Ankerpunkte nur in einer Achse bewegen können (vgl. Abbildung 2.7).

Eine schnell erkennbare Problematik ist der benötigte Platzbedarf, da die Ankerpunkte beweglich ausgeführt werden müssen.

⁵ Vgl. Sammer/Lung-Wen (2002)

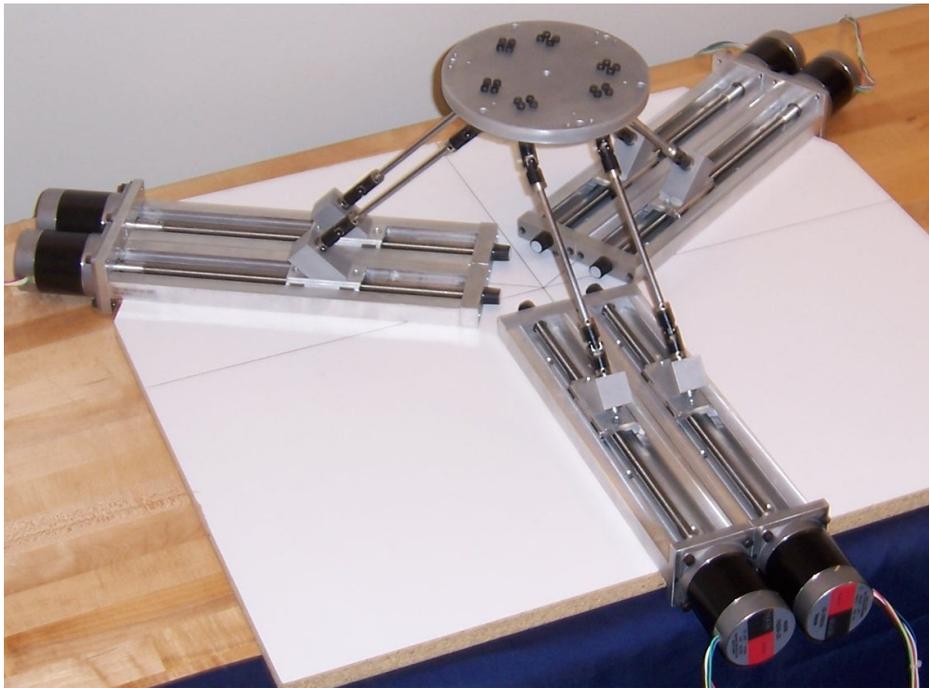


Abbildung 2.7: SpaceFAB mit 6 starren Stäben,
Quelle: The Pennsylvania State University, Onlinequelle [03.08.2015].

2.1.3.3. Weitere Bauweisen

Auf der Suche nach Parallelkinematik stößt man auf eine Vielzahl an Möglichkeiten der Realisierung, so auch auf Kombinationslösungen mit serieller Kinematik. Beispiele sind in Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9 dargestellt. Allerdings handelt es sich meist um Konzepte und theoretische Entwürfe. Die Hexapoden stellen das meistverwendete Produkt der parallelen Kinematik dar. Ein Datenblatt eines Hexapoden von Physik Instrumente (H-811) befindet sich im Anhang B.

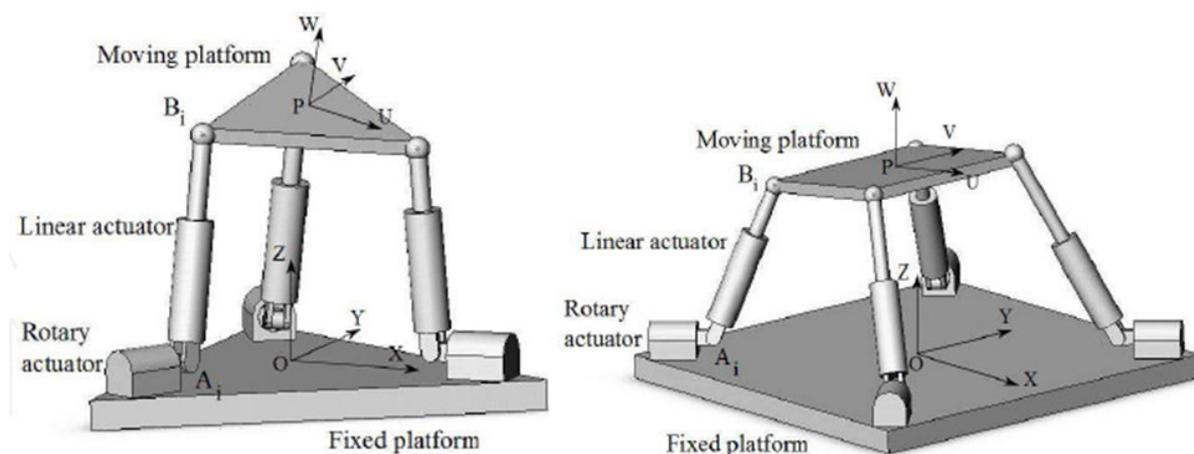


Abbildung 2.8: weitere Bauweisen (statisch bestimmt links, überbestimmt rechts),
Quelle: Abedinnasab/Yong-Jin/Hassan (2012), S. 45, Onlinequelle [03.08.2015].

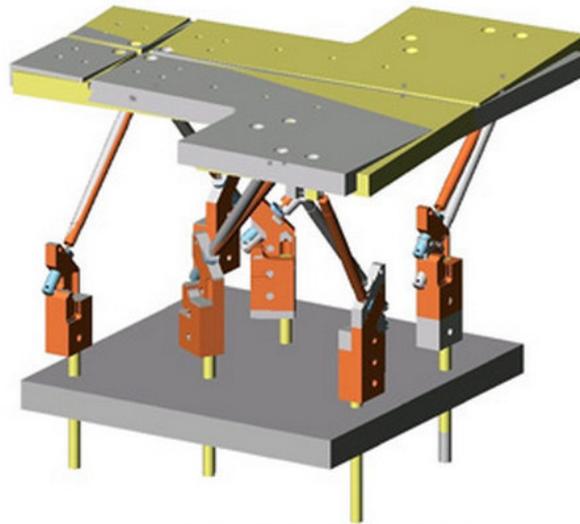


Abbildung 2.9: Parallelkinematik mit konstanter Stablänge, Bewegung durch Heben und Senken der Ankerpunkte,
Quelle: McMahon (2015), Onlinequelle [03.08.2015].

2.2. Bewertung möglicher Komponenten

2.2.1. Piezoantriebe

Der Piezoeffekt beschreibt einen linearen elektromagnetischen Zusammenhang in einem Kristall zwischen mechanischem und elektrischem Zustand. Als direkten piezoelektrischen Effekt versteht man das Entstehen einer elektrischen Spannung durch das Aufbringen einer mechanischen Deformation. Umgekehrt bezeichnet der inverse piezoelektrische Effekt eine mechanische Deformation aufgrund einer angelegten Spannung.⁶

Dieses Prinzip kann zur Positionierung verwendet werden, da elektrische Energie direkt in eine lineare Bewegung umgewandelt wird. Die maximale Bewegung ist begrenzt, dafür kann aber eine sehr hohe Auflösung erreicht werden.⁷

Aufgrund dieser kleinen Verfahrwege eines Piezokristalles gibt es eigens entwickelte Piezoantriebe, welche längere Wege zulassen. In Abbildung 2.10 werden verschiedene Antriebe des Unternehmens *Physik Instrumente* vorgestellt. Zum Teil werden solche Piezoaktoren auch für Hexapoden eingesetzt, dabei handelt es sich aber meist um Spezialhexapoden.

Ein Piezokristall ist im Allgemeinen nicht billig, allerdings werden höchste Auflösungen erreicht. Daher wird zu diesem Zeitpunkt eine vorhandene Technologie gesucht, um bei konkreten Anforderungen für einen Aktor auf dieses Wissen zurückgreifen zu können.

⁶ Vgl. Winner/Hakuli/Wolf (2012), S. 244.

⁷ Vgl. Spanner (1992), S. 162ff.

<p>Hebelübersetzung</p>	<p>Hebelübersetzung ermöglicht Stellwege bis zu mehreren mm: Die Auslenkung des Piezoaktors wird so mechanisch vergrößert.</p> <p>Die Vergrößerung des Hubs geht auf Kosten der Steifigkeit und der Genauigkeit.</p>	
<p>PiezoWalk® Piezoschreitantriebe</p>	<p>Die Piezoaktoren führen im Betrieb eine Schreitbewegung aus, die zu einem Vorschub des Läufers führt.</p> <p>Die Ansteuerung der Aktoren ermöglicht kleinste Schritt- und Vorschubbewegungen, sodass eine hohe Bewegungsauflösung von weit unter einem Nanometer erreicht wird.</p> <p>Die Bewegung ist keinem Verschleiß ausgesetzt.</p>	
<p>PILine® Ultraschall- Piezomotoren</p>	<p>Ein Piezoaktor über ein Kopplungselement gegen einen beweglichen Läufer vorgespannt. Der piezokeramische Aktor wird mit einer hochfrequenten Wechsellspannung zu Ultraschallschwingungen angeregt. Die Deformation des Aktors führt zu einer periodischen diagonalen Bewegung des Kopplungselements zum Läufer.</p>	
<p>PIShift Piezoträgheits- antriebe</p>	<p>Der Aktor dehnt sich langsam aus und nimmt einen Läufer mit. Die schnelle Kontraktion des Aktors kann der Läufer aufgrund seiner Trägheit nicht nachvollziehen und verharrt auf seiner Position.</p> <p>Beliebige, unbegrenzte Stellwege</p>	
<p>PiezoMike Linearaktoren</p>	<p>Piezoaktor dreht eine Feingewindeschraube</p>	

Abbildung 2.10: Piezoantriebe,
Quelle: In Anlehnung an Physik Instrumente, Onlinequelle [Stand 03.08.2015].

2.2.2. Elektrische Antriebe

Für die Bewegungsumsetzung eines Hexapoden dieser Baugröße werden hauptsächlich elektrische Antriebe verwendet. Da von den Anforderungen an die Plattform nicht auf die Anforderungen in einem einzelnen Stab geschlossen werden kann, wird hier ein Überblick über verbaute Motoren in Hexapoden gegeben.

DC-Motor: Dieser wird mit Gleichstrom betrieben und verwendet einen drehzahlabhängigen mechanischen Wechselrichter (Kommutator). Er zeichnet sich durch gutes Anlaufverhalten und gute Regelbarkeit aus.

Bürstenloser DC-Motor: Entgegen der Namensgebung funktioniert dieser nicht nach dem Prinzip der Gleichstrommaschine, sondern ist aufgebaut wie eine Drehstrom-Synchronmaschine mit Erregung durch Permanentmagnete. Es wird ein drehendes magnetisches Feld erzeugt, welches den permanent erregten Rotor mitzieht.

Schrittmotor: Ist ein Synchronmotor, bei dem der Rotor schrittweise gedreht werden kann, und dies ohne Positionsrückmeldung. Dies geschieht durch ein gesteuertes elektromagnetisches Feld der Statorspulen. Ausschlaggebend für die Schrittgröße ist die Polpaaranzahl (Vollschritt-Betrieb), allerdings gibt es die elektronische Möglichkeit des Anfahrens von Zwischenschritten (Mikroschritt-Betrieb).

Servomotor: Hier ist nicht ein physikalisches Wirkungsprinzip gemeint, sondern es handelt sich um die Verwendung einer Regelung. Mittels eines Sensors zur Positionsbestimmung und eines geschlossenen Regelkreises können sowohl Winkelposition, Drehgeschwindigkeit als auch Beschleunigung kontrolliert werden.

Abgesehen vom Motor ist in jedem erhältlichen Hexapod ein Getriebe verbaut, daher werden auch handelsübliche Getriebe berücksichtigt. Meist werden ein- oder mehrstufige Stirnradgetriebe verwendet, allerdings auch Planetengetriebe. Für höhere Übersetzungen bei geringer Baugröße wird auch ein *Harmonic-Drive*-Getriebe⁸ in Betracht gezogen.

Da elektrische Antriebe meist rotatorische Bewegungen erzeugen, ist eine Umwandlung in eine Translation erforderlich. Soweit seitens der Hersteller angegeben, erfolgt diese Transformation in eine Linearbewegung über eine Kugelumlaufspindel (Wälzbewegung) oder ein Trapezspindel (Gleitbewegung). Diese Komponenten gibt es für verschiedene Steigungen.

2.2.3. Hybrid-Antrieb

Für hochgenaue und schnelle Positionierung wird zum Teil auf Hybrid-Systeme verwiesen. Dabei handelt es sich um die Kombination eines elektrischen Motors und eines Piezoelements. Dadurch sind große Verstellwege schnell erreichbar, wobei die exakte Positionierung über einen Piezokristall erfolgt. Ein Prinzip eines solchen Aufbaus zeigt Abbildung 2.11.

⁸ Vgl. Harmonic Drive (2015), Onlinequelle [01.07.2015].

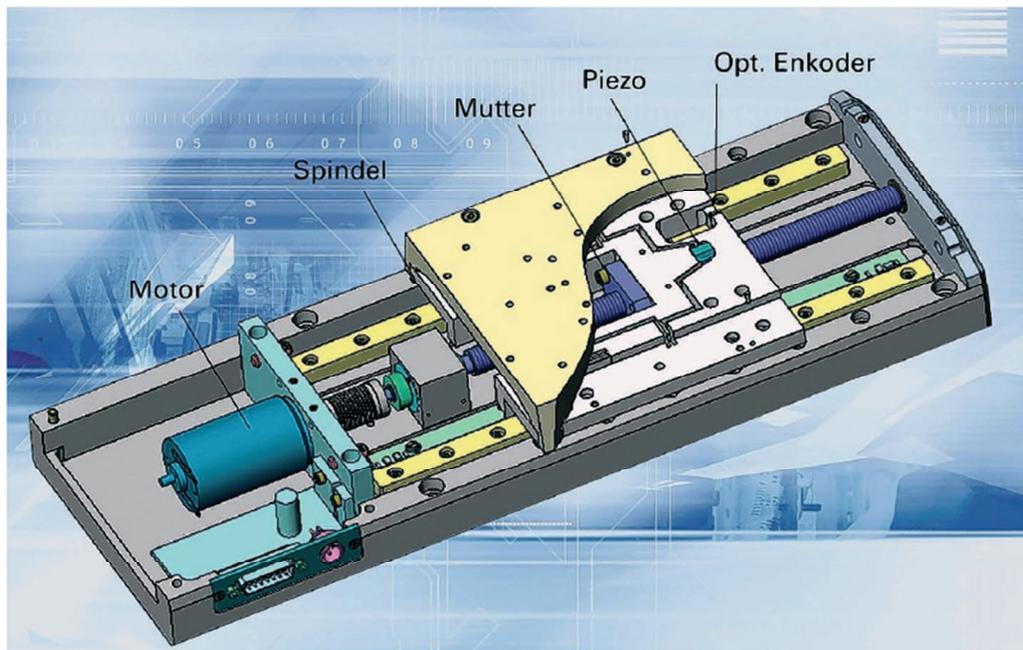


Abbildung 2.11: Prinzip eines Mikrostelltisches mit Hybrid-Nanopositioniersystem
 Quelle: Hoffmann (2006), S. 42, Onlinequelle [03.08.2015].

2.2.4. Gelenke

In der Parallelkinematik spielen Gelenke eine zentrale Rolle. Einerseits sollen diese möglichst steif sein, andererseits aber auch leichtgängig. Im Folgenden werden Gelenke beschrieben, welche in Betracht für eine Parallelkinematik kommen.

2.2.4.1. Festkörpergelenk

Hierbei handelt sich lediglich um Materialverjüngungen, welche eine elastische Deformation zulassen. Eine solche Konstruktion ist in Abbildung 2.12 ersichtlich, wobei es hier ratsam ist die Gestaltung wegen Kerbwirkung zu verbessern. Dadurch gibt es keinen Slick-Slip-Effekt, also kein Ruckgleiten von gegeneinander bewegten Festkörpern. Allerdings ist auch kein definierter Drehpunkt gegeben und nur geringe Winkelbewegungen sind möglich, dies bei vergleichsweise großen Kräften gegenüber Wälz- bzw. Gleitlagern.

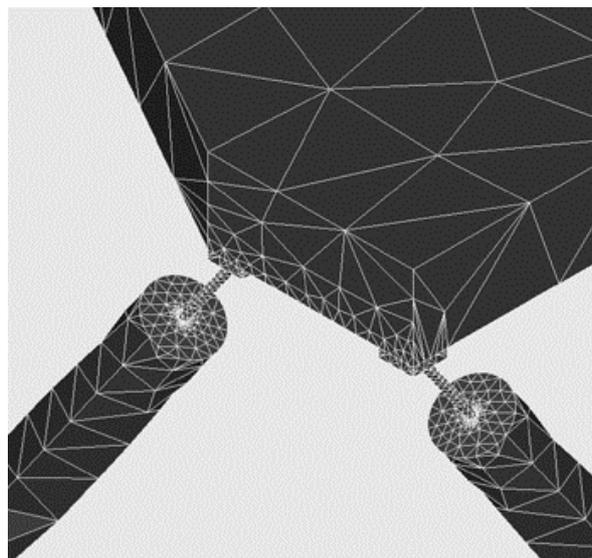


Abbildung 2.12: Festkörpergelenk eines Hexapoden,
 Quelle: McMahon (2015), Onlinequelle [03.08.2015].

2.2.4.2. Kugelgelenk

Bei einem Kugelgelenk bewegt sich eine Kugel in einer Kugelpfanne und besitzt drei Freiheitsgrade (DOF = degree of freedom). Diese sind auch selbst herstellbar, wie in Abbildung 2.13 ersichtlich. Dies ist von Interesse, da somit die Spannung im Gelenk selbst eingestellt werden kann. Dadurch ist es einem selbst überlassen, einen Kompromiss zwischen Leichtgängigkeit und Stick-Slip-Effekt zu finden.

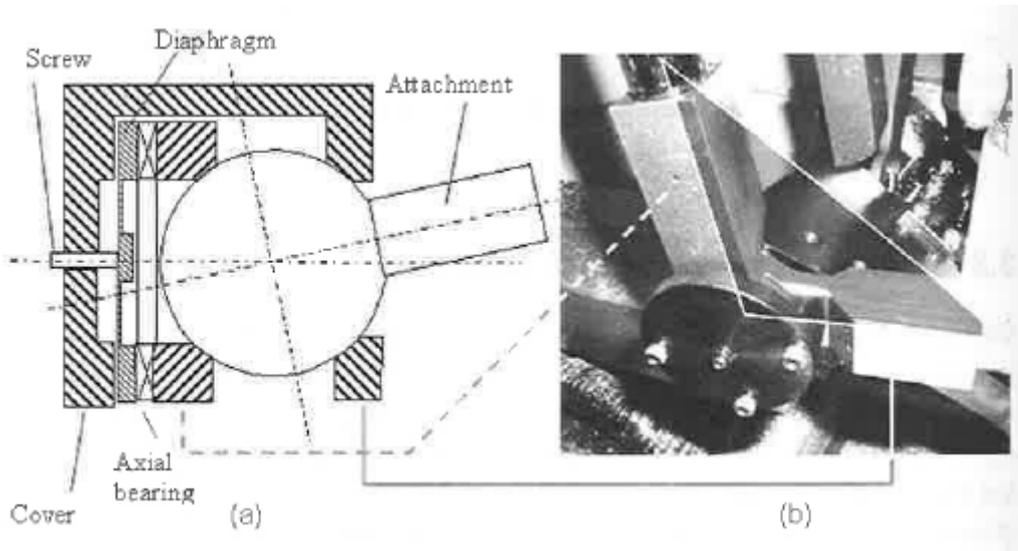


Abbildung 2.13: (a) Modell eines Kugelgelenks und (b) Realisation
Quelle: Neugebauer (2004), S.494.

2.2.4.3. Kardangelenke

In bestehenden Parallelkinematiken sind Kardangelenke, welche nur zwei Freiheitsgrade aufweisen, am meisten in Verwendung. Für einen weiteren Freiheitsgrad besteht die Möglichkeit, zusätzlich ein Axiallager einzubauen, eine gängige Praktik.

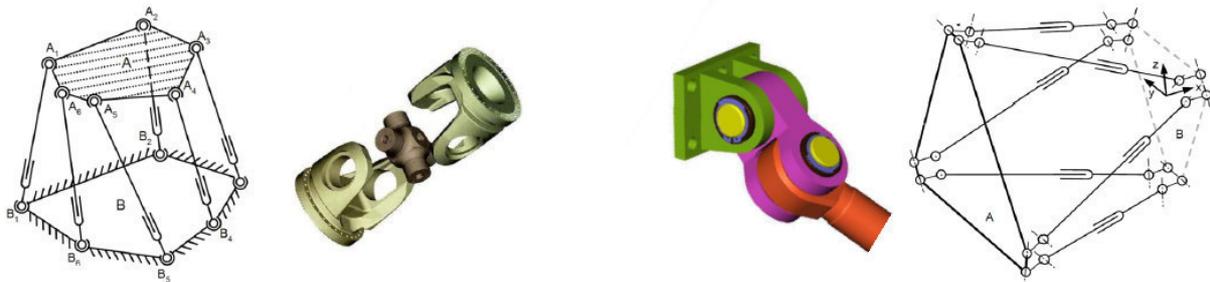


Abbildung 2.14: Kardangelenke eines Hexapoden, links ohne Achsversatz & rechts mit Achsversatz,
Quelle: Hentschl (2012), Onlinequelle [03.08.2015].

Abbildung 2.14 stellt zwei verschiedene Ausführungen von Kardangelenken dar. Die Bauweise ohne Achsversatz hat den Vorteil von eindeutiger Position und Orientierung, wodurch ein analytischer Ansatz möglich ist. Hingegen erfordern Systeme mit Achsversatz einen numerischen Ansatz. Allerdings ist eine kompaktere und robustere Bauweise möglich.⁹

⁹ Vgl. Hentschl (2012), Onlinequelle [01.07.2015].

Des Weiteren gibt es von der Firma INA eigens Baugruppen für parallele Kinematiken, welche allerdings nicht in der gewünschten Baugröße verfügbar sind.¹⁰ Vergleichbare Produkte bietet auch das Japanische Unternehmen HEPHAIST an.

2.2.4.4. Kombination von Gelenken

Bei der Auswahl von Gelenken für eine Parallelkinematik muss auf die Anzahl der Freiheitsgrade geachtet werden.

Durch Verwendung von zwei Kugelgelenken (3 DOF) kann sich ein einzelner Stab zwischen den Gelenken frei drehen. Es können keine Torsionsmomente übertragen werden. Wenn nötig, muss dem entgegen gewirkt werden. Die Längenveränderung des Stabes schafft einen weiteren Freiheitsgrad, wonach dieses System mit insgesamt sieben Freiheitsgraden überbestimmt ist.

Durch die Verwendung von zwei Kardangelenken (2 DOF) muss gewährleistet werden, dass sich der Stab zwischen den beiden Gelenken um die eigene Achse drehen kann. Ansonsten kann es zu Torsion in den Verbindungsstreben kommen. Daher benötigt der Stab selbst zwei Freiheitsgrade, zum einen die Längenveränderung und zum anderen die axiale Drehbarkeit. Bei dieser Ausführung ergeben sich insgesamt sechs Freiheitsgrade. Wohlgedenkt, bei der Bewegungsumsetzung mittels Spindel kann dies zu einem ungewollten Weg führen.

Bei der Kombination von einem Kugelgelenk (3 DOF) und einem Kardangelenk (2 DOF) besteht kein zusätzlicher Mehraufwand. Durch den längenveränderlichen Stab ergeben sich sechs Freiheitsgrade.

2.2.5. Materialien

Aufgrund der Anforderungen an die Verstelleinheit war von Beginn an die Temperatur ein Thema. Daher wurden Materialien mit möglichst geringem Wärmeausdehnungskoeffizienten gesucht.

Die Auswahl hat sich auf drei Materialien, wie in Tabelle 2.2 ersichtlich, beschränkt. Für jedes Material gibt es eine Vielzahl an Variationen, daher sollen diese Werte lediglich einen Überblick verschaffen.

¹⁰ Vgl. Dürschmied (1999), Onlinequelle [01.07.2015].

TEMPERATURSTABILE WERKSTOFFE		Zerodur	Invar (STAHL)	CFK
Hersteller		Schott AG	Imphy Alloys	
Art		glaskeramischer Werkstoff, durch kontrollierte Volumenkristallisation hergestellt	Eisen Nickel Legierung (64% / 36%)	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (Kohlenstofffasern in Kunststoff eingebettet)
Werkstoffnummer		xxx	13.912	xxx
Info		Kann mit herkömmlichen Maschinen der Metallverarbeitung bearbeitet werden; extrem gute Homogenität	viele mögliche Legierungsarten; Bearbeitbarkeit ähnlich austenitischen Stahl (z.B. EN 1.4301 / AISI 304)	Unterschiedliches Werkstoffverhalten parallel bzw. normal; geringe Masse bei hoher Steifigkeit
Dichte	kg/m³	2.530	8.130	1.500
E-Modul (@20°C)	N/mm²	90.300	140.000	parallel 140.000 normal 12.000
Poissonzahl	v	0,24	0,29	0,26
Schubmodul	E/2(1+v)	36.410	54.300	parallel 55.555 normal 4.760
Wärmeausdehnung	10⁻⁶/K	0,007 bis 0,1000	0,55...1,2	0,2

*Tabelle 2.3: Temperaturstabile Werkstoffe
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an:
Schott AG (2015), Onlinequelle [03.08.2015]
Burde & Co (2015), Onlinequelle [03.08.2015]
Suter Kunststoffe AG (2015), Onlinequelle [03.08.2015].*

3. Lastenheft

3.1. Modifizierte Systemanforderungen

Mit den Erkenntnissen aus der Literatur wurde eine Einigung über Abänderung des Lastenheftes getroffen. Die wichtigsten Veränderungen betreffen die erforderlichen Verfahrswege und die gewünschten Steifigkeiten, welche in Tabelle 3.1 farblich hinterlegt sind. Zum Vergleich zu den ursprünglichen Werten siehe Tabelle 1.1.

Die Verfahrswege in Messrichtung [x] und Strichrichtung [y] werden von ± 3 Millimeter auf ± 2 Millimeter reduziert. Für den Moriè-Winkel (Gieren [θ_z]) wird der Wunsch auf Vergrößerung geäußert. Anstatt der ursprünglichen ± 60 mRad sollen nun, wenn möglich ± 90 mRad angestrebt werden.

Die translatorischen Steifigkeiten werden um die Hälfte von $4 \text{ N}/\mu\text{m}$ auf $2 \text{ N}/\mu\text{m}$ reduziert. Die Anforderungen an rotatorischen Steifigkeiten werden gestrichen, diese sollen lediglich so hoch wie möglich umgesetzt werden.

	Abtaststand [z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]	Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]
Erforderlicher Verfahrsweg	$\pm 3 \text{ mm}$	$\pm 2 \text{ mm}$	$\pm 2 \text{ mm}$	$\pm 60 (90) \text{ mRad}$	$\pm 60 \text{ mRad}$	$\pm 60 \text{ mRad}$
Kleinste Schrittweite	$\leq \pm 5 \mu\text{m}$	$\leq \pm 5 \mu\text{m}$	$\leq \pm 5 \mu\text{m}$	$\leq \pm 5 \mu\text{Rad}$	$\leq \pm 5 \mu\text{Rad}$	$\leq \pm 5 \mu\text{Rad}$
Anbaureproduzierbarkeit (Montage, danach Feinabgleich)	$\leq \pm 50 \mu\text{m}$	$\leq \pm 50 \mu\text{m}$	$\leq \pm 50 \mu\text{m}$	$\leq \pm 50 \mu\text{Rad}$	$\leq \pm 50 \mu\text{Rad}$	$\leq \pm 50 \mu\text{Rad}$
Absolute Verstellgenauigkeit	$\leq \pm 10 \mu\text{m}$	$\leq \pm 10 \mu\text{m}$	$\leq \pm 10 \mu\text{m}$	$\leq \pm 10 \mu\text{Rad}$	$\leq \pm 10 \mu\text{Rad}$	$\leq \pm 10 \mu\text{Rad}$
Wiederholgenauigkeit	$\leq \pm 3 \mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \mu\text{Rad}$
Umkehrspiel	$\leq \pm 3 \mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \mu\text{Rad}$
Max. Geschwindigkeit	$> 0,5 \text{ mm/s}$	$> 0,5 \text{ mm/s}$	$> 0,5 \text{ mm/s}$	$> 0,5 \text{ mRad/s}$	$> 0,5 \text{ mRad/s}$	$> 0,5 \text{ mRad/s}$
Steifigkeit	$2 \text{ N}/\mu\text{m}$	$2 \text{ N}/\mu\text{m}$	$2 \text{ N}/\mu\text{m}$			

Tabelle 3.1: Modifiziertes Lastenheft (vgl. Tabelle 1.1),
Quelle: Heidenhain/Pucher/Urban (2015), S. 4.

Außerdem werden der zur Verfügung stehende Bauraum und die Position der Anbauflächen definiert und als CAD-Dateien mitgeschickt, ein Bild dazu zeigt die nachfolgende Abbildung 3.1. Die braune Kreisscheibe stellt die Ursprungslage der beweglichen Plattform dar, grüne und gelbe Elemente die Anbauflächen. Zusammen mit dem transparent dargestellten Bauraum sind nun die geometrischen Voraussetzungen vollständig definiert.

3.2. Typenfestlegung

Die gesammelten Informationen aus der Literatur sprechen für eine Umsetzung eines Hexapoden. Aus den ersten Überlegungen wird der Typ 3-3 (vgl. Abbildung 2.5) bevorzugt.

Des Weiteren ist es erwünscht, auch unkonventionelle Lösungen zu untersuchen. Daher sollen nicht nur elektrische Lösungen untersucht werden, sondern auch alternative Konzepte.

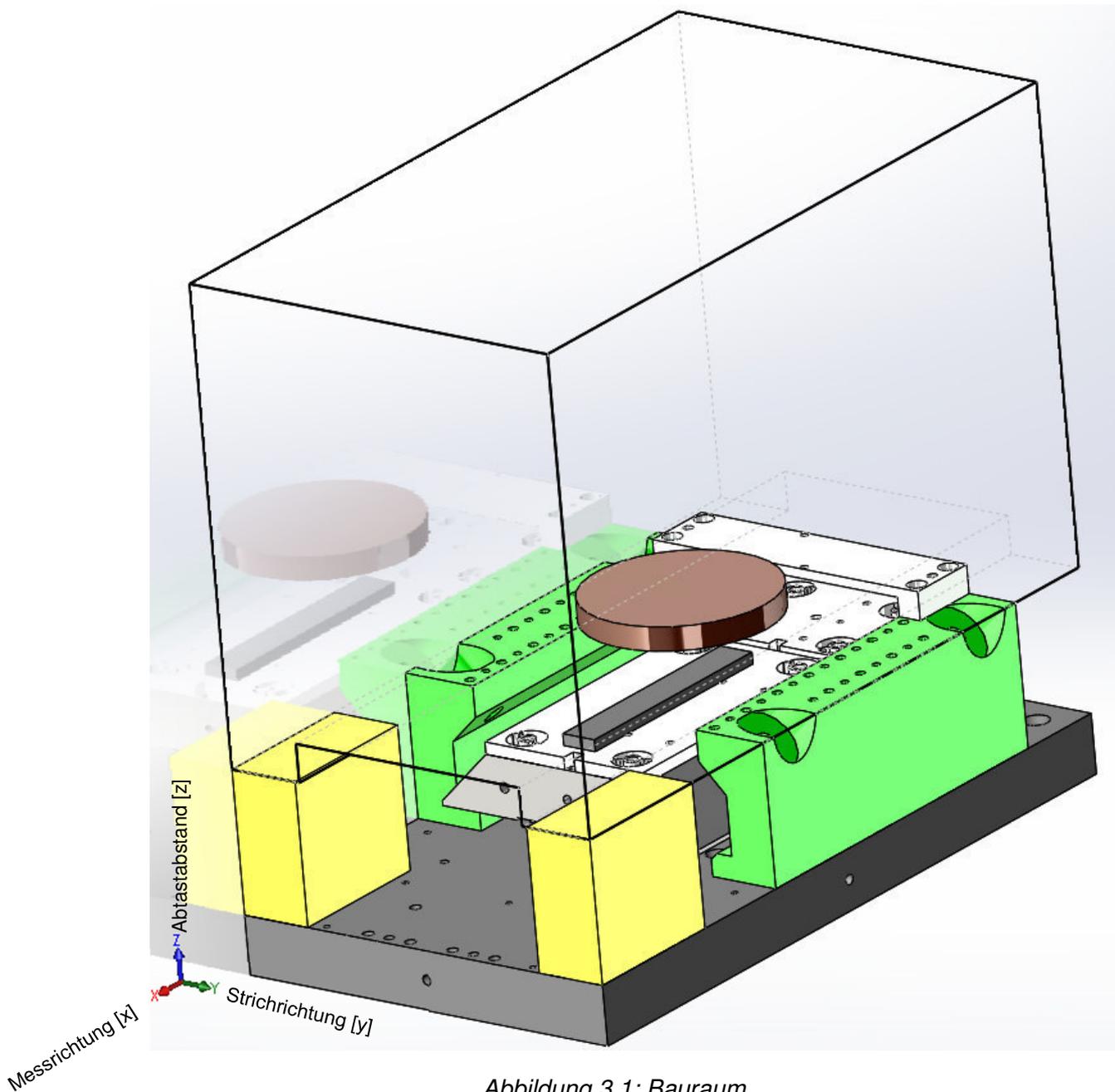


Abbildung 3.1: Bauraum
Quelle: Eigene Darstellung.

3.3. Aufgabengebiete

3.3.1. Kinematikstudie

Eine Bewegung eines Hexapoden liefert nichtlineare Charakteristiken zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße. Um die Anforderungen an den fertigen Hexapoden umzurechnen in die Anforderungen an die einzelnen Verbindungsstreben, soll in weiterer Folge eine Sensitivitätsuntersuchung durchgeführt werden. So sollen die Anforderungen für jeden einzelnen Stab ermittelt werden, welche lauten:

- maximale Stablängenänderung
- minimale Stablängenänderung
- Verdrehwinkel der Gelenke in den Ankerpunkten.

3.3.2. Steifigkeitsanalyse

Da sehr hohe Anforderungen an die Steifigkeit vorgegeben sind, ist diese von Beginn an zu berücksichtigen. Daher müssen realisierbare Steifigkeiten untersucht werden, außerdem soll eine optimale geometrische Anordnung der einzelnen Stäbe gefunden werden, bei der möglichst alle translatorischen und rotatorischen Steifigkeiten die Anforderungen erfüllen.

3.3.3. Fluidischer Aktor mit Formstrukturen

Aus der Literaturrecherche ist ersichtlich, dass elektrische Lösungen Stand der Technik sind. Zur Betrachtung unkonventioneller Lösungsansätze wird auch die Möglichkeit eines fluidischen Aktors in Form eines Metallfederbalges in Betracht gezogen. Hierfür soll das elastische Materialverhalten zur Erzeugung von Bewegungen ausgenutzt werden, um hohe Steifigkeiten zu gewährleisten. Außerdem sollen elastisch verformbare Strukturen (Formstrukturen) untersucht werden, welche die Festigkeit noch weiter erhöhen. In Abbildung 3.2 sind vier Konzepte dargestellt, wie diese Prinzipien aussehen können.

In „V01“ wird in einem Metallfederbalg ein Innendruck erzeugt, welcher eine Längenänderung hervorruft. Dies kann durch Hydraulik erfolgen und führt zu keinem Stick-Slip-Effekt wie bei Teleskopzylindern. Der eigentliche Zylinder mit vorzugsweise berührungsloser Dichtung kann sich auch außerhalb der Klimakammer befinden. In „V02“ und „V03“ wird der Metallfederbalg gedreht eingebaut und der Weg durch eine Formstruktur in eine Axialbewegung umgewandelt. Anhand dieses Ansatzes wird versucht, höhere Steifigkeiten zu erreichen. Die Idee hinter „V04“ ist die Verwendung einer Formstruktur aus Federstahl, um die Steifigkeit gegenüber Konzept „V01“ zu erhöhen.

Im Kapitel 6 werden diese Konzepte auf ihre Eignung untersucht, wobei zuerst auf die Formstrukturen und im Anschluss daran auf den hydraulisch betriebenen Metallfederbalg eingegangen wird.

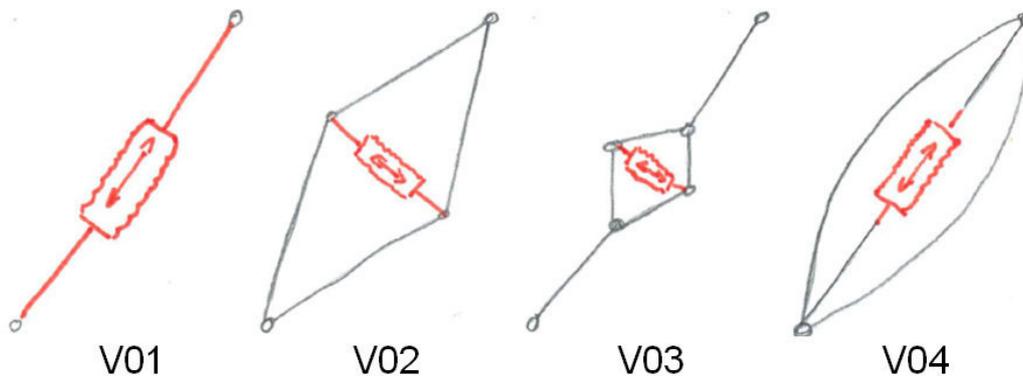


Abbildung 3.2: Aktorkonzepte:

V01: fluidischer Aktor; V02: fluidischer Aktor mit Festkörpergelenk- Formstruktur (groß); V03: fluidischer Aktor mit Festkörpergelenk- Formstruktur (klein); V04: fluidischer Aktor mit gebogener Festkörper- Formstruktur

Quelle: Heidenhain/Pucher/Urban (2015), S. 4.

4. Kinematikstudie

Ein Hexapod besteht aus sechs identischen längenveränderlichen Stäben welche an der gleichen Plattform angreifen. Für jede gewünschte Plattformbewegung sind mehrere Stablängen zu verändern, allerdings besteht kein direkter Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße. Hier herrschen stark nichtlineare Charakteristiken.

Eine Kinematikstudie ist notwendig um die notwendige Längenänderung der Stäbe zu ermitteln. Weiters soll ermittelt werden, wie groß die kleinste Längenänderung der sechs Stäbe sein darf, um die Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen.

4.1. Allgemeiner Aufbau

Ein Hexapod ist eine Bauform der parallelen Kinematik bestehend aus sechs parallel angeordneten Linearachsen, welche die Verbindung zwischen fester Basis und beweglicher Plattform darstellen. Die parallele Anordnung bildet eine geschlossene kinematische Kette. Zum Verständnis zeigt Abbildung 4.1 den Unterschied zwischen offener, teilweise geschlossener und geschlossener kinematische Kette.

	offene	teilweise geschlossene	geschlossene
Kinematische Kette			
Beispiel			

Abbildung 4.1: Kinematische Kette,
Quelle: Hentschl (2012), Onlinequelle [03.08.2015].

In Abbildung 4.2 ist der schematische Aufbau eines Hexapoden gegeben. An der „Base-Plattform“ $\{ B \}$ befinden sich sechs ortsfeste Ankerpunkte ($B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$). Diese sechs Punkte sind jeweils mit längenveränderlichen Stäben ($l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$) zu den sechs Ankerpunkten ($P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$) der „Payload-Plattform“ $\{ P \}$ verbunden.

Das Koordinatensystem $\{ P \}$ kann mittels sechs Lageparametern ($t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma$) verändert werden, wodurch auch die Ankerpunkte (P_1 bis P_6) ihre Lage verändern.

Es besteht ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen den sechs Stablängen (l_1 , bis l_6) und den sechs Lageparametern ($t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma$). Dieser Zusammenhang wurde mithilfe MATLAB beschrieben.

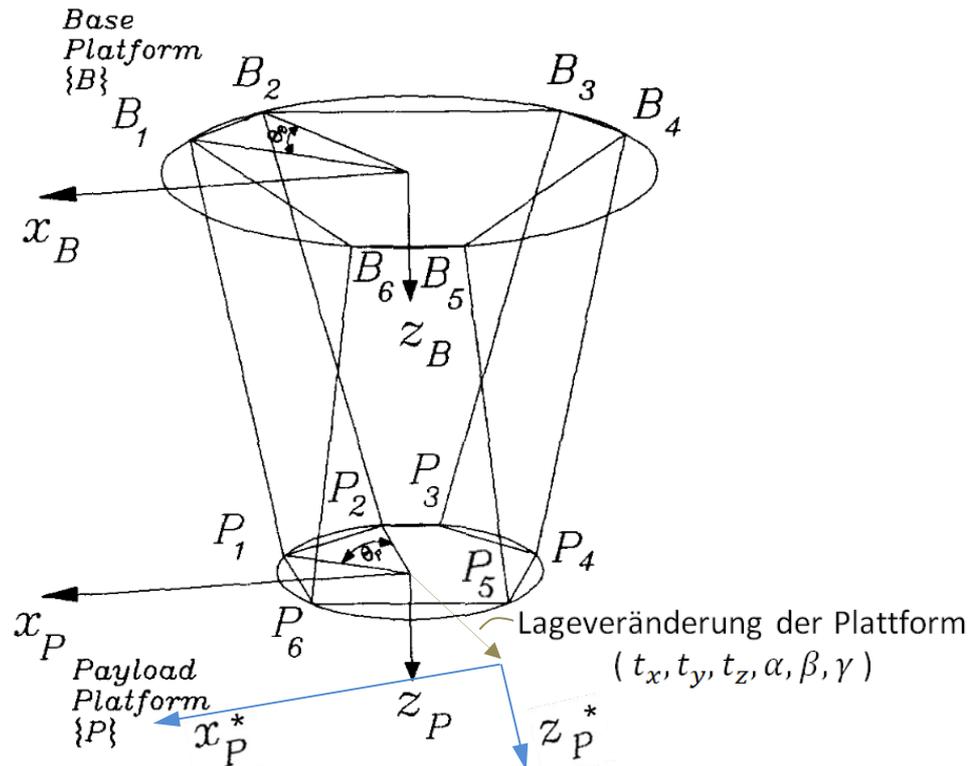


Abbildung 4.2: schematischer Hexapod,
Quelle: Nguyen u. a. (1991), S. 194 (modifiziert).

4.2. Rückwärtskinematik

Die Rückwärtskinematik dient zur Berechnung der Stablängen aus einer vorgegebener Lage (Lageparameter $t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma$ sind bekannt). Im Gegensatz zur seriellen Kinematik ist diese vergleichsweise einfach zu berechnen. Dieser Abschnitt beschreibt den mathematischen Hintergrund der Berechnung.¹¹

Die Koordinaten der Payload-Punkte (${}^B P_1$ bis ${}^B P_6$) für den unbewegten Hexapoden werden als bekannt angenommen. Wird nun die Plattform auf Grundlage von den sechs Lageparametern bewegt, sollen nun die veränderten Koordinaten (${}^B P_1^*$ bis ${}^B P_6^*$) der bewegten Plattform bestimmt werden.

Im ersten Schritt wird die Rotation um die drei Winkel α, β und γ (Drehung um die x, y und z-Achse) ausgeführt. Die gedrehten „Payload“ Ankerpunkte (${}^B P_1^{\text{rotiert}}$ bis ${}^B P_6^{\text{rotiert}}$) werden durch Gleichung (4.1) beschrieben.

$${}^B P_i^{\text{rotiert}} = {}_B R_{\alpha\beta\gamma} * {}^B P_i \quad \text{mit: } i = 1 \div 6 \quad (4.1)$$

Die gesamte Rotationsmatrix (4.2) setzt sich aus den Teilrotationen um die einzelnen Achsen (4.3) (4.4) (4.5) zusammen (4.6).

$${}_B R_{\alpha\beta\gamma} = R_\alpha * R_\beta * R_\gamma \quad (4.2)$$

$$R_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

¹¹ Vgl. Clinton/Zhang/Wavering (1997), S. 3f.

$$\mathbf{R}_\beta = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\mathbf{R}_\gamma = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{R}_{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) \cos(\gamma) & -\cos(\alpha) \sin(\gamma) + \sin(\alpha) \sin(\beta) \cos(\gamma) & \sin(\alpha) \sin(\gamma) + \cos(\alpha) \sin(\beta) \cos(\gamma) \\ \cos(\beta) \sin(\gamma) & \cos(\alpha) \cos(\gamma) + \sin(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) & -\sin(\alpha) \cos(\gamma) + \cos(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) \\ -\sin(\beta) & \sin(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Im nächsten Schritt werden diese gedrehten Ankerpunkte (${}^B\mathbf{P}_1^{\text{rotiert}}$ bis ${}^B\mathbf{P}_6^{\text{rotiert}}$) in Gleichung (4.7) der Translation der Lageparameter (t_x, t_y, t_z) unterzogen. Hierfür werden die drei Translationen zu einem Vektor zusammengefasst: ${}^B\mathbf{t}_{xyz} = [t_x \ t_y \ t_z]^T$.

$${}^B\mathbf{P}_i^* = {}^B\mathbf{P}_i^{\text{rotiert}} + {}^B\mathbf{t}_{xyz} \quad \text{mit: } i = 1 \div 6 \quad (4.7)$$

Zusammengefasst ergibt dies die Gleichung (4.8).

$${}^B\mathbf{P}_i^* = {}^B\mathbf{R}_{\alpha\beta\gamma} * {}^B\mathbf{P}_i + {}^B\mathbf{t}_{xyz} \quad \text{mit: } i = 1 \div 6 \quad (4.8)$$

Die sechs Vektoren zwischen den „Base Platform“ und „Payload Platform“- Ankerpunkten (${}^B\mathbf{B}_i$ und ${}^B\mathbf{P}_i$ mit: $i = 1 \div 6$) repräsentieren die Verbindungsstreben des ursprünglichen Hexapoden ${}^B\mathbf{S}_i$ (4.9). Für die Ermittlung der sechs Verbindungsstreben des bewegten Hexapoden ${}^B\mathbf{S}_i^*$ verwendet man die bewegte „Payload Platform“ (4.10).

$${}^B\mathbf{S}_i = {}^B\mathbf{P}_i - {}^B\mathbf{B}_i \quad \text{mit: } i = 1 \div 6 \quad (4.9)$$

$${}^B\mathbf{S}_i^* = {}^B\mathbf{P}_i^* - {}^B\mathbf{B}_i \quad \text{mit: } i = 1 \div 6 \quad (4.10)$$

Der Betrag dieser Vektoren stellt die Länge dar (4.11 und 4.12).

$$l_i = |\mathbf{S}_i| \quad \text{mit: } i = 1 \div 6 \quad (4.11)$$

$$l_i^* = |\mathbf{S}_i^*| \quad \text{mit: } i = 1 \div 6 \quad (4.12)$$

4.3. Vorwärtskinematik

Die Vorwärtskinematik beschäftigt sich mit der Berechnung der Endlage einer Parallelkinematik durch die Vorgabe von Stablängen (4.13).¹²

Die Vorwärtskinematik hat das Ziel der Berechnung der Position t_x, t_y und t_z sowie der Orientierung α, β und γ . Da es hierbei zu stark nichtlinearen Gleichungen (4.14) kommt, ist die Verwendung von iterativen numerischen Methoden unumgänglich.

$$l_i = \sqrt{l_{x_i}^2 + l_{y_i}^2 + l_{z_i}^2} \quad \text{mit: } i = 1 \div 6 \quad (4.13)$$

$$f(t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma, l_i) = |{}^B\mathbf{P}_i^* - {}^B\mathbf{B}_i| - l_i^* = 0 \quad \text{mit: } i = 1 \div 6 \quad (4.14)$$

In MATLAB wurde der Levenberg-Marquardt-Algorithmus zum Lösen des nichtlinearen Gleichungssystems verwendet.

¹² Vgl. Nguyen u. a. (1991), S. 196ff

4.4. MATLAB-Kinematik-Tool

Das Ziel ist die Ermittlung der notwendigen Stablängenänderung, der maximal zulässigen kleinsten Schrittweite eines Stabes und die resultierenden Winkel bei der Bewegung, um alle an das Projekt gestellten Anforderungen zu erfüllen.

Das erstellte Programm wurde weit umfangreicher als diese ursprünglichen Aufgaben. Es liefert zusätzlich Diagramme für diese Parameter als Funktion der Bauhöhe und erlaubt eine schnelle Abänderung von neuen Geometrien. Außerdem wurde dieses Programm um weitere mögliche Kinematiken erweitert, welche im Laufe des Projektfortschrittes in Betracht gezogen wurden. Diese werden in Abschnitt 5 (Steifigkeitsanalyse) genauer erläutert.

Die MATLAB-Software bildet einen ausschlaggebenden Teil des Gesamtprojektes und wurde parallel zur Steifigkeitsanalyse entwickelt, wodurch eine einheitliche Vorgangsweise und kohärente Ergebnisse erzielt wurden.

Abbildung 4.3 zeigt das erstellte Interface der MATLAB-Software. Hierbei wird auf das Institut für Fertigungstechnik an der TU-Graz verwiesen.

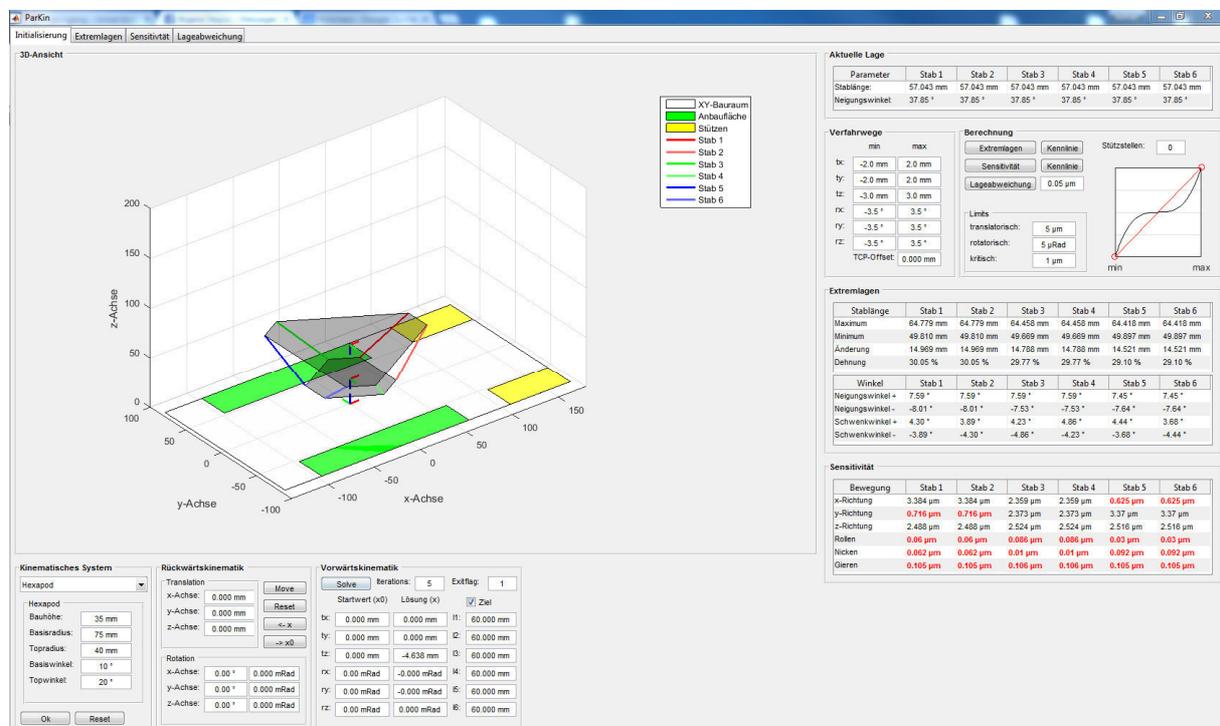


Abbildung 4.3: Grafisches Interface des MATLAB Programmes, Quelle: Scharf (2015), Präsentation für Heidenhain.

5. Steifigkeitsanalyse

Ein wichtiger Aspekt im Lastenheft stellt die geforderte Steifigkeit dar, welche aufgrund möglicherweise auftretender Schwingungen erwünscht ist. Daher wurde schon frühzeitig mit einer Steifigkeitsabschätzung begonnen.

Da bereits eine Vorentscheidung für einen Hexapoden gefallen ist, soll nun herausgefunden werden, welche Steifigkeiten realisierbar sind. Vergleichswerte für bestehende Systeme sind aus der Literatur bekannt und befinden sich in den Bewertungsbögen sowie im Datenblatt des Hexapoden H-811 von *Physik Instrumente*, zu finden im Anhang B. Außerdem soll die Geometrie eines Hexapoden so optimiert werden, dass für alle Orientierungen möglichst hohe und gleichmäßige Steifigkeitswerte erreicht werden können. Im letzten Schritt soll ermittelt werden, wie sich die Gesamtsteifigkeit im Vergleich zu der Einzelsteifigkeit eines einzelnen Stabes verhält. Dadurch werden die Steifigkeitsanforderungen für den Antrieb und die Gelenke ermittelt.

5.1. Steifigkeitsberechnung mittels Finite Elemente Methode

Die Steifigkeit beschreibt den Widerstand eines Körpers gegen elastische Verformung durch eine Kraft oder ein Drehmoment und kann durch das Hookesche Gesetz (5.1) (5.2) sofort beschrieben werden:

$$\varepsilon * E = \sigma = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

$$k = \frac{EA}{l} = \frac{F}{\Delta l} \quad (5.2)$$

Für die Ermittlung der Steifigkeit in diesem Projekt wird ein Modell in SolidWorks erstellt. Danach wird es einer FEM (Finite Elemente Methode) Berechnung unterzogen. Als Tool für die FEM-Berechnung wird die Software ANSYS verwendet. In Anschluss kann dann mittels der aufgebrachten Kraft und der resultierenden Deformation die Steifigkeit ermittelt werden. Das Ergebnis wird automatisch in ein Excel-File ausgegeben.

5.1.1. Modellieren mit SolidWorks

Am Beginn der Untersuchung wird ein sehr einfaches Modell eines Hexapoden in SolidWorks erstellt. Hierbei besteht der Hexapod lediglich aus einem einzigen Bauteil, ohne Gelenke oder längenveränderliche Stäbe. Verbesserung erlangt das Dummy-Modell (Abbildung 5.1 links) mit Projektfortschritt durch den Einbau von Kugelgelenken und geeigneterer Materialwahl (Abbildung 5.1 rechts).

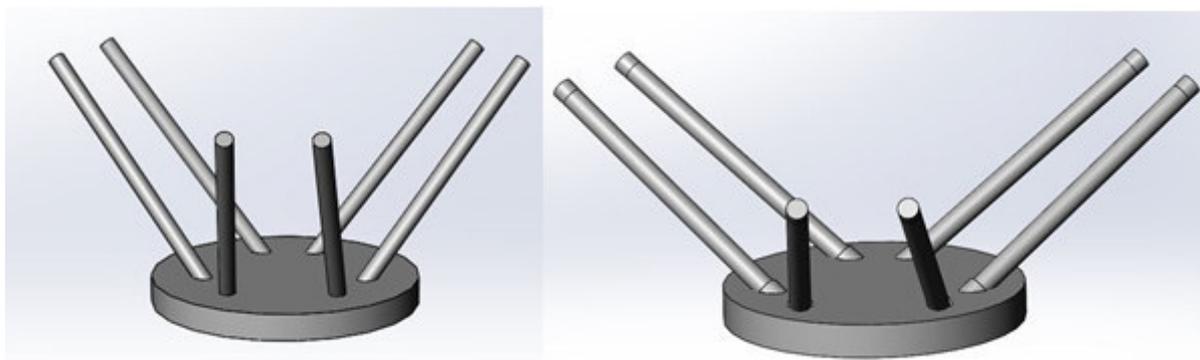


Abbildung 5.1: Hexapod Dummy ohne (links) und mit Kugelgelenken (rechts),
Quelle: Eigene Darstellung.

Der Konstruktion in SolidWorks ist eine Parametertabelle hinterlegt, welche eine schnelle Änderung des Modells erlaubt. Dadurch können in der Tabelle die geometrischen Größen des Hexapoden verändert werden und SolidWorks erstellt automatisch die neue Geometrie. Die gewählten Parameter sind die gleichen wie im MATLAB-Programm, da diese beiden wichtigen Projektschritte aufeinander abgestimmt werden müssen und so auf Konsistenz geachtet wurde.

5.1.2. Berechnung mit ANSYS und Auswertung in Excel

Mithilfe von SolidWorks wird die Geometrie erstellt und anschließend in ANSYS geladen, um eine Finite-Elemente Berechnung durchzuführen. Da sechs verschiedene Steifigkeiten zu ermitteln sind, müssen sechs eigene Analysen durchgeführt werden. Für jede Translation (Abtastabstand, Strichrichtung, Messrichtung) wird eine Kraft auf die Plattform aufgebracht, für jede mögliche Rotation (Gieren, Rollen, Nicken) ein Moment. Zugehörige Deformationen werden gespeichert und in ein vorgefertigtes Excel File übertragen, dieses ist in Tabelle 5.1 veranschaulicht. Dadurch ist es möglich, die Steifigkeiten direkt abzulesen.

	Abtastabstand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]	Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]
Belastung	N	N	N	Nm	Nm	Nm
	-10	-10	-10	0,02	0,02	0,02
aus Ansys	μm	μm	μm	°	°	°
	0,115009923	0,072022846	0,072021923	1,34651E-05	9,00622E-05	9,00497E-05
Steifigkeit	N/ μm	N/ μm	N/ μm	Nm/mRad	Nm/mRad	Nm/mRad
	-86,9	-138,8	-138,8	85,1	12,7	12,7

Tabelle 5.1 Oberfläche des Excel Files der Steifigkeitsanalyse,
Quelle: Eigene Darstellung.

5.1.3. Zusammenspiel der Programme

Die Kombination aus den drei Programmen SolidWorks, ANSYS und Excel wird quasi halbautomatisch ausgelegt. Im ersten Schritt wird die Geometrie durch die Parameter in SolidWorks festgelegt. Anschließend muss diese Geometrie manuell in ANSYS geladen werden, wobei alle Berechnungs-Bedingungen (Materialien, Kräfte, Momente, Lagerungen) automatisch übernommen werden. Dadurch muss nach dem Laden nur noch die Berechnung gestartet und zum Abschluss das Excel File geöffnet werden. Schematisch ist dies in Abbildung 5.2 dargestellt.

Damit ist es möglich, mit nur wenig Aufwand für eine Geometrie sechs Steifigkeiten zu ermitteln und danach bereits eine abgeänderte Geometrie zu analysieren. Die Analyse vieler verschiedener Geometrien wird dadurch erleichtert.



Gleichungen, Globale Variablen und Bemaßungen

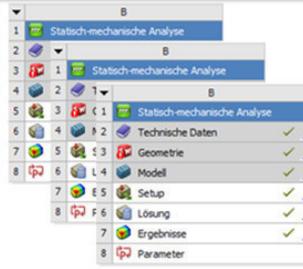
Name	Wert / Gleichung
Globale Variablen	
"Basishöhe"	= 60mm
"Basisradius"	= 75mm
"Topradius"	= 25mm
"Stabdurchmesser"	= 5mm
"Basiswinkel"	= 20
"Topwinkel"	= 10
Globale Variable hinzufügen	

Konstruktionswerte
mit MATLAB identisch





3 Berechnungen
für die **Translation**



3 Berechnungen
für die **Rotation**



	Abtastastand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]	Gieren [θz]	Rollen [θx]	Nicken [θy]
Belastung	N	N	N	Nm	Nm	Nm
	-10	-10	-10	0,02	0,02	0,02
aus Ansys	µm	µm	µm	*	*	*
	0,115009923	0,072022846	0,072021923	1,34651E-05	9,00622E-05	9,00497E-05
Steifigkeit	N/µm	N/µm	N/µm	Nm/mRad	Nm/mRad	Nm/mRad
	86,9	138,8	138,8	85,1	12,7	12,7

Abbildung 5.2: Zusammenspiel der Programme,
Quelle: Eigene Darstellung.

5.2. Steifigkeit eines Hexapoden bei verschiedenen Ausführungen

Wie bereits in Abbildung 2.5 diskutiert, gibt es verschiedene Ausführungen eines Hexapoden. Daher wird zu Beginn der Steifigkeitsanalyse das Verhalten dieser verschiedenen Konfigurationen untersucht. Dazu bleiben die Größenparameter des Dummy-Hexapoden unverändert, während die Positionen der Ankerpunkte variiert werden. Es wird auch bereits von Beginn an darauf geachtet, nur den zulässigen Bauraum auszunützen.

Die typischen Varianten 3-3, 6-6, 3-6 und 6-3 lassen unmittelbar auf die Anzahl der Ankerpunkte schließen. Des Weiteren werden noch eigene Konfigurationen überprüft, bei denen auf den nötigen Platzbedarf für Gelenke in der Variante 3-3 Rücksicht genommen wird. In Abbildung 5.3 sind die getesteten Modelle dargestellt.

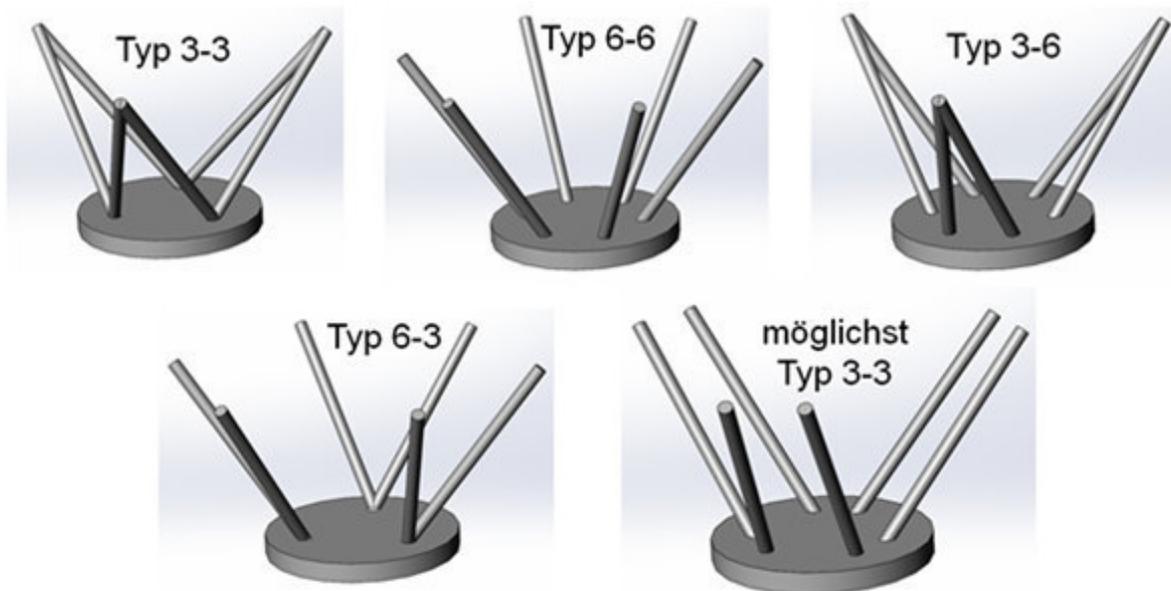


Abbildung 5.3: Konfigurationen eines Hexapoden,
Quelle: Eigene Darstellung.

Die berechneten Vergleichssteifigkeiten mit den Dummy-Hexapoden sind in Tabelle 5.2 dargestellt. In der Tabelle werden die Werte farblich aufbereitet, sodass hohe Steifigkeiten grün, niedrige Steifigkeiten rot dargestellt werden. Dies geschieht jeweils separat für eine Messorientierung (Abtastabstand, Messrichtung, Strichrichtung, Gieren, Nicken oder Rollen). Es ist zu beachten, dass durch die Dummy-Bauweise aus einem einzigen Körper sehr hohe Werte erzielt werden, daher können diese Werte nicht als realistisch angesehen werden und dienen nur dem internen Vergleich.

Einige Informationen sind sofort aus der Tabelle ersichtlich. Zum einen besteht für jede Konfiguration die höchste Steifigkeit stets in Abtastrichtung $[z]$. Außerdem sind in translatorischer Richtung die Messrichtung $[x]$ und die Strichrichtung $[y]$ beinahe identisch, selbiges gilt für die rotatorischen Werte von Rollen $[\theta_x]$ und Nicken $[\theta_y]$.

Es kann jedoch darauf geschlossen werden, dass die Konfiguration 3-3 mit Ausnahme der Abtastrichtung $[z]$ stets die höchsten Werte aufweist. Wobei selbst der niedrigste Steifigkeitswert in $[z]$ weit höher ist als die Steifigkeiten in jede andere Richtung $[x]$ $[y]$ $[\theta_x]$ $[\theta_y]$ $[\theta_z]$. Die konträre Konfiguration 6-6 wiederum verhält sich genau entgegengesetzt. Hier wird der höchste Steifigkeitswert in $[z]$ erreicht, und die niedrigsten Werte in jede andere Orientierung. Zwischen diesen beiden Extremkonstruktionen befinden sich alle anderen Typen (3-6, 6-3 und Zwischenkonstruktionen) von Hexapoden. Die errechneten Steifigkeitswerte liegen zwischen den Werten dieser Extremkonstruktionen.

Es soll möglichst der Typ 3-3 angestrebt werden, daher werden zwei Modelle erstellt, welche unterschiedliche Gelenkgrößen berücksichtigen. Die Werte befinden sich auch hier im erwarteten Zwischenbereich. Je kleiner die Gelenkgröße gewählt wird, desto besser nähert sich das Ergebnis der Variante 3-3 an. Dies erkennt man ebenfalls in der Tabelle, anhand der Spalten Typ 3-3 mit 20 Millimeter bzw. 10 Millimeter Gelenksabstand.

Im modifizierten Lastenheft ist eine Mindeststeifigkeit von $2 \text{ N}/\mu\text{m}$ für alle translatorischen Richtungen gefordert. Um diese Forderungen zu erfüllen, wird auf folgendes geschlossen: wenn sich bei realisierten Modellen alle Steifigkeiten proportional reduzieren, wird der Typ 3-3 die Anforderungen am ehesten erfüllen. Folglich ist dessen Umsetzung anzustreben.

Dieses Ziel wird von hier an für jede weitere Berechnung umgesetzt, wobei ein Platzbedarf von 15 Millimeter für Gelenke berücksichtigt wird.

System	Abtaststand [Z]	Messrichtung [X]	Strichrichtung [Y]	Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]
	N/ μ m	N/ μ m	N/ μ m	Nm/mRad	Nm/mRad	Nm/mRad
Typ 3-3	117,5	51,4	51,4	73,0	36,9	36,8
Typ 6-6	168,4	5,7	5,7	2,1	4,5	4,5
Typ 3-6	145,8	32,7	32,7	33,9	26,9	26,9
Typ 6-3	146,3	35,2	35,2	31,5	25,3	25,4
Typ 3-3 (20 mm Gelenk)	151,7	33,4	33,4	29,9	23,6	23,6
Typ 3-3 (10 mm Gelenk)	143,1	43,3	43,3	41,9	28,9	28,9

Tabelle 5.2: Steifigkeit eines Hexapoden bei unterschiedlicher Konfiguration, Quelle: Eigene Darstellung.

5.3. Hexapodmodell aus einem Bauteil ohne Kontaktbedingungen

Die Größe des Hexapoden ist weitgehend bestimmt, da sowohl der verfügbare Bauraum als auch die Größe der Anbauplattform von *Heidenhain* vorgegeben sind. Lediglich die Bauhöhe bietet Gestaltungsfreiheit. Daher wird im nächsten Schritt die Bauhöhe des Hexapoden von 10 Millimeter bis 100 Millimeter variiert und die Steifigkeitswerte berechnet.

Verwendet wird weiterhin der Dummy-Hexapod ohne simulierte Gelenke, somit ein solider Hexapod. Die Ankerpunkte sind so positioniert, dass ein Gelenkdurchmesser von 15 Millimeter zur Verfügung steht, aber der Hexapod möglichst dem Typ 3-3 ähnelt. In Abbildung 5.4 ist der Hexapod in den vorhandenen Bauraum eingebildet.

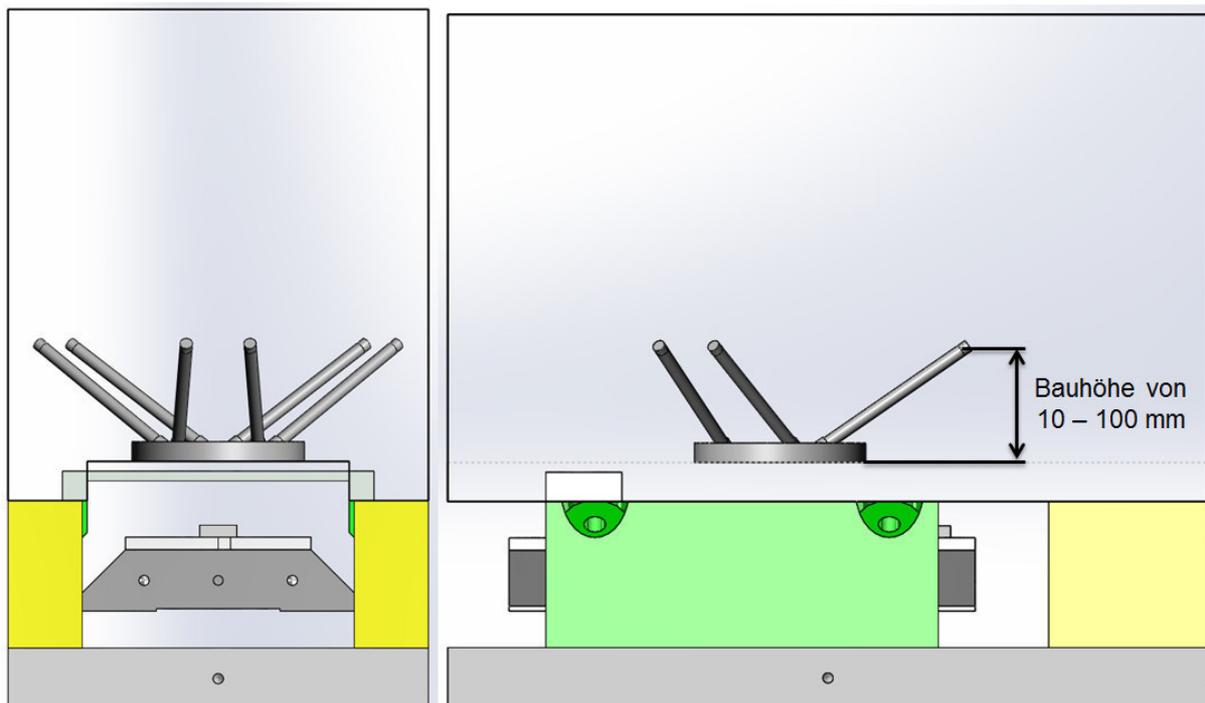


Abbildung 5.4: Bauraum: veränderliche Höhe des Hexapoden, Quelle: Eigene Darstellung.

Die berechneten Steifigkeiten sind in einem Diagramm (Abbildung 5.5) dargestellt. Aufgrund der Ähnlichkeit der Steifigkeitswerte in Messrichtung [x] und Strichrichtung [y] sowie der rotatorischen Werte Rollen [θ_x] und Nicken [θ_y], wird jeweils nur einer dieser Graphen dargestellt.

Der relevante Bereich des Diagramms beschränkt sich auf die Bauhöhe von etwa 20 Millimeter bis etwa 60 Millimeter. Darunter ist der Hexapod zu flach um noch realisiert werden zu können, darüber ist dieser zu hoch um effizient Bewegungen auszuführen.

Die Steifigkeitslinie für Nicken $[\theta_y]$, welche auch Rollen $[\theta_x]$ repräsentiert, ist beinahe konstant und wird daher für weitere Überlegungen nicht berücksichtigt. Da die Steifigkeit für Gieren $[\theta_z]$ mit zunehmender Bauhöhe sinkt, ist es hierfür sinnvoll den Hexapod möglichst flach zu bauen. Da für die rotatorischen Steifigkeiten im modifizierten Lastenheft keine Limits gesetzt werden, werden die translatorischen Steifigkeiten priorisiert betrachtet.

Mit steigender Bauhöhe steigt die Steifigkeit in $[z]$ -Richtung, allerdings sinkt diese für die Strichrichtung $[y]$, welche auch die Messrichtung $[y]$ repräsentiert. Im modifizierten Lastenheft sind für die drei translatorischen Steifigkeiten die gleichen Limits ($2 \text{ N}/\mu\text{m}$) vorgegeben. Aus diesem Grund ist im Diagramm auch der Punkt von gleicher translatorischer Steifigkeit von Interesse. Dies ist der Schnittpunkt der Linien Abtastabstand $[z]$ und Strichrichtung $[y]$. Daher fordert eine optimale Geometrie bezüglich der Steifigkeit eine Bauhöhe von etwa 38 Millimeter.

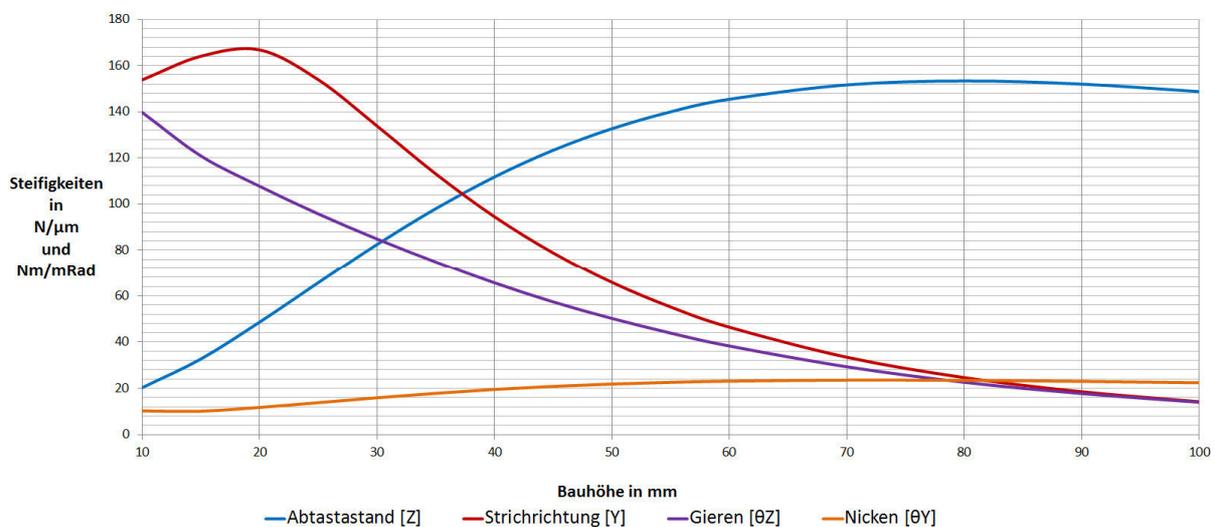


Abbildung 5.5: Steifigkeitsverlauf: Hexapodmodell aus einem Bauteil ohne Kontaktbedingungen, Quelle: Eigene Darstellung.

5.4. Hexapodmodell mit reibungsfreien Kugelgelenken

Im nächsten Schritt wird das Dummy-Modell des Hexapoden um insgesamt zwölf Kugelgelenke erweitert. Daher ist jeder Stab nun in zwei Kugelpfannen gelagert. Mit diesem neuen Modell wird wiederum die Bauhöhe variiert und die Steifigkeiten in ein Diagramm (Abbildung 5.6) übertragen. Die Resultate fallen ähnlich aus.

Die größten Unterschiede herrschen im Bereich von 10 bis 20 Millimeter. Hierbei ist die Geometrie allerdings schon so flach, dass eine Konstruktion wegen Platzmangels unrealistisch erscheint. Im relevanten Bereich von etwa 20 bis etwa 60 Millimeter sind die Werte leicht unter den Werten des vorherigen Versuchs, jedoch zeigt jeder Graph die gleichen Tendenzen. Hier ist der Schnittpunkt der Graphen für Translation ebenso bei etwa 38 Millimeter.

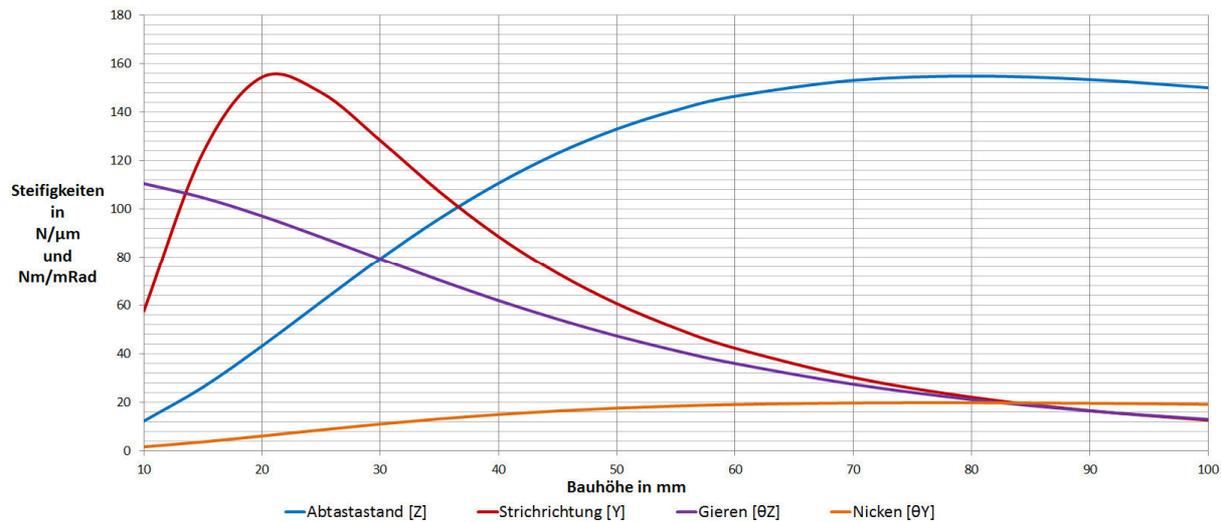


Abbildung 5.6: Steifigkeitsverlauf: Hexapod mit reibungsfreien Kugelgelenken, Quelle: Eigene Darstellung.

5.5. Hexapod mit reibungsfreien Kugelgelenken mit starr ausgeführter Plattform und Gelenkpfannen

Um das Modell noch einen Schritt weiter zu verbessern, wird die Plattform als Starrkörper deklariert, wodurch nur noch die Stäbe elastisches Material darstellen und die Gesamtsteifigkeit beeinflussen. Die Kugelgelenke werden belassen und die Variation der Bauhöhe erneut durchgeführt. Das neu erstellte Diagramm ist in Abbildung 5.7 ersichtlich. Es zeigt sich wieder ein ähnlicher Kurvenverlauf wie in den vorherigen Diagrammen.

Des Weiteren sind in diesem Diagramm noch einige Informationen hinzugefügt worden. Zum einen die Einzelsteifigkeit eines einzelnen Stabes, zum anderen der Winkel der Stäbe bezüglich der Grundfläche.

Der Schnittpunkt der Steifigkeitswerte in den drei Translationsrichtungen liegt weiterhin bei 38 Millimeter. Daraus resultiert ein Winkel der Stäbe von 33,5 Grad zur Grundfläche.

Zusammengefasst ist die Steifigkeit somit nur von den Stäben und den Gelenken abhängig, da

- nur die Stäbe elastisches Material darstellen
- die Plattform sowie die Kugelpfannen der Kugelgelenke ideal starr sind und
- die Kugelgelenke als ideal reibungsfrei ausgelegt werden.

Somit sind alle berechneten Steifigkeiten nur von den Stäben abhängig, welche nur auf Zug oder Druck beansprucht werden können. Zudem werden bei einem Hexapoden üblicherweise alle sechs Verbindungsstreben identisch ausgeführt.

Aufgrund dieses Modelles sind die berechneten Steifigkeiten alleinig von den Einzelsteifigkeiten der Stäbe abhängig. Die Einzelsteifigkeit eines Stabes ist auch in Abbildung 5.7 dargestellt, wodurch die Beziehung Einzel- zu Gesamtsteifigkeit erkannt wird. Dies erlaubt des Weiteren die Rückrechnung, wie steif ein einzelner Stab sein muss, um die gewünschten Gesamtsteifigkeiten zu erfüllen.

Die berechnete Steifigkeit von 110 N/μm zeigt den Schnittpunkt der drei translatorischen Steifigkeiten, wobei im modifizierten Lastenheft das Ziel von 2 N/μm vorgegeben ist. Somit sind diese Werte um den Faktor 55 verschieden. Dieser Faktor wird verwendet, um die weiteren Steifigkeiten abzuschätzen. Für die Steifigkeit von Gieren [θ_Z] ist aus dem Diagramm 73 Nm/μRad abzulesen, welche dividiert durch den Faktor 55 eine Steifigkeit von 1,32 Nm/μRad ergibt. Für Rollen [θ_X] und Nicken [θ_Y] sind gar nur 16 Nm/μRad im Diagramm abzulesen. Dies resultiert durch diese Überlegung in eine Steifigkeit von 0,29 Nm/μRad.

Von besonderem Interesse ist die Steifigkeit einer einzelnen Verbindungsstrebe, welche im Diagramm mit $62 \text{ N}/\mu\text{m}$ abzulesen ist. Dieser Wert dividiert durch den Faktor 55 ergibt eine Steifigkeit von $1,12 \text{ N}/\mu\text{m}$ und stellt eine Anforderung an die Verbindungsstrebe dar. Diese Steifigkeit einer einzelnen Verbindungsstrebe muss erreicht werden, sodass sich eine gleichmäßige translatorische Steifigkeit von $2 \text{ N}/\mu\text{m}$ ergibt. Diese $1,12 \text{ N}/\mu\text{m}$ gelten für die gesamte Konstruktion der Verbindungsstrebe, somit auch für die Antriebseinheit inklusive der beiden Gelenke zu der oberen und unteren Plattform.

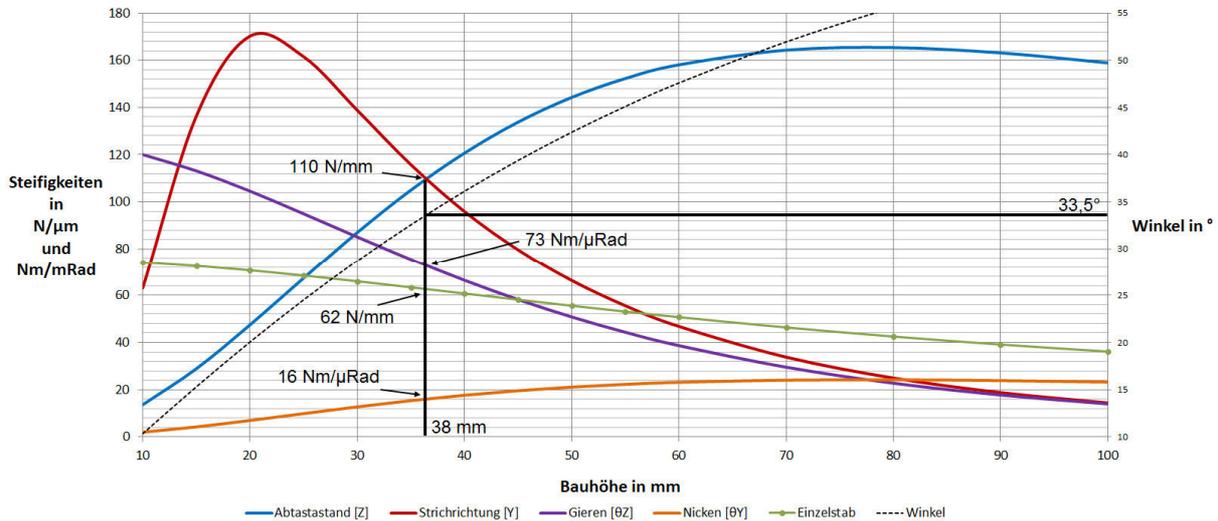


Abbildung 5.7: Steifigkeitsverlauf: Hexapod mit reibungsfreien Kugelgelenken und starrer Plattform, Quelle: Eigene Darstellung.

5.6. Vergleich der Ergebnisse

In den letzten drei Abschnitten werden die Ergebnisse von verschiedenen Modellen beschrieben. Einen Vergleich dieser unterschiedlichen Modelle zeigt Abbildung 5.8. Zusammenfassend ist ersichtlich, dass die Ergebnisse sehr eng beieinander liegen. Um die Modellierung von weiteren Kinematiken zu erleichtern und zusätzlich die Rechenzeit zu verkürzen, wird ab diesem Punkt auf Kugelgelenke und auf eine starre Plattform verzichtet.

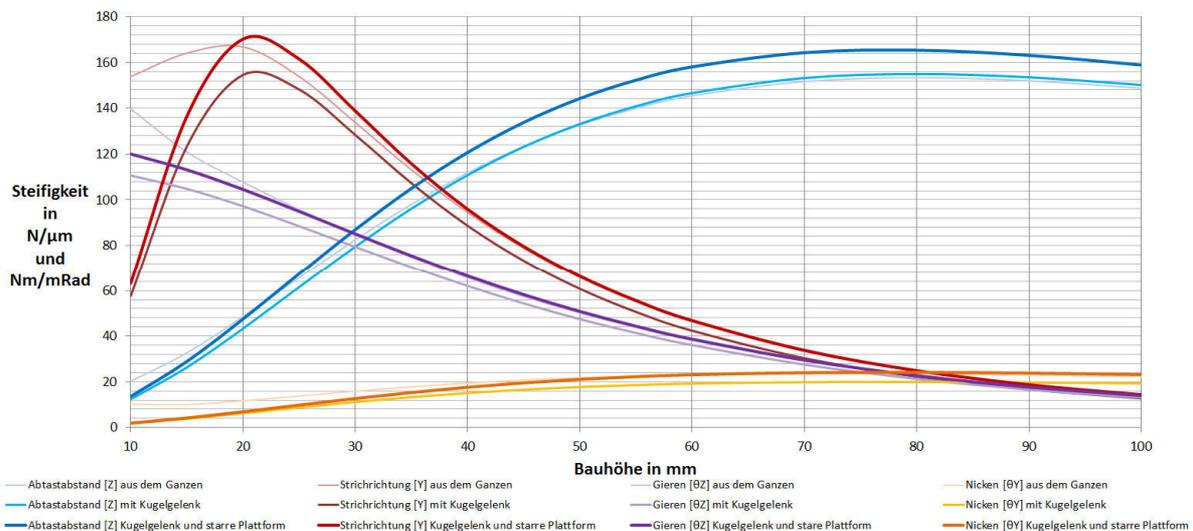


Abbildung 5.8: Vergleich der Ergebnisse, Quelle: Eigene Darstellung.

5.7. Doppelter Tricept in X-Ausrichtung

Für die flache Bauform des Hexapoden wird der vorhandene Bauraum nicht ausgenützt, außerdem sind durch die flache Bauweise relativ kurze Verbindungsstreben von etwa 60 Millimeter nötig. Dies ist sehr kurz, wenn man bedenkt, dass die Antriebseinheit und zwei Gelenke Platz finden müssen. Aus diesem Grund ist die Idee aufgekommen, eine andere Kinematik zu entwerfen, welche mehr Bauraum verwendet und somit längere Verbindungsstreben zulässt. Eine solche Konstruktion ist in Abbildung 5.9 ersichtlich und stellt eine sechseckige Endplattform mit erneut sechs Verbindungsstreben dar. Deren Position ist jedoch anders als bei einem Hexapoden.

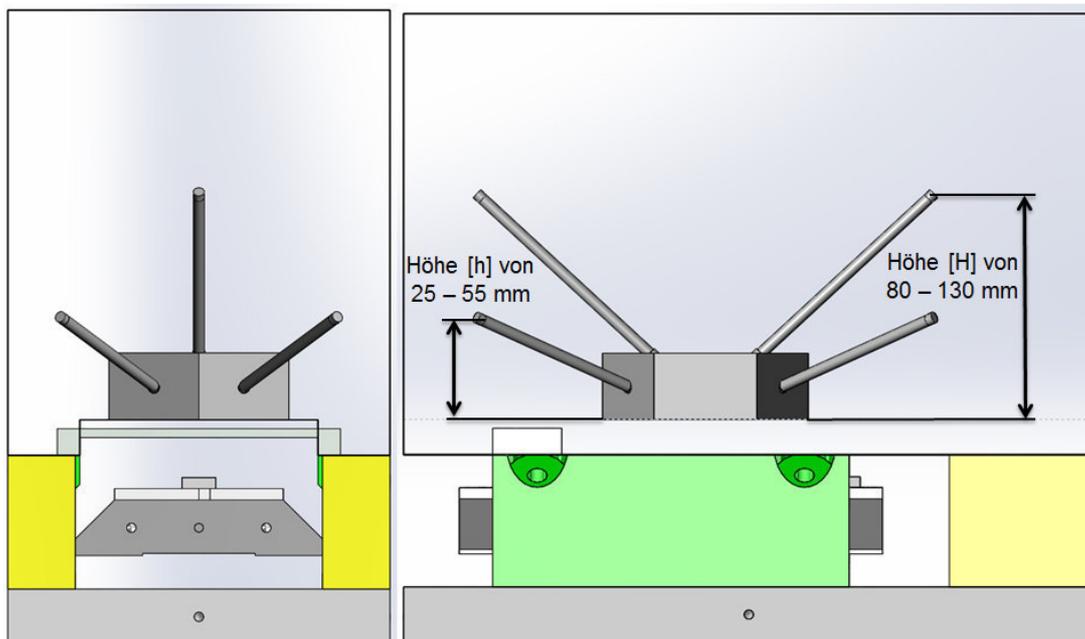


Abbildung 5.9: Bauraum: Doppelter Tricept in X-Ausrichtung,
Quelle: Eigene Darstellung.

Aufgrund dieser Bauform können die Stäbe länger und dicker ausgeführt werden als beim Hexapoden, und zur Erlangung der optimalen Geometrie bezüglich der Steifigkeitswerte wird erneut eine Berechnung durchgeführt. Hierfür sind diesmal zwei Höhenparameter zu verändern, diese sind in der Abbildung ersichtlich.

Die Auswertung für die beste Konfiguration ist erschwert, da jede Steifigkeit von beiden Bauhöhen abhängig ist. Die erzeugten Diagramme erscheinen unübersichtlich, wodurch ein direkter Vergleich der Steifigkeitswerte in der erzeugten Tabelle sinnvoll erscheint. Diese Tabelle sowie die erstellten Diagramme befinden sich im Anhang E.

Die Steifigkeiten für die ausgewählte beste Geometrie zeigt Tabelle 5.3.

Richtung	Steifigkeit
Abtastabstand [z]	61,6 N/ μ m
Messrichtung [x]	156,0 N/ μ m
Strichrichtung [y]	45,4 N/ μ m
Gieren [θ_z]	4,4 Nm/mRad
Rollen [θ_x]	2,3 Nm/mRad
Nicken [θ_y]	6,1 Nm/mRad

Tabelle 5.3: Vergleichssteifigkeiten: Doppelter Tricept in X-Ausrichtung, Quelle:
Eigene Darstellung.

In dieser Konfiguration beträgt die Länge der geringsten Verbindungsstrebe 80 Millimeter. Ein Vergleich der errechneten Steifigkeiten zum Hexapoden erfolgt im Abschnitt 5.9 (Vergleich verschiedener Systeme).

5.8. Doppelter Tricept in Y-Ausrichtung

Hier handelt es sich um eine ähnliche Kinematik wie im vorherigen Abschnitt. Einzig die Anbringung von zwei Stäben wird erneut verändert, um möglicherweise noch bessere Steifigkeitsresultate zu erhalten. In Abbildung 5.10 ist jene veränderte Kinematik veranschaulicht, ebenso die neu veränderlichen Parameter für die Berechnung.

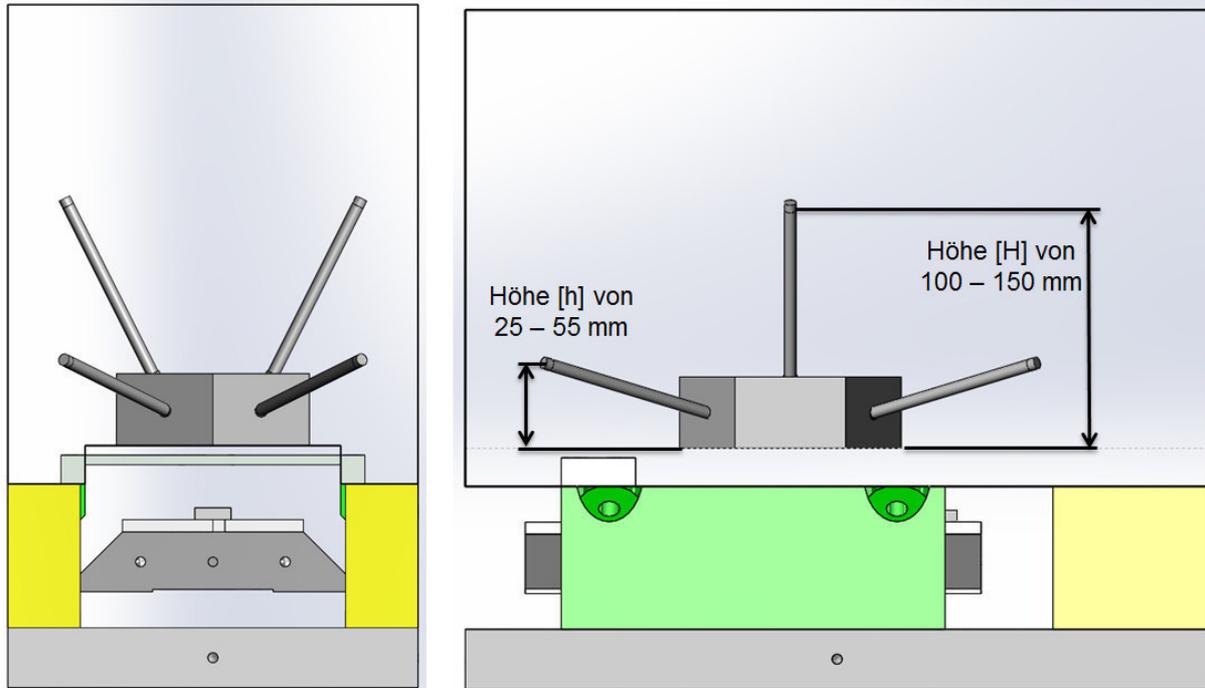


Abbildung 5.10: Bauraum: Doppelter Tricept in Y-Ausrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Steifigkeiten für die ausgewählte beste Geometrie zeigt Tabelle 5.4.

Richtung	Steifigkeit
Abtastabstand [z]	40,2 N/ μ m
Messrichtung [x]	85,0 N/ μ m
Strichrichtung [y]	29,7 N/ μ m
Gieren [θ_z]	5,1 Nm/mRad
Rollen [θ_x]	2,1 Nm/mRad
Nicken [θ_y]	7,9 Nm/mRad

Tabelle 5.4: Vergleichssteifigkeiten: Doppelter Tricept in Y-Ausrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.

In dieser Konfiguration beträgt die Länge der kleinsten Verbindungsstrebe erneut 80 Millimeter. Die Auswertungstabelle sowie die erstellten Diagramme befinden sich im Anhang E. Ein Vergleich der Resultate erfolgt im Abschnitt 5.9.

5.9. Vergleich verschiedener Systeme

Eine Gegenüberstellung der untersuchten Kinematiken zeigt Abbildung 5.11. Hierfür sind die errechneten Steifigkeiten der verschiedenen Kinematiken in einem Balkendiagramm dargestellt.

Es zeigt sich, dass der Hexapod mit Ausnahme eines Wertes in Messrichtung [x] überall die beste Performance liefert. Besonders bei den Steifigkeiten für Rotation zeigt sich ein großer Unterschied. Daher fällt die erste Wahl einer Umsetzung auf einen Hexapoden, auch wenn die Verbindungsstreben sehr kompakt ausgeführt werden müssen. Die Anforderungen für die Kinematik werden mit dem MATLAB-Programm errechnet. Diese Ergebnisse werden in Kapitel 7 beschrieben.

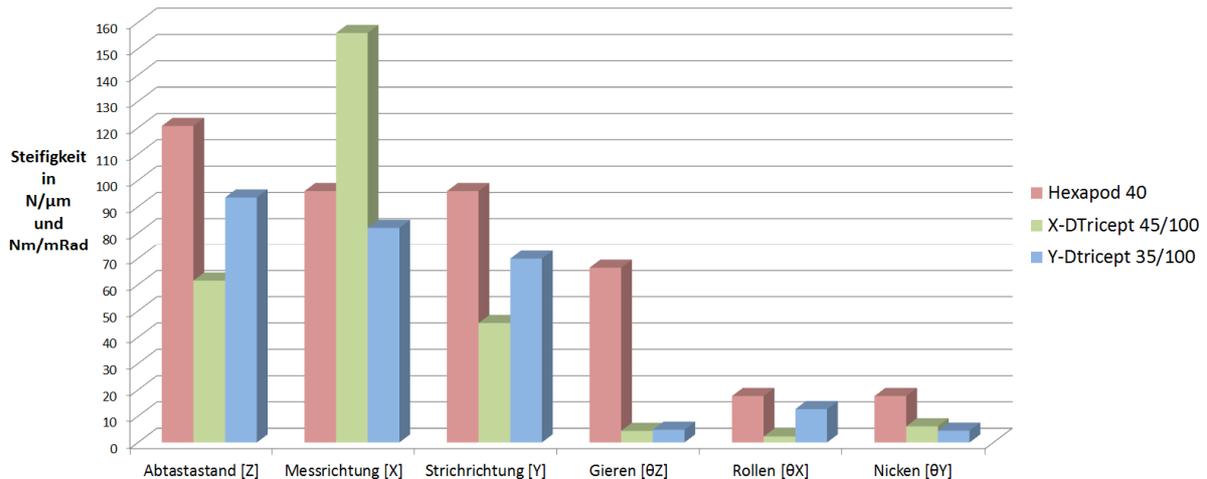


Abbildung 5.11: Vergleich der betrachteten System,
Quelle: Eigene Darstellung.

5.10. Änderung der Steifigkeit eines Hexapoden bei verschiedenen Lagen

Im letzten Schritt der Untersuchung soll herausgefunden werden, wie sich die Steifigkeit eines Hexapoden in Abhängigkeit von der Position und Orientierung verhält. Dafür werden wie in Tabelle 5.5 verschiedene Positionen vorgegeben und ein Hexapod in dieser Position modelliert. Die Position 1 stellt hierbei die Ruheposition des Hexapoden dar, ohne jegliche Translation oder Rotation. Im Anschluss werden hierfür die Steifigkeitswerte ermittelt.

Position	Translation Z	Translation Y	Translation X	Rotation Z	Rotation Y	Rotation X
	mm	mm	mm	mRad	mRad	mRad
1	0	0	0	0	0	0
2	-3	0	0	0	0	0
3	-3	-2	0	0	0	0
4	-3	-2	-2	0	0	0
5	-3	-2	-2	60	0	0
6	-3	-2	-2	60	60	0
7	-3	-2	-2	60	60	-60

Tabelle 5.5: Angefahrene Positionen für die Steifigkeitsberechnung,
Quelle: Eigene Darstellung.

Das Ergebnis dieser Berechnung wird in Abbildung 5.12 in Form eines Balkendiagrammes dargestellt. Es zeigt sich, dass die Steifigkeiten der verschiedenen Positionen um maximal 12% ausgehend von der Ruheposition schwanken.

Bis zu diesem Punkt wurden die Berechnungen stets in der Ruheposition eines Hexapoden durchgeführt. Dieser Abschnitt soll sicherstellen, dass die errechneten Werte im gleichen Ausmaß Gültigkeit besitzen.

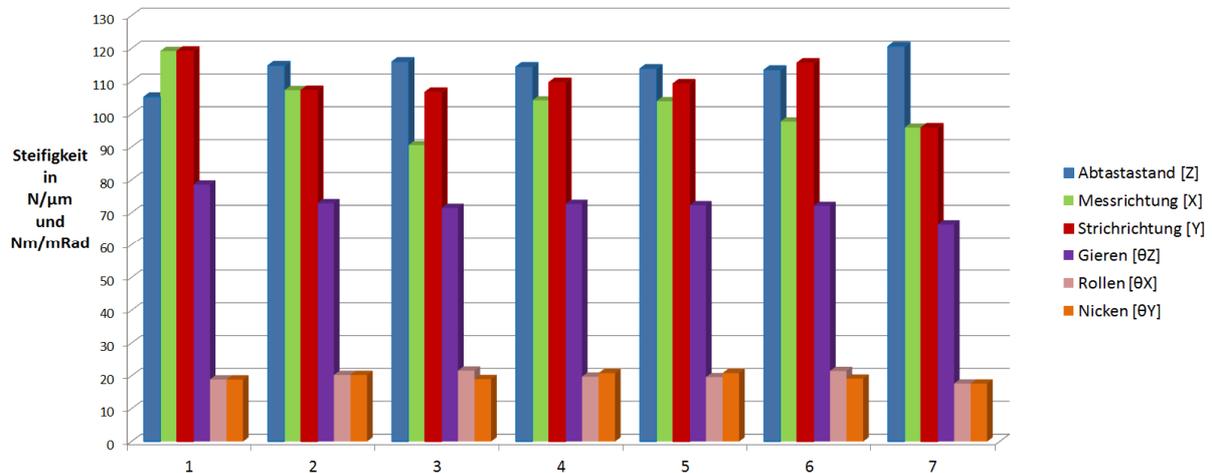


Abbildung 5.12: Steifigkeit für verschiedene Positionen, Quelle: Eigene Darstellung.

5.11. Zusammenfassung

Die durchgeführte Steifigkeitsanalyse zeigt, dass der Hexapod die vielversprechendste Lösung darstellt. Dieser muss allerdings flach gebaut werden, was einige Probleme nach sich zieht.

Durch die flache Bauweise wird der Bauraum bei weitem nicht ausgenützt, und der verwendete Platzbedarf ist eng verbaut. Alle Bauteile müssen sehr klein ausgeführt werden, da Kollisionsgefahr besteht.

Die beiden anderen Kinematiken würden größere Elemente zulassen, allerdings ist mit geringeren Steifigkeiten zu rechnen. Außerdem wurden durch das MATLAB-Programm zu viele Singularitäten erkannt, welche sich negativ auf die Positionierung auswirken. Ein weiteres Kriterium dafür, warum der Hexapod verfolgt werden soll.

Für den Hexapoden, welcher sechs gleich konstruierten Verbindungsstreben besitzt, müssen diese eine Mindestlänge etwa 50 Millimeter und die Maximallänge etwa 65 Millimeter aufweisen. Diese Werte stammen aus dem MATLAB-Programm und liefern eine wichtige Anforderung an die Konstruktion der Verbindungsstreben. Für die Werte der weiteren Kinematiken (Doppelter Tricept in X-Ausrichtung und Doppelter Tricept in Y-Ausführung) siehe Anhang E.

6. Fluidischer Aktor mit Formstrukturen

Es werden auch unkonventionelle Antriebslösungen in Erwägung zu ziehen. Daher wird die Möglichkeit der Verwendung eines fluidischen Aktors untersucht. In Abschnitt 3.3.3 (Fluidischer Aktor mit Formstrukturen) sind die vier Konzepte der Abbildung 3.2 erklärt. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit deren Eignungsuntersuchung.

6.1. Formstrukturen

Zu Beginn werden die Formstrukturen untersucht. Diese sollen die Steifigkeit erhöhen und sind in Abbildung 3.2 in den Bildern „V02“, „V03“ und „V04“ ersichtlich.

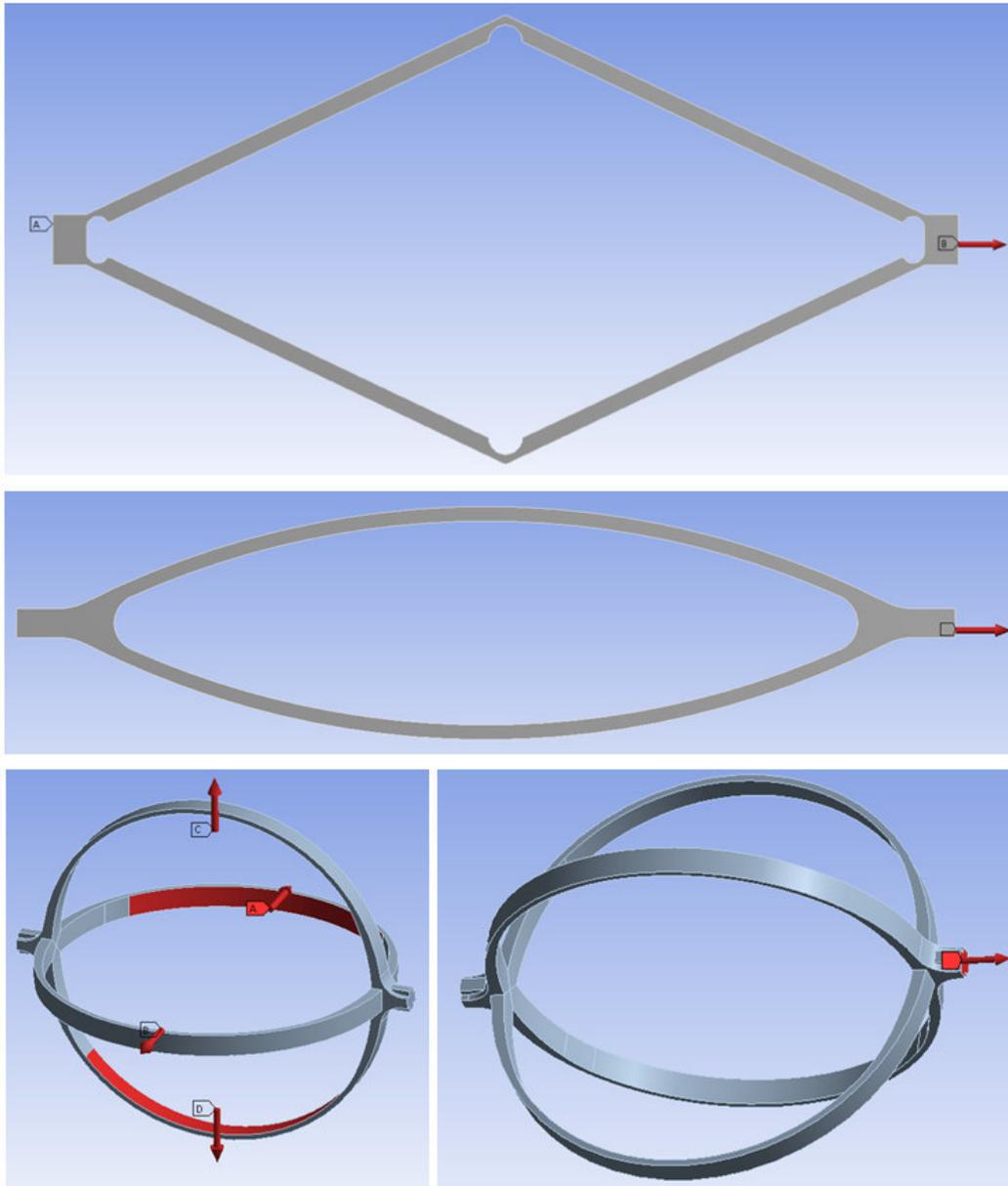


Abbildung 6.1: Verschiedene Ansätze von Formstrukturen,
Quelle: Eigene Darstellung.

Aus dem MATLAB-Programm wird für den Hexapoden die Mindest- und die Maximallänge von 50 und 65 Millimeter gefordert, wodurch ein Hub von 15 Millimeter nötig ist. Dies entspricht 30% von der Ausgangslänge. Anhand dieser ersten Anforderung werden

verschiedene Geometrien von Formstrukturen konstruiert und in ANSYS die nötigen Kräfte und resultierenden Spannungen ermittelt.

In Abbildung 6.1 sind verschiedene Konzepte von Formstrukturen abgebildet, welche in SolidWorks konstruiert und in ANSYS untersucht wurden. Die Ergebnisse befinden sich im Anhang F, zeigen jedoch für kein System zufriedenstellende Ergebnisse. Die nötigen resultierenden Spannungen für den erforderlichen Weg werden in allen Formstrukturen überschritten. Der zu hohe Platzbedarf stellt nur ein weiteres Problem dar, warum diese Idee nicht weiter verfolgt wird.

6.2. Fluidischer Aktor

Das Konzept „V01“ in Abbildung 3.2 wird durch einen Metallfederbalg realisiert, welcher durch Innendruck eine Längenänderung erfährt. Dies kann durch Hydraulik erfolgen und führt zu keinem Stick-Slip-Effekt wie bei Teleskopzylindern. Der eigentliche Zylinder mit vorzugsweise berührungsloser Dichtung kann sich auch außerhalb der Klimakammer befinden.

6.2.1. Geometrie

Die maximalen Abmessungen dieser Konstruktion (vgl. Abbildung 6.2) werden mit 65 Millimeter Bauhöhe und 40 Millimeter Durchmesser veranschlagt. Der innere Durchmesser wird aufgrund der Stabilität mit mindestens 15 Millimeter gewählt. Diese Baugröße ist für den Hexapoden bereits zu hoch, allerdings können die anderen Kinematiken (Doppelter Tricept in X- bzw. Y-Ausführung) umgesetzt werden.

Die Konstruktion des Membranzylinders basiert auf einer Parameterdarstellung, wodurch die Geometrie schnell verändert werden kann. Diese Konstruktion wird in Abbildung 6.2 dargestellt.

Als erstes werden die Anzahl der Windungen definiert sowie die Hauptabmessungen Baulänge, Deckel(-dicke), Außen- und Innendurchmesser. Danach können drei Wandstärken (Dicken) eingegeben werden, welche auf eine vorgegebene Kontur aufgebracht werden. Diese vorgegebene Kontur stellt in der Tabelle die Werte der Neutralen Faser dar und ist in der Konstruktionskizze grün gekennzeichnet. Die Gestaltung der Windungen kann mit vier Werten erfolgen, jeweils zwei Werte für die Innen- und zwei Werte für die Außenellipse.

"Anzahl"	= 9
"Baulänge"	= 65mm
"Deckel"	= 3mm
"Außendurchmesser"	= 40mm
"Innendurchmesser"	= 15mm
"Dicke Gerade"	= 0.8mm
"Dicke Ellipse Außen"	= 0.8mm
"Dicke Ellipse Innen"	= 0.8mm
"Neutrale Faser AußenEllipse H"	= 1.6
"Neutrale Faser AußenElipse V"	= 1.6
"Neutrale Faser InnenEllipse H"	= 1.6
"Neutrale Faser InnenEllipse V"	= 1.6

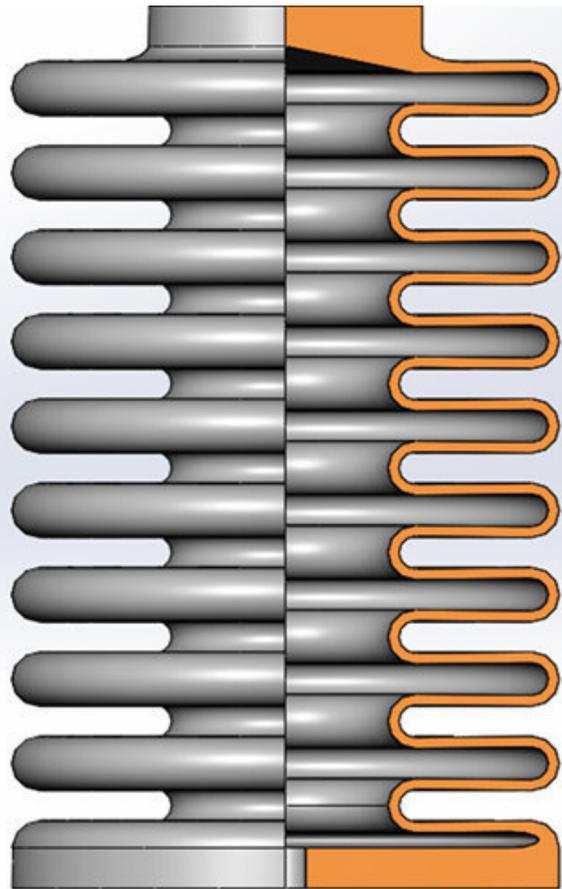
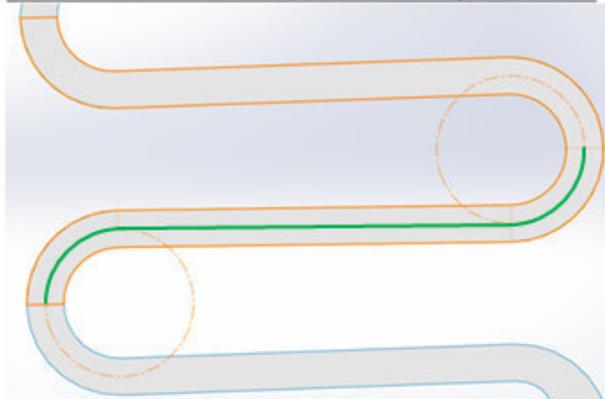


Abbildung 6.2: Geometrie des Membranzyllinders,
Quelle: Eigene Darstellung.

6.2.2. Materialien

Für die geplante Verwendung als „Feder“ ist ein Material mit geringem Elastizitätsmodul und hoher Streckgrenze sinnvoll, da diese beiden Eigenschaften eine große Verformung maßgeblich beeinflussen.

Zur Umsetzung der ersten Idee, der Herstellung mittels Lasersintern, werden zuerst Materialien gesucht. Titan weist hierbei die besten Eigenschaften auf, zwei verschiedene Legierungen des Unternehmens EOS werden genauer untersucht, welche in Abbildung 6.3 gegenübergestellt sind. Durch die Toleranzen im Datenblatt werden für die Berechnung die schlechtesten Werte ermittelt und mit diesen gerechnet, somit der höchste E-Modul und die geringste Streckgrenze. Die angegebenen Mindestwandstärken betragen für beide Materialien 0,3 bis 0,4 Millimeter.

Obwohl das „Titanium Ti64ELI“ den besseren Eindruck macht, erweist sich das „Titanium Ti64“ als günstiger, da größere Wege erreicht werden können. Dies wurde durch Simulationen in ANSYS berechnet, daher wird für die weiterführenden Berechnungen nur mehr das „EOS Titanium Ti64“ in Betracht gezogen (Ti6Al4V-Pulver).

Es ist auch zu beachten, dass sich aufgrund des Herstellungsprozesses unterschiedliche mechanische Eigenschaften anhand der Orientierung ergeben. Eine stehende Orientierung des fluidischen Aktors ist daher anzustreben.

EOS Titanium Ti64	
Zugfestigkeit	
in horizontaler Richtung (XY)	typ. 1230 ± 50 MPa
in vertikaler Richtung (Z)	typ. 1200 ± 50 MPa
Streckgrenze (Rp_{0,2})	
in horizontaler Richtung (XY)	typ. 1060 ± 50 MPa
in vertikaler Richtung (Z)	typ. 1070 ± 50 MPa
E-Modul	
in horizontaler Richtung (XY)	typ. 110 ± 10 GPa
in vertikaler Richtung (Z)	typ. 110 ± 10 GPa

EOS Titanium Ti64ELI	
Zugfestigkeit	
in horizontaler Richtung (XY)	typ. 1260 ± 40 MPa
in vertikaler Richtung (Z)	typ. 1250 ± 50 MPa
Streckgrenze (Rp_{0,2})	
in horizontaler Richtung (XY)	typ. 1125 ± 65 MPa
in vertikaler Richtung (Z)	typ. 1130 ± 75 MPa
E-Modul	
in horizontaler Richtung (XY)	typ. 108 ± 20 GPa
in vertikaler Richtung (Z)	typ. 112 ± 13 GPa

WORST CASE !	
Zugfestigkeit	1150 MPa
Streckgrenze (Rp _{0,2})	1010 MPa
E-Modul	120 GPa

WORST CASE !	
Zugfestigkeit	1200 MPa
Streckgrenze (Rp _{0,2})	1055 MPa
E-Modul	128 GPa

Abbildung 6.3: Gegenüberstellung von 2 Titanlegierungen zum Lasersintern,
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an:
EOS e-Manufacturing Solution (2015), Onlinequelle [03.08.2015].

Um den Innendruck im Metallfederbalg aufzubringen, wird neben Hydraulikflüssigkeit auch die Verwendung einer ionischen Flüssigkeit berücksichtigt. Dabei handelt es sich um flüssige Salze mit interessanten Eigenschaften. Eine dieser Eigenschaften ist die identische Steifigkeit (Kompressionsmodul) wie Titan. Ein Hersteller hierfür ist das Unternehmen *Proionic* aus Graz. Allerdings muss auch überprüft werden, wie sich diese Materialpaarung verhält, da diese Flüssigkeiten zum Teil aggressiv sind. Außerdem ist ungewiss, wie dicht ein erzeugtes Lasersinter-Bauteil ist, da dafür keine Vergleichswerte gefunden werden konnten.

6.2.3. Berechnungsmethodik

Um zu berechnen, ob diese Konzeptidee zielführend für dieses Projekt ist, wird der konstruierte Metallfederbalg in ANSYS simuliert. Hierfür wird der Innendruck schrittweise um 5 bar erhöht und die Verformung sowie die auftretenden Spannungen berechnet.

Als Beispiel für eine Berechnung ist in Abbildung 6.4 ein Berechnungsprotokoll abgebildet. Dieses Protokoll besteht in der ersten Reihe aus der Parametertabelle aus SolidWorks, einer Zeichnung, wie eine nicht verformte Windung des Metallfederbalges aussieht und der Ausgabetabelle von Druck, Spannung und Verformung. In zweiter Reihe ist durch lineare Interpolation der zulässige Druck und die hervorgerufene Verformung berechnet, sodass die zulässigen Spannungen nicht überschritten werden. Des Weiteren ist die verformte Windung und deren Spannungsverteilung (von Mises) veranschaulicht. Letztendlich wird ein Spannungs-Dehnungsdiagramm dargestellt, um die Linearität zu überprüfen. Es stellt sich heraus, dass die Linearität immer gegeben ist. Dadurch wird in weiterer Folge auf das Diagramm verzichtet.

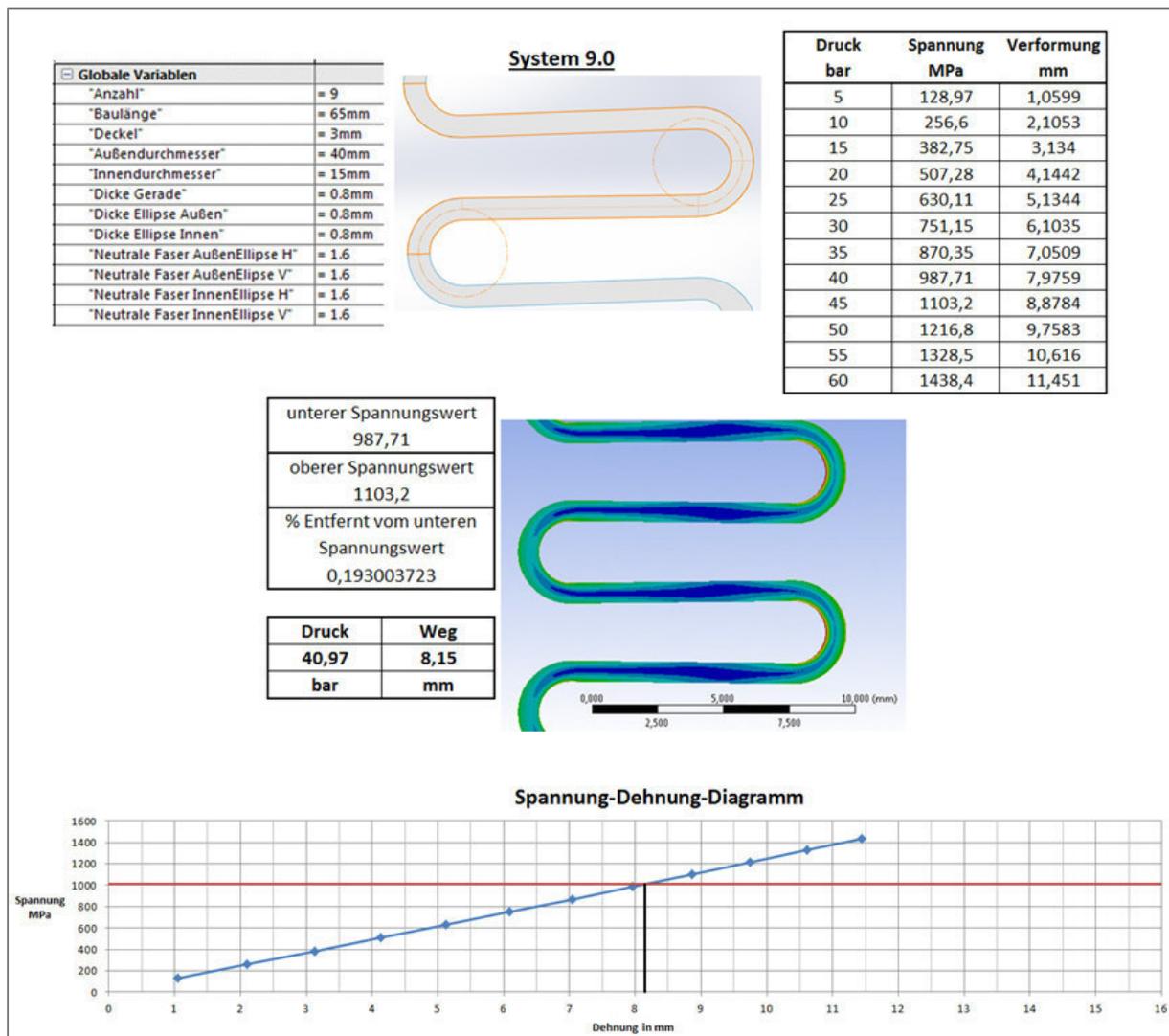


Abbildung 6.4: Berechnungsprotokoll,
Quelle: Eigene Darstellung.

In dieser Berechnung kann die rotatorische Symmetrie ausgenützt werden. Von der anfänglichen Berechnung des gesamten Modells kann auch nur ein Kreissegment gerechnet werden. Dies liefert die gleichen Ergebnisse bei geringerer Rechenzeit. Da absolute rotatorische Symmetrie besteht kann sogar eine rein 2-dimensionale Berechnung durchgeführt werden. ANSYS liefert dafür eigens die Möglichkeit ein 2D-Modell als rotationssymmetrisches 3D-Modell zu betrachten. Im Anhang F befindet sich hierfür eine Berechnungstabelle, in welcher die Ergebnisse der 3D und 2D Berechnung gegenübergestellt sind. Es zeigt sich, dass die 2D-Rechnung vorzuziehen ist, da kleinere Elemente verwendet werden können und somit das Ergebnis genauer ist.

Ebenso befindet sich im Anhang F die Verfeinerung des FEM-Netzes. Hier wird das Netz immer weiter verkleinert, um ein Ergebnis zu erhalten, das vom Netz unabhängig ist. Dadurch verlängert sich die Berechnungszeit, wobei durch den Umstieg zur 2D-Berechnung dieser Effekt vernachlässigt werden kann. Ausschlaggebend ist dies nur in der 3D-Berechnung. Die ausgewählte Elementgröße kann daher klein (0,2 Millimeter) gewählt werden (vgl. Abbildung 6.5).

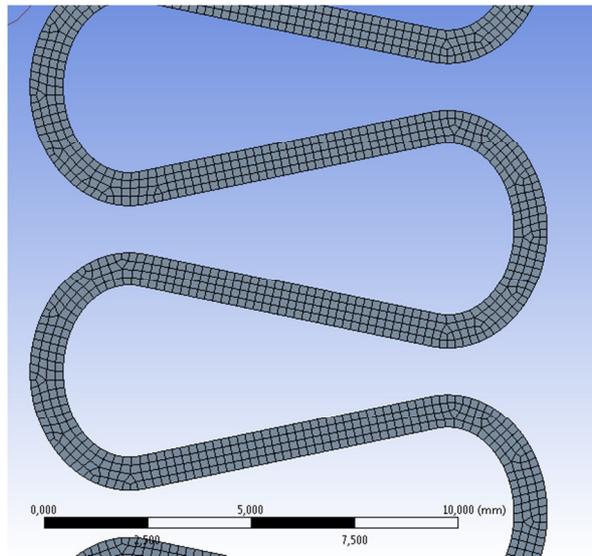


Abbildung 6.5: Elementgröße 0,2 Millimeter,
Quelle: Eigene Darstellung.

6.2.4. Geometrie- Optimierung

Unter den Rahmenbedingungen der Baugröße wird eine Reihe von Analysen durchlaufen, bei der immer ein Parameter verändert wird. Ziel ist es, die Verformung zu vergrößern, bis die zulässige Spannung erreicht wird. Anfangs wird jeder Wert einzeln verändert um dessen Verhalten zu erkennen, im Anschluss erfolgt die Veränderung mehrerer Werte, um eine möglichst hohe Verformung zu erhalten. Für jede Berechnung wird ein Messprotokoll wie in Abbildung 6.4 erstellt, welche sich im Anhang F befinden.

Lasersintern hat allerdings auch Grenzen, daher wird vorweg auf ein wichtiges Problem eingegangen. Es kann keine Konstruktion mit einer horizontalen oder zu flachen Fläche beginnen, dafür ist das Pulver nicht stabil genug. Ein grober Richtwert stellen etwa 45 Grad dar, darunter werden Stützkonstruktionen verwendet. Damit sind Materialstützen gemeint, welche erst im Nachhinein von der Konstruktion entfernt werden. Daher sollen die Windungen möglichst steil erstellt werden.

Abbildung 6.6 zeigt drei verschiedene Konstruktionen, links sind die Windungen sehr steil, wodurch keine Stützkonstruktionen nötig sind. In der mittleren Abbildung sind die Windungen annähernd horizontal, wodurch Stützkonstruktionen nötig werden. In der rechten Abbildung herrscht ein sogenannter Hinterschnitt (auch Hinterschneidung genannt), in dem Bereiche der Konstruktion so hervorstehen, dass ein Entfernen der Stützkonstruktionen noch weiter erschwert wird. Hier besteht nur mehr die Möglichkeit der liegenden Fertigung, wobei Stützkonstruktionen in der Mitte des Bauteiles nötig werden (vgl. 6.2.5 Herstellung).

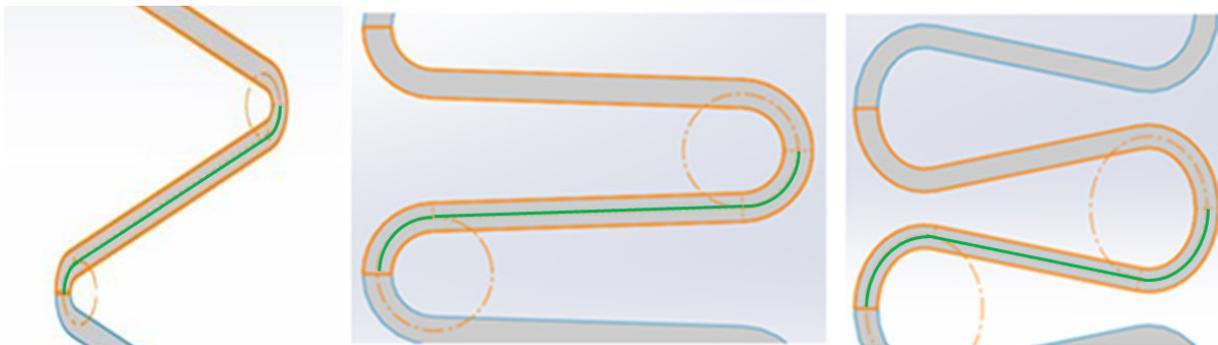


Abbildung 6.6: Geometrie mit steilen Windungen (links) Geometrie ohne Hinterschnitt (mitte) und Geometrie mit Hinterschnitt (rechts), Neutrale Faser in grün dargestellt,
Quelle: Eigene Darstellung.

Die Erkenntnisse aus den erstellten Berechnungsprotokollen aus Anhang F zum fluidischen Aktor werden hier kurz wiedergegeben.

Maßgeblichen Einfluss auf die Verformung hat die steigende Anzahl der Windungen, welche höhere Verformungen erlaubt. Allerdings werden bei gleich bleibenden Übergängen die Windungen immer flacher, bis hin zu dem Punkt, an dem Hinterschneidungen entstehen. Werden nun die Übergänge verkleinert um diese Hinterschneidungen zu umgehen, bewirkt dies eine kleinere Verformung. Somit werden die besten Resultate bei möglichst großen Hinterschneidungen erzeugt.

Der Metallfederbalg mit neun Windungen wird am genauesten untersucht, um herauszufinden, ob eine Konstruktion ohne Hinterschnitt möglich ist. Ausgangsbasis ist ein Modell mit horizontalen Verbindungsgeraden zwischen den Übergängen.

Zu Beginn wird die neutrale Faser der Kontur immer um einen Parameterwert verändert und die Verformung zur Ausgangs-Verformung verglichen. Hier erkennt man erneut einen positiven Einfluss, wenn ein Hinterschnitt entsteht. Ohne diesen wird die Verformung sogar vermindert.

Zur Untersuchung des Dickeneinflusses ist es möglich im Modell an drei Stellen die Dicke zu verändern. Einmal die Dicke des Geradenstückes und jeweils die Dicke in der Innen- bzw. Außenwindung. Zusammengefasst ist erkennbar, dass je dünner die Kontur desto mehr Verformung ist möglich, bevor die zulässige Spannung erreicht wird. Hier muss ein Kompromiss gefunden werden, zum einen soll die Konstruktion dünnwandig sein, zum andern muss sie auch dicht sein. Die Mindestdicke laut Pulverhersteller beträgt 0,4 Millimeter, die geringste gerechnete Dicke wird mit 0,6 Millimeter gewählt um die Fertigung zu garantieren. Hierbei besteht außerdem die Möglichkeit, das Innere des Metallfederbalges mit Silikon auszugießen, um die Dichtheit zu verbessern. Für eine Realisierung wird diese Idee in Evidenz gehalten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die höchste Verformung für einen mit Hinterschneidungen dünnwandigen Metallfederbalg ergibt. Hier muss der Kompromiss eingegangen werden zwischen der Anzahl an Windungen und der sich daraus ergebenden Komplexität. Dafür muss vorab geklärt werden, ob die Herstellung möglich ist. Für eine Anfrage wird das System 12.2 in Abbildung 6.7 herangezogen. Diese Geometrie wurde aufgrund der hohen Verformung gewählt. Trotz einer Mindestwandstärke von 0,8 Millimeter werden fast 13 Millimeter Verformung erreicht bis die zulässige Spannung überschritten wird. Dies geschieht laut ANSYS Berechnung bei etwa 26 bar. Die Ausgangsmaße sind nach wie vor 40 Millimeter Durchmesser und 65 Millimeter Länge.

Die maximale Verformung soll aufgrund der Sicherheit nicht erreicht werden, auch die komplette Entlastung ist ungünstig, um eine definierte Vorspannung im Metallfederbalg zu gewährleisten. Der empfohlene Arbeitsdruck beträgt 2 bis 23 bar, welcher einen Weg von etwa 10 Millimeter erlaubt.

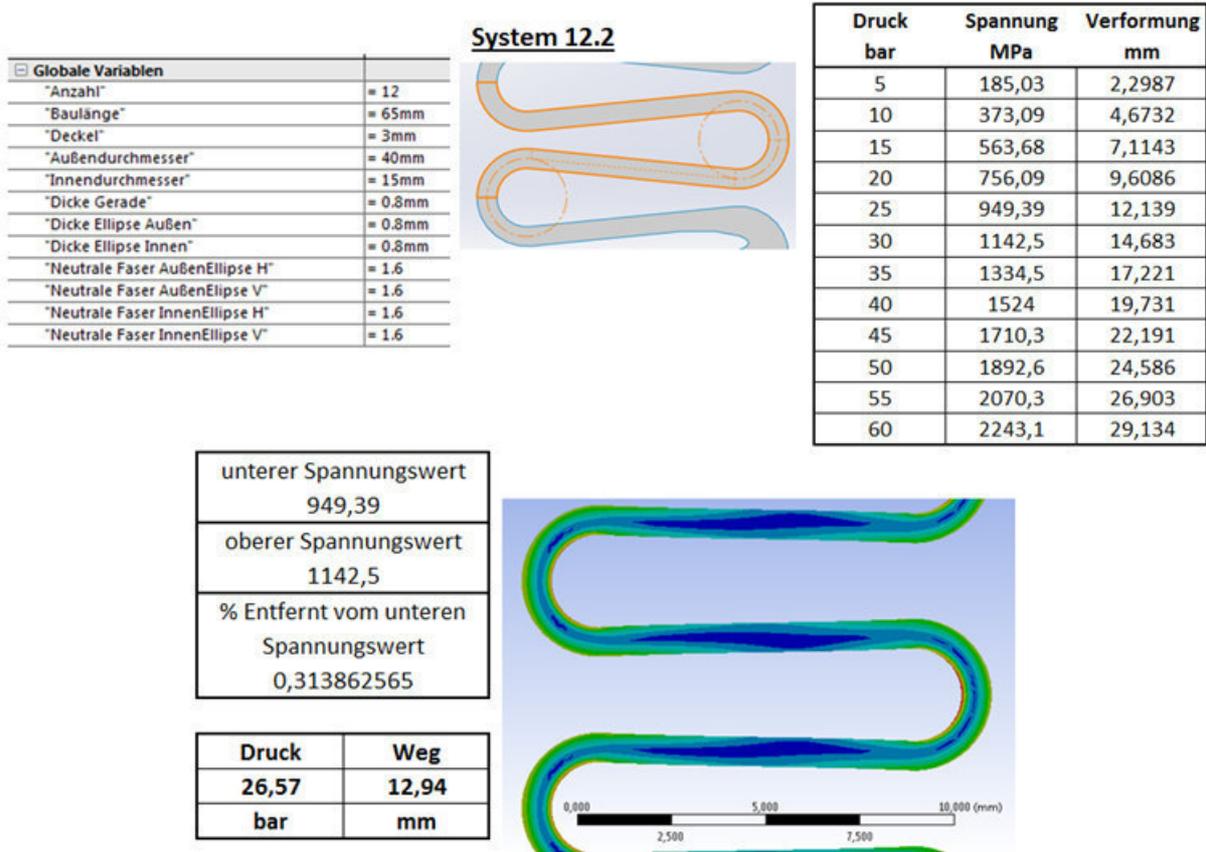


Abbildung 6.7: Fluidischer Aktor mit zwölf Windungen,
Quelle: Eigene Darstellung.

6.2.5. Herstellung

Der fluidische Aktor soll mittels Lasersintern hergestellt werden, ein Verfahren bei dem das Unternehmen ANTON PAAR Erfahrung besitzt.

Eine stehende Orientierung ist aufgrund der hinterschnittenen Bereiche ungünstig. In Abbildung 6.8 sind zwei Varianten der Herstellung abgebildet, in beiden Fällen sind Stützkonstruktionen nötig, welche rot eingezeichnet sind. Die blau markierten Stellen werden aufgrund des Winkels bei dem Prozess etwas rauer als die übrige Kontur ausfallen (vgl. Anhang F).

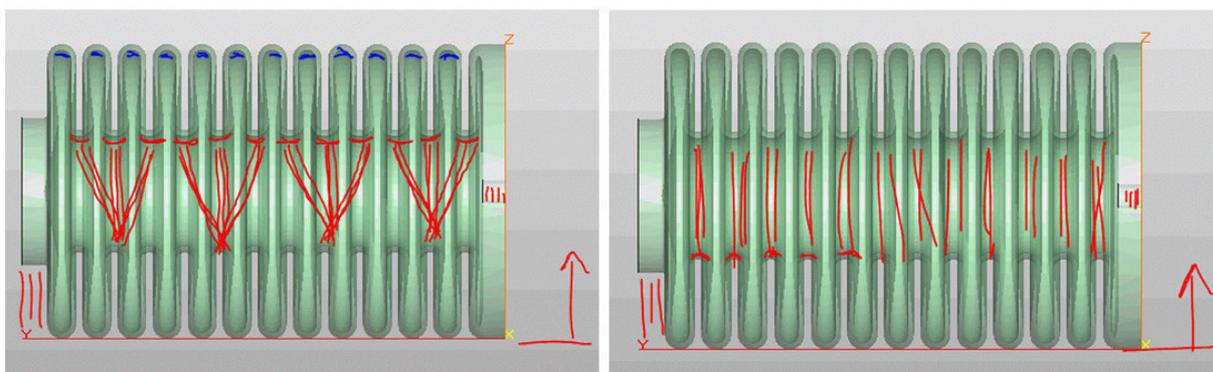
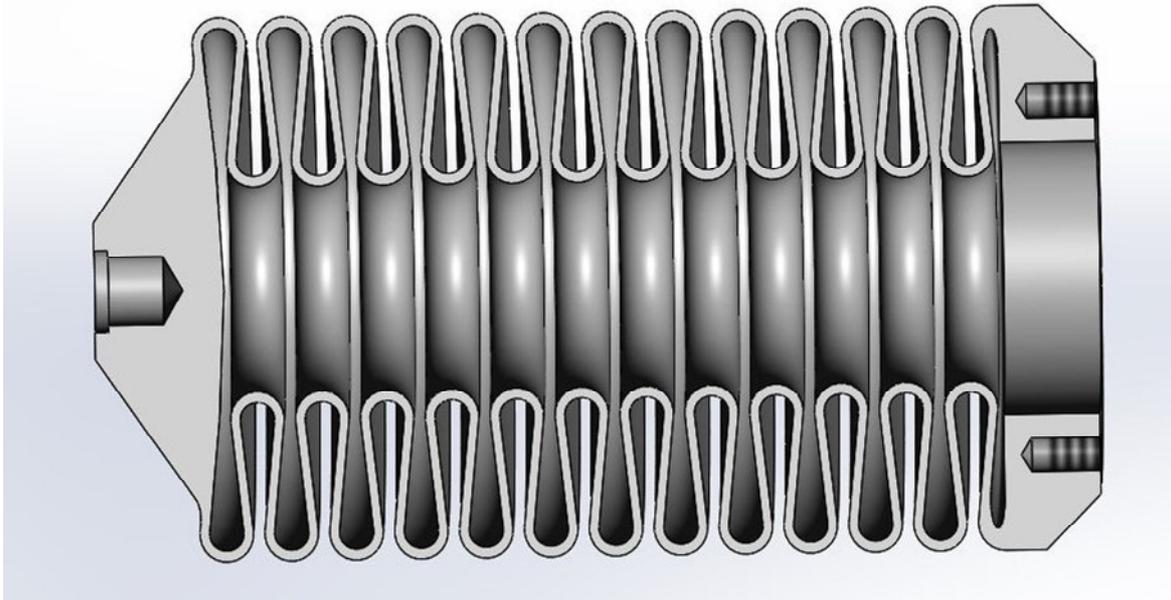


Abbildung 6.8: Fertigung des fluidischen Aktors,
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Anton Paar (2015).

In der Nachbearbeitung müssen die Stützgeometrien entfernt werden. Dafür kann die Öffnung auf der rechten Seite vergrößert werden, um diese Stützen zu entfernen. Die Oberfläche kann noch mittels Gleitschleifen verbessert werden, wodurch auch die rauen Stellen beseitigt werden.

Aufgrund der im Materialdatenblatt erkennbaren unterschiedlichen Materialeigenschaften (anisotrop) bezüglich der Erzeugungsorientierung, ist eine liegende Erzeugung ungünstig. Eine weitere Möglichkeit der Herstellung ist die Geometrie zu segmentieren und danach mittels Laser zusammen zu schweißen. Ein höherer Aufwand ist die Folge.

In Abbildung 6.9 ist dargestellt, wie ein fertiges fluidischer Aktor inklusive Anschlussmöglichkeit aussehen kann.



*Abbildung 6.9: Halbschnitt durch fluidischen Aktor,
Quelle: Eigene Darstellung.*

6.2.6. Messung

Dieser Abschnitt beschäftigt sich damit, wie die Verformung gemessen werden kann. Gewünscht ist eine Messung in der Achse des fluidischen Aktors, um keine Fehler beim Knicken dessen zu messen.

Als beste Lösung erscheint die Verwendung eines Wirbelstromsensors, da dieser auch in einer Flüssigkeit verwendet werden kann. Hierfür wird vom Unternehmen WAYCON der Sensor T10 aus der Serie TX ausgewählt. Dieser besitzt einen Messbereich von 10 Millimeter, welcher auf 12 Millimeter erweitert werden kann. Die bestmögliche Auflösung beträgt 60 Mikrometer.¹³

Abbildung 6.10 zeigt, wie dieser Sensor im fluidischen Aktor verwendet werden kann. Ein Dorn überträgt die Verformung durch die Achse des Metallfederbalges zum Sensor, welcher eine große Messfläche benötigt. Ein Problem bei diesem Aufbau ist die Länge, der komplette Aktor wird beinahe doppelt so lang.

¹³ Vgl. Waycon (2015), Onlinequelle [01.07.2015].

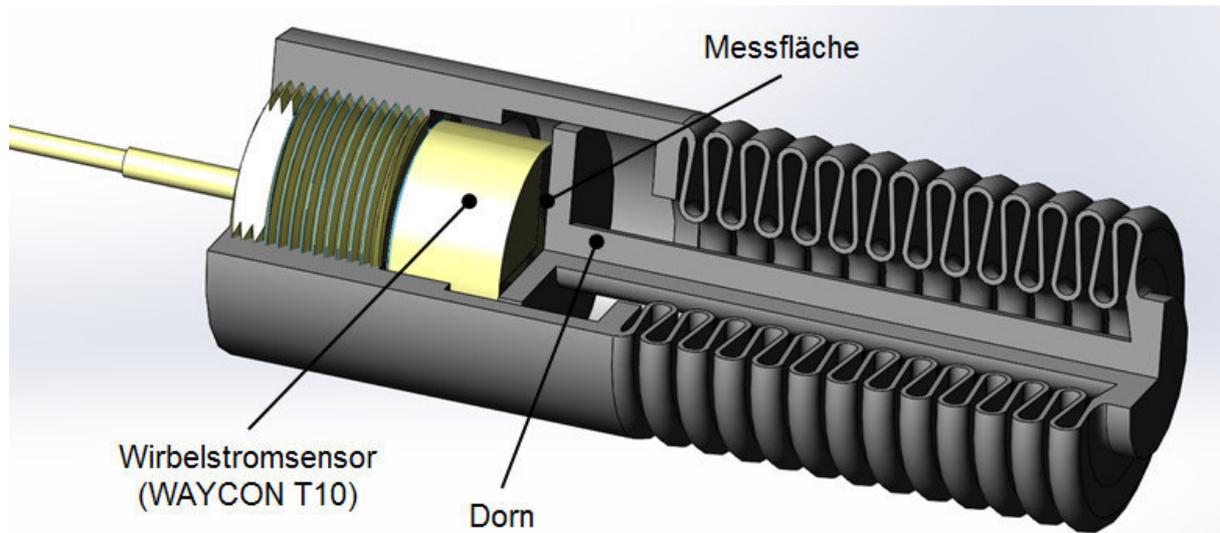


Abbildung 6.10: Fluidischer Aktor mit Wirbelstromsensor,
Quelle: Eigene Darstellung.

6.2.7. Konzept-Entwurf

Wie dieser fluidische Aktor aussehen kann zeigt die Abbildung 6.11. Hierfür wird auf ein Messsystem verzichtet und an beiden Enden selbst erzeugbare Kugelgelenke konstruiert. Als Vorlage für die Kugelgelenke dienen die Abbildung 2.13 und die Überlegungen aus 2.2.4.2 Kugelgelenk.

Diese Konstruktion erlaubt auf beiden Seiten einen Schwenkwinkel von ± 8 Grad, welcher laut MATLAB-Berechnungen (vgl. Kapitel 4) ausreicht. Auf der linken Seite ist auch der Zufluss der Hydraulikflüssigkeit in grün erkennbar. Hierbei kann ein Minimes® Schlauch des deutschen Unternehmens Hydrotechnik verwendet werden, welcher selbst für kleine Außendurchmesser große Drücke erlaubt.

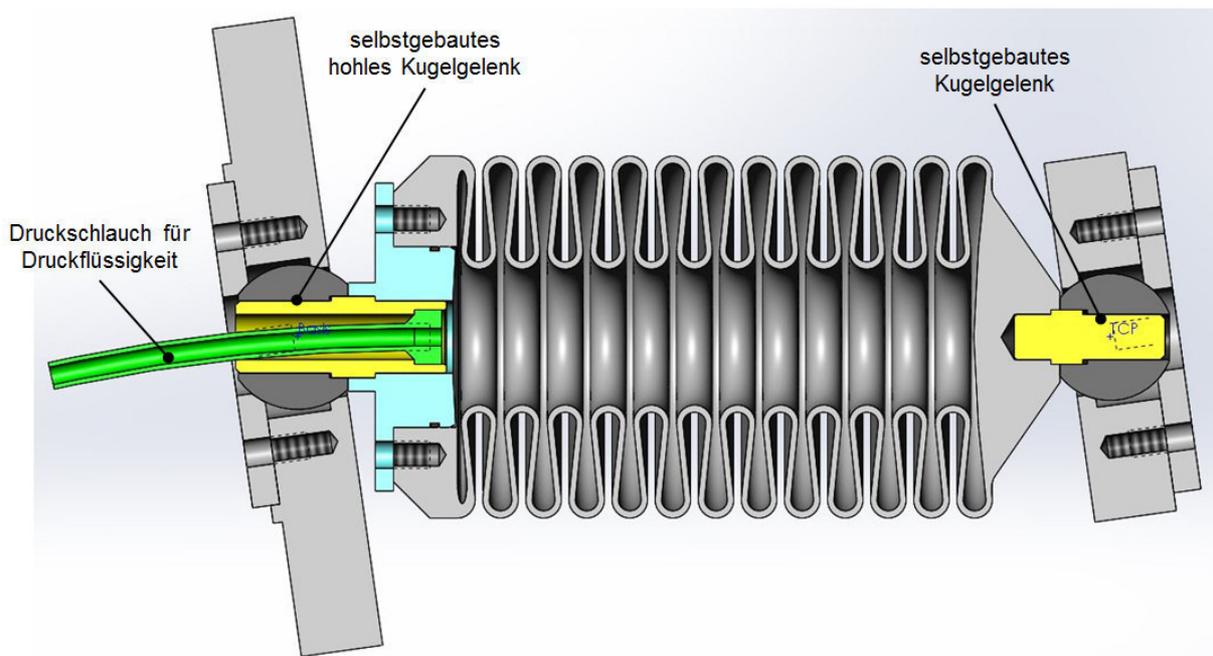


Abbildung 6.11: Konzept des fluidischen Aktors mit selbst erzeugbaren Kugellagern,
Quelle: Eigene Darstellung.

Des Weiteren wurde ein Versuchsaufbau entworfen, um das Verhalten des fluidischen Aktors unter Druck zu testen. Hierbei wird über einen Kolben Flüssigkeit in den

Metallfederbalg gedrückt und die Verformung gemessen. Dieser Aufbau ist beschrieben in Anhang F.

6.2.8. Zusammenfassung

Aufgrund der resultierenden Größe eines hydraulischen Aktors ist es nicht möglich, diesen in einem Hexapoden zu verwenden. Der Einsatz setzt eine der anderen Kinematiken (Doppelter Tricept in X- bzw. Y-Ausführung) voraus. Wie dies aussehen kann zeigt die Abbildung 6.12.

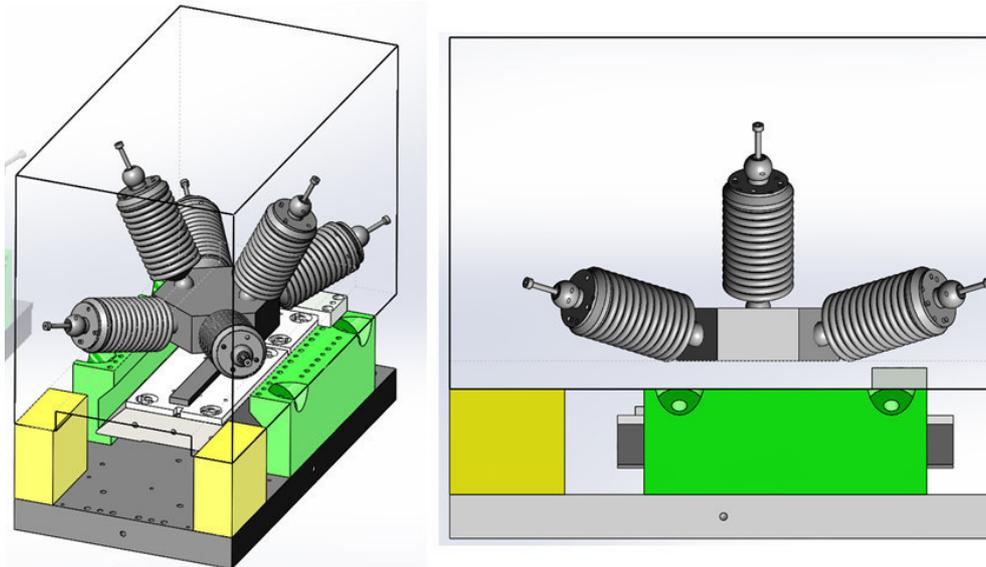


Abbildung 6.12: Hydraulischer Aktor für doppelten Tricept in Y-Ausführung, Quelle: Eigene Darstellung.

Dieses Kapitel hat sich zum größten Teil mit der Entwicklung eines hydraulischen Aktors beschäftigt. Hierbei handelt es sich um rein rechnerische Ergebnisse, es wurden keine praktischen Experimente durchgeführt.

Durch die hohe Steifigkeit der ionischen Flüssigkeit ergäbe sich eine theoretische Steifigkeit von $300\text{N}/\mu\text{m}$. Dies entspricht einem Titanstab mit 15 Millimeter Durchmesser.

Bei diesem Konzept handelt es sich um eine Technologieentwicklung, die genügend Forschungsmaterial für eine weitere ausführlichere Studie bietet. Ein solcher Metallfederbalg besitzt sechs Freiheitsgrade, wobei die Stabilität überprüft werden muss. Es ist nicht gegeben, wie geradlinig sich dieser Metallfederbalg ausbreitet. Dies hängt auch von der Homogenität des Materials, den orthotropen Materialeigenschaften und der Herstellgenauigkeit des Bauteils ab. Maßgebliches Kriterium dafür ist die Fertigungstechnologie.

Für eine Fertigung mittels Lasersintern müssen die Stützgeometrien präzise entfernt werden, da sonst ungleichmäßige Verformungen entstehen können. Eine liegende Fertigung bringt außerdem das Problem der unterschiedlichen Materialwerte mit sich. Daher ist eine stehende Fertigung anzustreben, wenn nötig mit einzelnen Segmenten, welche im Anschluss mittels Laser zusammen geschweißt werden.

Um diese Technologie zu entwickeln muss man sich intensiv mit dem Herstellungsprozess befassen und experimentelle Test durchführen. Außerdem ist eine geeignete und platzsparende Messvorrichtung zu finden.

Letztendlich sind weitere Untersuchungen erforderlich, um beurteilen zu können, ob dieser Aktor wirklich die beste Lösung für die geplante Anwendung darstellt.

7. Ergebnisse und Diskussion

Anhand der Literaturrecherche wird sehr schnell klar, dass nur eine parallele Kinematik die Anforderungen erfüllen kann. Nur diese Bauweise bewegt sich in der Größenordnung der gewünschten Steifigkeiten. Beim Vergleich verschiedener paralleler Kinematiken mit sechs Freiheitsgraden wird ersichtlich, dass hauptsächlich Hexapoden in der Industrie Verwendung finden.

Die erwerbbaaren Hexapoden sind alle relativ hoch gebaut, durch die Steifigkeitsanalyse hat sich allerdings herausgestellt, dass eine homogenere Steifigkeitsverteilung bei einer sehr flachen Bauweise vorhanden ist. Dies stellt allerdings neue Herausforderungen für die Umsetzung dar. Es müssen die einzelnen Streben möglichst kurz und dünn konstruiert werden. Welche mechanischen Anforderungen an diese Streben gestellt werden, lässt sich mit MATLAB ermitteln.

7.1. Erkenntnisse aus dem MATLAB-Kinematiktool

Aus dem MATLAB-Programm lassen sich eine Reihe verschiedener Informationen ermitteln. Für die optimale Geometrie eines Hexapoden bezüglich Steifigkeit ergibt sich die kürzeste Länge einer Verbindungsstrebe von 50 Millimeter. Die maximale Länge beträgt etwa 65 Millimeter, wonach eine Längenänderung von 15 Millimeter für den Aktor nötig ist. Dies entspricht einer Längenänderung von 30%. Abbildung 7.1 zeigt hierfür einen Auszug aus dem MATLAB-Programm. Des Weiteren sind die Neigungs- und Schwenkwinkel abzulesen, welche für die Gelenksauswahl von Bedeutung sind. Hier sind in etwa ± 8 Grad Neigungswinkel und ± 5 Grad Schwenkwinkel für alle Bewegungen nötig.

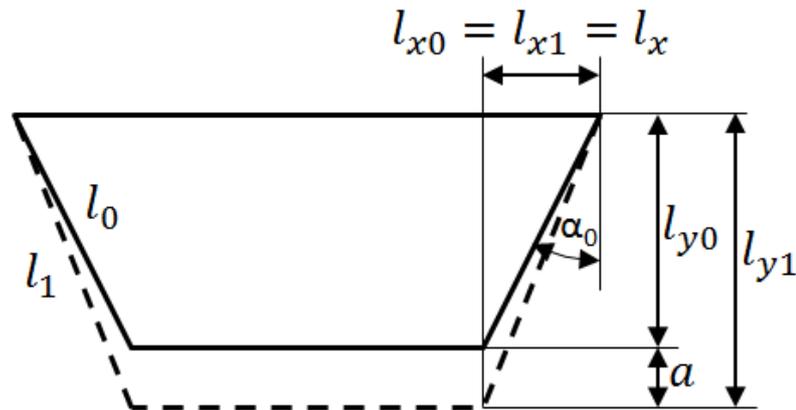
Stablänge	Stab 1	Stab 2	Stab 3	Stab 4	Stab 5	Stab 6
Maximum	64.779 mm	64.779 mm	64.458 mm	64.458 mm	64.418 mm	64.418 mm
Minimum	49.810 mm	49.810 mm	49.669 mm	49.669 mm	49.897 mm	49.897 mm
Änderung	14.969 mm	14.969 mm	14.788 mm	14.788 mm	14.521 mm	14.521 mm
Dehnung	30.05 %	30.05 %	29.77 %	29.77 %	29.10 %	29.10 %

Winkel	Stab 1	Stab 2	Stab 3	Stab 4	Stab 5	Stab 6
Neigungswinkel +	7.59 °	7.59 °	7.59 °	7.59 °	7.45 °	7.45 °
Neigungswinkel -	-8.01 °	-8.01 °	-7.53 °	-7.53 °	-7.64 °	-7.64 °
Schwenkwinkel +	4.30 °	3.89 °	4.23 °	4.86 °	4.44 °	3.68 °
Schwenkwinkel -	-3.89 °	-4.30 °	-4.86 °	-4.23 °	-3.68 °	-4.44 °

Abbildung 7.1: Längen und Winkel der einzelnen Stäbe,
Quelle: Scharf (2015), Präsentation für Heidenhain.

Außerdem ist durch das MATLAB-Programm eine interessante Tatsache erkennbar, der Effekt bei Verlängerung der Stablängen (Stablängeneffekt). Dieser bewirkt, dass die Höhenverschiebung der Endplattform größer ist als die Längenänderung der sechs Verbindungsstreben. Um diesen Effekt zu verstehen stellt Abbildung 7.2 eine zweidimensionale vereinfachte Skizze dar. Das im Vollen gezeichnete Viereck zeigt die ursprüngliche Konfiguration, die unterbrochenen Linien wie das System aussieht, wenn jeder Stab um Δl verlängert wird.

Für gegebene Anfangswerte von 60 Millimeter Stablänge und einem Winkel von 38 Grad ergibt sich: Eine Stablängenveränderung von 1 Millimeter bewirkt eine Höhenverschiebung von 3,75 Millimeter. Die Berechnung hierfür befindet sich im Anhang G.



Stablängenänderung: $\Delta l = l_1 - l_0$

Höhenverschiebung ist größer als Stablängenänderung:

$$a > \Delta l$$

Abbildung 7.2: Stablängeneffekt,
Quelle: Eigene Darstellung.

Dieser Stablängeneffekt ist unter anderem der Grund für eine weitere Erkenntnis. Die kleinste Schrittweite darf nicht größer als ± 50 Nanometer betragen, da sonst die Positionieranforderungen an den Hexapoden nicht erreicht werden können. Diese kleinste Schrittweite wurde erst spät bei diesem Projekt sichtbar und schränkt die Auswahl an möglichen Komponenten ein.

Die Plausibilität dieses Wertes wird nun kurz überprüft. Für eine Drehung von einem Mikro-Radian muss ein Stab von einem Meter Länge an einem Ende um einen Mikrometer verschoben werden. Somit ergibt sich für einen Mikro-Radian und einem Meter eine Verschiebung von einem Mikrometer. Dies wird nun umgemünzt auf dieses Projekt. Hier ist eine Drehung von drei Mikro-Radianen gefordert, wobei die Plattform nur 40 Millimeter Durchmesser besitzt. Daraus ergibt sich eine vertikale Verschiebung an einem Ende der Plattform von 120 Nanometer. Somit stellt diese vertikale Verschiebung das Limit dar, um die Genauigkeiten für die Rotation zu erreichen. Die 120 Nanometer werden in diesem Fall mit dem Stablängeneffekt noch kleiner, wonach die errechneten ± 50 Nanometer durchaus plausibel erscheinen.

Die geforderten translatorischen Toleranzen von drei Mikrometern können allerdings mit einer Messgenauigkeit von bereits einem Mikrometer bei der Stablängenbestimmung gut eingehalten werden.

Bei dieser hoch zu realisierenden Genauigkeit ist auch der Temperatureinfluss zu beachten. Ein 60 Millimeter langer Stahlstab (Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha = 11,7 \mu\text{m/mK}$) erfährt schon eine Längenänderung von 50 Nanometern durch eine Temperaturänderung von 0,07 Kelvin. (Formel: $\Delta l = l_0 * \alpha * \Delta T$). Dadurch wird die Verwendung von temperaturstabilen Werkstoffen, wie in Abschnitt 2.2.5 (Materialien) beschrieben, durchaus bestätigt. Für einen aus Invar (Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha = 0,8 \mu\text{m/mK}$) bestehenden 60 Millimeter langen Stab ergibt sich bereits eine zulässige Temperaturänderung von etwa einem Kelvin.

7.2. Vergleich zu anderen Hexapoden

In Tabelle 7.1 werden die Eigenschaften von dem zu entwickelnden Hexapoden mit zwei erwerbbaaren Hexapoden verglichen. Zum einen der Hexapod H-811 von Physik Instrumente, dessen vollständiges Datenblatt in Anhang B zu finden ist, zum anderen der Hexapod H-824, ebenfalls von Physik Instrumente.

Aus den rot markierten Stellen ist ersichtlich, dass die rechnerische Aktorauflösung durchaus in einem Bereich liegt, in dem sich auch die erhältlichen Hexapoden befinden. Ebenso liegt die Genauigkeit für die Rotation in derselben Größenordnung, welche die Aktorauflösung von ± 50 Nanometer erfordert. Die Wiederholgenauigkeit für Translation von ± 3 Mikrometer stellt kein Problem dar, und wird bei einem fertigen Produkt ebenfalls in der Größenordnung der anderen Produkte erwartet.

	IFT	PI H-811	PI H-824.Gxx	
Stellweg* X, Y, Z	± 2	$\pm 17, \pm 16, \pm 6,5$	$\pm 22,5 / \pm 22,5 / \pm 12,5$	mm
Stellweg* $\theta X, \theta Y, \theta Z$	$\pm 3,5$	$\pm 10, \pm 10, \pm 21$	$\pm 7,5 / \pm 7,5 / \pm 12,5$	°
Rechnerische Aktorauflösung	± 50 (Stabgenauigkeit)	40	7	nm
Wiederholgenauigkeit X, Y	± 3	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	μm
Wiederholgenauigkeit Z	± 3	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	μm
Wiederholgenauigkeit $\theta X, \theta Y$	± 3	± 4	± 2	μrad
Wiederholgenauigkeit θZ	± 3	± 8	$\pm 2,5$	μrad
Motortyp	?	Bürstenloser DC-Motor	DC-Getriebemotor	

*Tabelle 7.1: Vergleich zu anderen Hexapoden,
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an
Physik Instrumente (2015) Onlinequelle [03.08.2015].*

7.3. Weitere Vorgangsweise

Für eine gewünschte unkonventionelle Lösung wurden in Kapitel 6 die Formstrukturen für einen fluidischen Aktor behandelt, welche allerdings einen nicht ausreichenden Weg liefern. Eine gefundene Möglichkeit für eine neue Technologie behandelt einen hydraulisch verformbaren Membranzylinder. Allerdings ist dieser für eine Fertigung nicht weit genug entwickelt, hierfür bedarf es einer umfangreichen Studie. Ob Heidenhain Interesse an dieser Technologie-Entwicklung hat steht zum Zeitpunkt dieser wissenschaftlichen Arbeit noch nicht fest. Primär soll an einer Umsetzung eines Hexapoden aus bekannter Technologie gearbeitet werden, ein solches Konzept zeigt Abbildung 7.3. Dies ist eine Hybridlösung, welche bereits in Abschnitt 2.2.3 (Hybrid-Antrieb) beschrieben wurde.

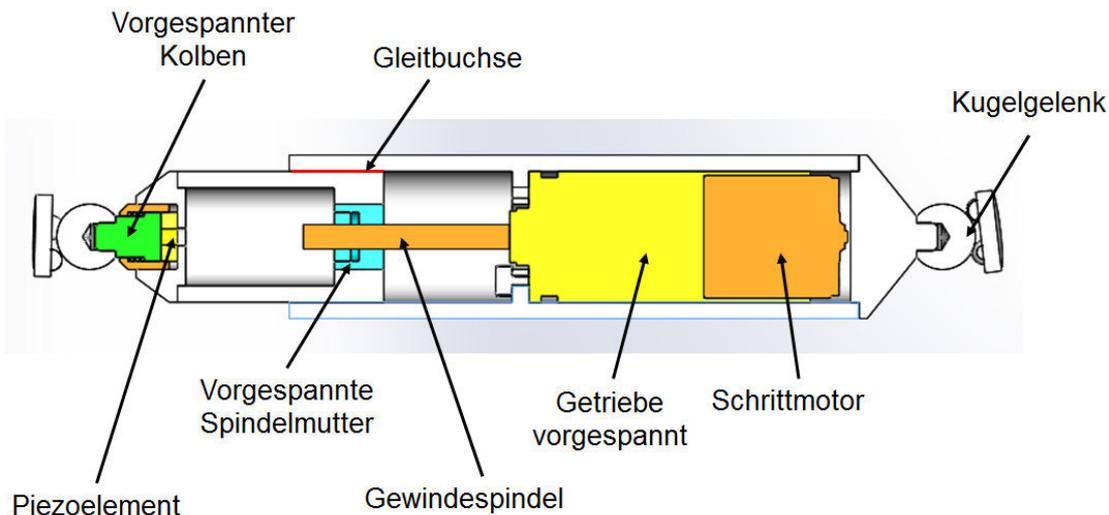


Abbildung 7.3: Konzept einer elektrischen Lösung mit Motor, Getriebe, Gewindespindel und Piezoelement, Quelle: Eigene Darstellung.

Für eine schnelle und grobe Positionierung wird eine Motor-Getriebe-Spindel Einheit verwendet. Die exakte Feinpositionierung erfolgt im Anschluss durch ein Piezoelement. Durch diese Kombination sind große Verfahrswege bei hoher Auflösung möglich. Voraussetzung dafür ist allerdings auch das geeignete Messsystem. Hierfür ist Heidenhain der ideale Industriepartner um geeignete Möglichkeiten zu finden.

Da ± 50 Nanometer temperaturstabil zu messen selbst für einen Messgerätehersteller eine Herausforderung darstellen, wird das Institut für Fertigungstechnik bei weiteren Entwicklungen von Heidenhain mit Ideen unterstützt. Ein erstes Konzept dafür behandelt eine mehrstufige Qualifizierung:

- „Messsystem bestehend aus einem 2D - LIP 6000 für die Erfassung der x- und y-Verschiebung. Die z- Verschiebung, Rx- und Ry- Drehung könnten mit drei kapazitiven Sensoren erfasst werden. Die zulässigen Ranges in Rz-, Rx- und Ry-Richtung liegen dabei allerdings im Bereich von ca. 5 mRad in z- Richtung bei ca. +/- 0,2 mm.“
- Zunächst muss das thermische Verhalten eines solchen Messsystems im Kurzschlussbügel in Neutralstellung bestimmt werden. Hierbei könnten Driftbewegungen in Mess- und Strichrichtung, sowie Moriè-Drehungen über 3 LIP-Encoder (1x Messrichtung, 2x Strichrichtung der VoiceCoil-Vorrichtung) detektiert werden.
- Im Anschluss könnte diese Messung an weiteren z-Positionen wiederholt werden, um evtl. Ortsabhängigkeiten im Driftverhalten detektieren zu können.“

Des Weiteren forscht Heidenhain seit einiger Zeit an einem 6D-Messsystem, welches zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit des Hexapoden verwendet werden kann. Hierbei kann wohl nur ein eingeschränkter Temperaturbereich betrachtet werden.

Dadurch, dass die Anforderungen an die Verbindungsstäbe ermittelt sind, wird am Institut für Fertigungstechnik bereits an dessen Umsetzung gearbeitet. Hierfür werden verschiedene elektrische Motoren getestet und auf ihre Eignung überprüft. Das nächste unmittelbare Ziel ist die Entwicklung einer kompletten Verbindungsstrecke inklusive verbauter Gelenke und dessen Test.

Literaturverzeichnis

Abedinnasab, Mohammad H; Yoon, Yong-Jin; Zohoor, Hassan (2012): **Exploiting Higher Kinematic Performance – Using a 4-Legged Redundant PM Rather than Gough-Stewart Platforms**, in: Kucuk, Serdar: Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Dynamics, Control and Optimization, InTech, ISBN 978-953-51-0437-7, S. 43-66

<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/34393.pdf> [Stand 03.08.2015]

Ben-Horin, Ronen; Shoham, Moshe; Djerassi, Shlomo (1999): **Kinematics, Dynamics and construction of a planarly actuated parallel robot**, ohne Verlagsangaben

http://robotics.technion.ac.il/Publications/kin_dyn_const_of_planar_act_parall_robot.pdf [Stand 03.08.2015]

Beyer, Lukas (2004): **Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern**: Insbesondere mit Parallelkinematik, ISBN 3-8322-3681-3, Shaker Verlag, Hamburg

Burde Metall (2015): **Imphy Nickellegierungen**

<http://www.burde-metall.at/FeNi2.htm#seitenanfang> [Stand 03.08.2015]

Clinton, Charles M.; Zhang, Guangming; Wavering, Albert J. (1997): **Stiffness Modeling of a Stewart Platform Based Milling Machine**, ohne Verlagsangaben

<http://hdl.handle.net/1903/5859> [Stand 03.08.2015]

Dürschmied, Frank; INA (Hrsg.) (1999), **Baugruppen für parallele Kinematiken**, in: INA-Sonderdruck aus „Werkstatt und Betrieb“, Heft Nr. 5, Carl Hanser Verlag, München

http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/reprint/downloads_16/bpk_de_de.pdf

EOS e Manufacturing Solution (2015) <http://www.eos.info/werkstoffe-m> [Stand 03.08.2015]

Harmonic Drive AG (2015): <http://harmonicdrive.de/startseite/> [Stand 03.08.2015]

Heidenhain (2015), <http://www.heidenhain.at> [Stand 03.08.2015]

Heidenhain (Hrsg.); Pucher, Wolfgang; Urban, Florian (2014): **Lastenheft zur Entwicklung einer temperaturstabilen 6D-Verstelleinheit**, ohne Verlagsangaben, Traunreut

Heidenhain (Hrsg.); Pucher, Wolfgang; Urban, Florian: **Lastenheft zur Entwicklung einer temperaturstabilen 6D-Verstelleinheit (modifiziertes Lastenheft)**, ohne Verlagsangaben, Traunreut

Hentschl, Thomas (2012): **Arbeitskinematik an ebenen und räumlichen**

Getriebestrukturen, ohne Verlagsangaben [https://tu-](https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ifv/vl/baumaschinen/lehre/vlhexapod)

[dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ifv/vl/baumaschinen/lehre/vlhexapod](https://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/ifv/vl/baumaschinen/lehre/vlhexapod) [Stand 03.08.2015]

Hoffmann, Holger (2006): **Piezo-Antriebe Millimeter-Stellwege mit Nanometer-Auflösung**, in: Polyscope, Ausgabe 19/2006, S. 41-43

<http://www.polyscope.ch/site/assets/files/14741/ps-19-06-dyneos.pdf> [Stand 03.08.2015]

McMahon, Jim, (2011): **New Generation of Hexapods Deliver Sub-Micron Resolution for Ultra-Precision Applications**, in: ECN – Electronic Component News, <http://www.ecnmag.com/articles/2011/05/new-generation-hexapods-deliver-sub-micron-resolution-ultra-precision-applications> [Stand 03.08.2015]

Neugebauer, Reimund (2004): **Parallel Kinematic Machines in Research and Practice**, The 4th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, Verlag Wissenschaftliche Skripten, Zwickau, ISBN: 978-3-937524-05-4

Nguyen, Charles C.; Antrazi, Sami C.; Zhou, Zhen-Lei; Campbell, Charles E. (1991): **Analysis and implementation of a 6 DOF Stewart Platform-based robotic wrist**, in Journal: Computers and Electrical Engineering - Robotics research at the NASA/Goddard Space Flight Center, Volume 17, Issue 3, S.191-203

Physik Instrumente (PI) (2015): <http://www.physikinstrumente.de/> [Stand 03.08.2015]
<http://www.physikinstrumente.de/technologie.html>
<http://www.physikinstrumente.de/produkte.html>
<http://www.physikinstrumente.de/produkte/parallelkinematische-hexapoden.html>
<http://www.physikinstrumente.de/technologie/piezo-antriebstechnologien.html>

QiOptiq Photonics for Innovation (2015): <https://www.qioptiq-shop.com/Optomechanik/Positionierer/LUMINOS-Nanopositionierer/Sechssachspositionierer-l6000.html> [Stand 03.08.2015]

Sammer, A. Joshi; Lung-Wen Tasi (2002): **The Kinematics of a Class of 3-DOF 4-Legged Parallel Manipulators**, from: ASME 2002 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Volume 5, Montreal, Canada

Scharf, Martin (2015), Präsentation für Heidenhain, Institut für Fertigungstechnik

Schott AG (2015): **ZERODUR® Glaskeramik mit extrem niedriger thermischer Ausdehnung**, http://www.schott.com/advanced_optics/german/syn/advanced_optics/products/optical-materials/zerodur-extremely-low-expansion-glass-ceramic/zerodur/index.html?so=austria&lang=german [Stand 03.08.2015]

Sommer, H.J.; The Pennsylvania State University (Hrsg.): **eXperimental Kinematics Lab (XKL)**, ohne Verlagsangaben <http://www.mne.psu.edu/sommer/xkl/> [Stand 03.08.2015]

Spanner, Karl (1992): **Piezoantriebe für extrem hohe Positionierungsgenauigkeit**, in Jung, Artur; Becker, J.; Beckstette, K.; Ernst, A.; Knohl E. D.; Kübler, Chr.; Langenbeck, P.; Richter, W.; Spanner, K: Genaue Maschinen, Geräte und Instrumente, Entwicklung, Konstruktion und Anwendung, Expert-Verlag, Ehningen bei Böblingen, S. 162ff- ISBN 3-8169-0745-8

Suter Kunststoffe AG (2015): **Faserverbund- Werkstoffdaten** <http://www.swiss-composite.ch/pdf/i-Werkstoffdaten.pdf> [Stand 03.08.2015]

WAYCON (2015) Wirbelstromsensoren Serie TX, <http://www.waycon-engineering.de/produkte/wirbelstromsensoren/> [Stand 03.08.2015]

Winner, Hermann; Hakuli, Stephan, Wolf, Gabriel; Singer, Christina (Hrsg.) (2012): **Handbuch Fahrerassistenzsysteme**, Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 3. Auflage, Springer Verlag, ISBN: 978-3-8348-8619-4

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Koordinatendefinition, Quelle: Heidenhain/Pucher/Urban (2014), S. 4.	2
Abbildung 1.2: Klimakammer, Quelle: Heidenhain/Pucher/Urban (2014), S. 6.....	3
Abbildung 1.3: Absolute Genauigkeit und Wiederholgenauigkeit, Quelle: Beyer (2004), S. 6.	4
Abbildung 2.1: Positionierungsplattform, Quelle: Physik Instrumente (2015), Onlinequelle [03.08.2015].	5
Abbildung 2.2: Serielle Kinematik (links) und parallele Kinematik (rechts), Quelle: McMahon (2015), Onlinequelle [03.08.2015].	6
Abbildung 2.3: Serieller Sechssachspositionierer Quelle: QiOptic (2015), Onlinequelle [03.08.2015].	7
Abbildung 2.4: Hexapod (links) und SpaceFAB mit drei Stäben und drei XY-Verstellische (rechts), Quelle: Physik Instrumente (2015), Onlinequelle [03.08.2015].	8
Abbildung 2.5: „Gough-Stewart Platform“ Quelle: Ben-Horin/Shoham/Djerassi (1999),S. 2 Onlinequelle [03.08.2015].....	9
Abbildung 2.6: Tricept überbestimmt (links), Hexapod überbestimmt (rechts) Quelle: Sammer/Lung-Wen (2002), Onlinequelle [03.08.2015] und Ben-Horin/Shoham/Djerassi (1999), S. 2 (modifiziert) Onlinequelle [03.08.2015].....	10
Abbildung 2.7: SpaceFAB mit 6 starren Stäben, Quelle: The Pennsylvania State University, Onlinequelle [03.08.2015].....	11
Abbildung 2.8: weitere Bauweisen (statisch bestimmt links, überbestimmt rechts), Quelle: Abedinnasab/Yong-Jin/Hassan (2012), S. 45, Onlinequelle [03.08.2015].	11
Abbildung 2.9: Parallelkinematik mit konstanter Stablänge, Bewegung durch Heben und Senken der Ankerpunkte, Quelle: McMahon (2015), Onlinequelle [03.08.2015].	12
Abbildung 2.10: Piezoantriebe, Quelle: In Anlehnung an Physik Instrumente, Onlinequelle [Stand 03.08.2015].	13
Abbildung 2.11: Prinzip eines Mikrostellisches mit Hybrid-Nanopositioniersystem Quelle: Hoffmann (2006), S. 42, Onlinequelle [03.08.2015].	15
Abbildung 2.12: Festkörpergelenk eines Hexapoden, Quelle: McMahon (2015), Onlinequelle [03.08.2015].	15
Abbildung 2.13: (a) Modell eines Kugellagers und (b) Realisation Quelle: Neugebauer (2004), S.494.	16
Abbildung 2.14: Kardangelenke eines Hexapoden, links ohne Achsversatz & rechts mit Achsversatz, Quelle: Hentschl (2012), Onlinequelle [03.08.2015].	16
Abbildung 3.1: Bauraum Quelle: Eigene Darstellung.	20
Abbildung 3.2: Aktorkonzepte: V01: fluidischer Aktor; V02: fluidischer Aktor mit Festkörpergelenk- Formstruktur (groß); V03: fluidischer Aktor mit Festkörpergelenk- Formstruktur (klein); V04: fluidischer Aktor mit gebogener Festkörper- Formstruktur Quelle: Heidenhain/Pucher/Urban (2015), S. 4.....	21
Abbildung 4.1: Kinematische Kette, Quelle: Hentschl (2012), Onlinequelle [03.08.2015].	22
Abbildung 4.2: schematischer Hexapod, Quelle: Nguyen u. a. (1991), S. 194 (modifiziert)...	23
Abbildung 4.3: Grafisches Interface des MATLAB Programmes, Quelle: Scharf (2015), Präsentation für Heidenhain.	25

Abbildung 5.1: Hexapod Dummy ohne (links) und mit Kugelgelenken (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.....	26
Abbildung 5.2: Zusammenspiel der Programme, Quelle: Eigene Darstellung.....	28
Abbildung 5.3: Konfigurationen eines Hexapoden, Quelle: Eigene Darstellung.....	29
Abbildung 5.4: Bauraum: veränderliche Höhe des Hexapoden, Quelle: Eigene Darstellung.....	30
Abbildung 5.5: Steifigkeitsverlauf: Hexapodmodell aus einem Bauteil ohne Kontaktbedingungen, Quelle: Eigene Darstellung.....	31
Abbildung 5.6: Steifigkeitsverlauf: Hexapod mit reibungsfreien Kugelgelenken, Quelle: Eigene Darstellung.....	32
Abbildung 5.7: Steifigkeitsverlauf: Hexapod mit reibungsfreien Kugelgelenken und starrer Plattform, Quelle: Eigene Darstellung.....	33
Abbildung 5.8: Vergleich der Ergebnisse, Quelle: Eigene Darstellung.....	33
Abbildung 5.9: Bauraum: Doppelter Tricept in X-Ausrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.....	34
Abbildung 5.10: Bauraum: Doppelter Tricept in Y-Ausrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.....	35
Abbildung 5.11: Vergleich der betrachteten System, Quelle: Eigene Darstellung.....	36
Abbildung 5.12: Steifigkeit für verschiedene Positionen, Quelle: Eigene Darstellung.....	37
Abbildung 6.1: Verschiedene Ansätze von Formstrukturen, Quelle: Eigene Darstellung.....	38
Abbildung 6.2: Geometrie des Membranzylinders, Quelle: Eigene Darstellung.....	40
Abbildung 6.3: Gegenüberstellung von 2 Titanlegierungen zum Lasersintern, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: EOS e-Manufacturing Solution (2015), Onlinequelle [03.08.2015].....	41
Abbildung 6.4: Berechnungsprotokoll, Quelle: Eigene Darstellung.....	42
Abbildung 6.5: Elementgröße 0,2 Millimeter, Quelle: Eigene Darstellung.....	43
Abbildung 6.6: Geometrie mit steilen Windungen (links) Geometrie ohne Hinterschnitt (mitte) und Geometrie mit Hinterschnitt (rechts), Neutrale Faser in grün dargestellt, Quelle: Eigene Darstellung.....	43
Abbildung 6.7: Fluidischer Aktor mit zwölf Windungen, Quelle: Eigene Darstellung.....	45
Abbildung 6.8: Fertigung des fluidischen Aktors, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Anton Paar (2015).....	45
Abbildung 6.9: Halbschnitt durch fluidischen Aktor, Quelle: Eigene Darstellung.....	46
Abbildung 6.10: Fluidischer Aktor mit Wirbelstromsensor, Quelle: Eigene Darstellung.....	47
Abbildung 6.11: Konzept des fluidischen Aktors mit selbst erzeugbaren Kugellagern, Quelle: Eigene Darstellung.....	47
Abbildung 6.12: Hydraulischer Aktor für doppelten Tricept in Y-Ausführung, Quelle: Eigene Darstellung.....	48
Abbildung 7.1: Längen und Winkel der einzelnen Stäbe, Quelle: Scharf (2015), Präsentation für Heidenhain.....	49
Abbildung 7.2: Stablängeneffekt, Quelle: Eigene Darstellung.....	50
Abbildung 7.3: Konzept einer elektrischen Lösung mit Motor, Getriebe, Gewindespindel und Piezoelement, Quelle: Eigene Darstellung.....	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Anforderungen, Quelle: Heidenhain/Pucher/Urban (2014), S. 4 (leicht modifiziert).....	2
Tabelle 2.1: Serielle und parallele Kinematik (Beurteilung im Ampelsystem), Quelle: In Anlehnung an Physik Instrumente (2015), Onlinequelle [03.08.2015] und in Anlehnung an McMahon (2015), Onlinequelle [03.08.2015].	7
Tabelle 2.2: Gegenüberstellung parallele Kinematik (Beurteilung im Ampelsystem), Quelle: In Anlehnung an Physik Instrumente (2015), Onlinequelle [03.08.2015].	9
Tabelle 2.3: Temperaturstabile Werkstoffe Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an: Schott AG (2015), Onlinequelle [03.08.2015] Burde & Co (2015), Onlinequelle [03.08.2015] Suter Kunststoffe AG (2015), Onlinequelle [03.08.2015].	18
Tabelle 3.1: Modifiziertes Lastenheft (vgl. Tabelle 1.1), Quelle: Heidenhain/Pucher/Urban (2015), S. 4.	19
Tabelle 5.1 Oberfläche des Excel Files der Steifigkeitsanalyse, Quelle: Eigene Darstellung.	27
Tabelle 5.2: Steifigkeit eines Hexapoden bei unterschiedlicher Konfiguration, Quelle: Eigene Darstellung.	30
Tabelle 5.3: Vergleichssteifigkeiten: Doppelter Tricept in X-Ausrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.	34
Tabelle 5.4: Vergleichssteifigkeiten: Doppelter Tricept in Y-Ausrichtung, Quelle: Eigene Darstellung.	35
Tabelle 5.5: Angefahrene Positionen für die Steifigkeitsberechnung, Quelle: Eigene Darstellung.	36
Tabelle 7.1: Vergleich zu anderen Hexapoden, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Physik Instrumente (2015) Onlinequelle [03.08.2015].....	51

Anhang

Im Folgenden werden alle weiterführenden Informationen zu diesem Projekt zur Verfügung gestellt.

Anhang A: zu Kapitel 1: Einführung

Auf den folgenden Seiten ist das Lastenheft des Unternehmens Heidenhain mit Stand 14. Februar 2014 dargestellt.



Mögliches Kooperationsprojekt ift TU Graz/HEIDENHAIN

F. Urban
MG-E IV
14.02.2014

Lastenheft zur Entwicklung einer temperaturstabilen 6D-Verstelleinheit



Einführung

F. Urban
MG-E IV
14.02.2014

- Anforderer:** Dr. Johannes Heidenhain GmbH
Entwicklungsabteilung für offene Messgeräte MG-E IV
- Betreiber:** Dr. Johannes Heidenhain GmbH
Entwicklungsabteilung für offene Messgeräte MG-E IV
- Entwickler:** Abschlussarbeit(en) ift TU Graz
Institut für Fertigungstechnik
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Franz Haas

Allgemeine Beschreibung der Aufgabe

Es ist eine Vorrichtung (6-Achsversteller) zur Untersuchung des Anbaueinflusses auf das Signalverhalten und die Interpolationsfehler von offenen Längen- und Winkelmessgeräten zu entwickeln.

Diese Untersuchungen erfordern eine gezielte Veränderung der Encoderposition gegenüber der Maßverkörperung entsprechend der im Datenblatt angegebenen Anbautoleranzen.

Durch die zu entwickelnde Vorrichtung sollen, neben Typprüfungen bei Raumtemperatur, Tests unter thermischer Last in einer Klimakammer durchgeführt werden.



Ausgangssituation und allgemeine Informationen

F. Urban
MG-E IV
14.02.2014

Vergleich mit bestehenden Betriebsmitteln:

- In der Abteilung MG-E IV werden derzeit Tests zur Untersuchung des Anbaueinflusses mit einer piezobewegten 5-Achsverstelleinheit durchgeführt. Diese Verstelleinheit bietet nicht die nötigen Verfahrenswege zur Prüfung aller, im Datenblatt aktuell entwickelter Messgeräte, angegeben Anbautoleranzen.
- Zudem sind mit dieser Vorrichtung lediglich Messungen bei Raumtemperatur möglich. Bei zukünftigen Signal- und Interpolationsfehlermessungen soll der Anbaueinfluss gemeinsam mit dem Betriebstemperatureinfluss untersucht werden.

Allgemeine Anforderungen an die zu entwickelnde Vorrichtung:

- Prüfung im Temperaturbereich von -20°C ... $+80^{\circ}\text{C}$ in einer Klimakammer
- Schneller Anbau der Prüflinge mit hoher Anbaureproduzierbarkeit des 6D-Verstellers
- Feinabgleich erfolgt online durch Signalmaximierung

Nicht Aufgabenbestandteil für das ift der TU-Graz:

- Auswertung aller Encodersignale
- Gleichmäßige Relativbewegung zwischen Encoder und Maßverkörperung
 - Konzeptentwicklung zu homogen bewegten Maßstab im Rahmen einer Masterarbeit ab März 2014 bei JH



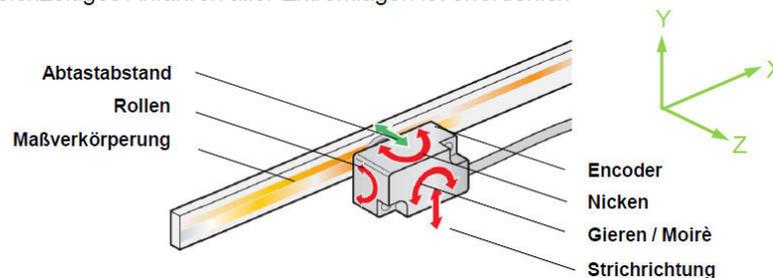
Anforderungsprofil

F. Urban
MG-E IV
14.02.2014

> Anforderungen an die Positionierung der Encoder

	Abtastabstand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]	Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]
Erforderlicher Verfahrensweg	$\pm 3 \text{ mm}$	$\pm 3 \text{ mm}$	$\pm 3 \text{ mm}$	$\pm 60 \text{ mRad}$	$\pm 60 \text{ mRad}$	$\pm 60 \text{ mRad}$
Kleinste Schrittweite	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{Rad}$
Anbauproduzierbarkeit (Montage, danach Feinabgleich)	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{Rad}$
Absolute Verstellgenauigkeit	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{Rad}$
Wiederholgenauigkeit	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$
Umkehrspiel	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$
Max. Geschwindigkeit	$> 0,5 \text{ mm/s}$	$> 0,5 \text{ mm/s}$	$> 0,5 \text{ mm/s}$	$> 0,5 \text{ mRad/s}$	$> 0,5 \text{ mRad/s}$	$> 0,5 \text{ mRad/s}$
Steifigkeit	$4 \text{ N}/\mu\text{m}$	$4 \text{ N}/\mu\text{m}$	$4 \text{ N}/\mu\text{m}$	2 Nm/mrad	2 Nm/mrad	2 Nm/mrad

- Es sollen sowohl einzelne Freiheitsgrade, als auch beliebige Kombinationen der 5/6 Freiheitsgrade verfahren werden
- Ein gleichzeitiges Anfahren aller Extremlagen ist erforderlich



Anforderungsprofil

F. Urban
MG-E IV
14.02.2014

> Betriebstemperaturbereich

- 20°C bis +80°C
- Betauungsschutz aktiv

> Zulässiger Temperaturdrift

- Im Rahmen der in der Tabelle angegebenen absoluten Verstellgenauigkeit

> Traglast der Verstelleinheit

- Grundplatte horizontal / Grundplatte vertikal: 0,5 kg / 0,5 kg
- Im Zuge der Konstruktion kann eine Orientierung festgelegt werden, dadurch wird die Traglast bei anderer Orientierung obsolet

> Folgende Messgeräte sollen mit der Vorrichtung untersucht werden.

- LIC 41xx; LIC 21xx; LIDA 4xx; LIDA 2xx
- LIP 2xx; LIP 3xx; LIP 4xx; LIP 5xx; LIP 6xxx; LIF 1xx; LIF 4xx
- (ERO 2xxx, ERP 1xxx, ERA 4/7/8xxx, ECA 4/8xxx)
- Für die JH-Messgeräte sind Adapter für das gewählte Montagekonzept zu entwickeln

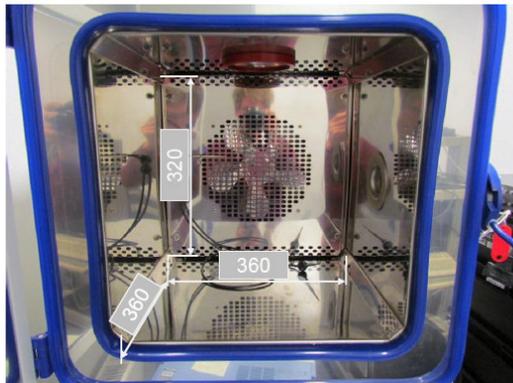


Anforderungsprofil

F. Urban
MG-E IV
14.02.2014

➤ Abmessungen/Montage

- 6-Achs-Versteller soll direkt auf der Verfahreinheit montiert werden
- 170mm x 340mm x 150mm (BxTxH) – Abmessungen des verfügbaren Raums für eine 6D-Verstelleinheit.
- Es sollen mindestens zwei Verfahreinheiten incl. 6-Achsversteller nebeneinander in der Klimakammer betrieben werden.



Verfügbarer Innenraum der Klimakammer



Verbleibender Innenraum über der Voice-Coil-Verfahrvorrichtung



Anforderungsprofil

F. Urban
MG-E IV
14.02.2014

➤ Maximales Gewicht der 6D-Verstelleinheit

- 3kg

➤ Steuerung und Software

- Senden und Empfangen einzelner String-Befehle über COM-Schnittstelle zur Kommunikation zwischen 6D-Versteller-Steuerung und JH-Prüfsoftware
- Prüfabläufe werden über JH-Prüfsoftware durch JH-Personal erstellt

➤ Medienführung

- Die Anzahl der erforderlichen Leitungen ist auf ein Minimum zu reduzieren
- Größe der Kabeldurchführung in die Klimakammer (\varnothing 50mm)

➤ Sicherheit

- Derzeit gültige Sicherheitsrichtlinien (EU, D, JH) sind einzuhalten. CE-Konformitätsprozess wird durch JH bearbeitet.
- Laserschutzklasse 1 müsste im Fall von eingesetzten Lasermessgeräten gewährleistet sein



Ablauf der Zusammenarbeit

F. Urban
MG-E IV
14.02.2014

➤ Ablauf

- Abschlussarbeit(en) durchgeführt am ift der TU Graz
- Abschlussarbeit(en) betreut durch Assistenten des ift der TU Graz
- Ansprechpartner ift der TU Graz: ???
- Ansprechpartner JH: Hr. Urban/(Dr. Pucher)
- Regelmäßige Treffen: 2-3 mal pro Jahr

➤ Nutzung von Schutzrechten

- Das ift der TU Graz räumt Heidenhain an Erfindungen, die im Rahmen der gemeinsamen Projekten entstehen, ein nicht-ausschließliches, unentgeltliches Nutzungsrecht ein.
- Das ift der TU Graz räumt Heidenhain eine Option auf Abschluss eines Vertrages über eine exklusive Lizenz zur Nutzung der Erfindungen gegen marktübliche Gegenleistung ein. Die Nutzungsrechte werden in einem abzuschließenden Lizenzvertrag geregelt.

➤ Termine

- Start: ab sofort
- Inbetriebnahme bis spätestens Ende 2015 abgeschlossen

Anhang B: zu Kapitel 2: Literatur

Auf den folgenden Seiten werden die verschiedenen Bewertungsbögen abgebildet, welche einen Vergleich der verschiedenen bestehenden Lösungen zulassen.

Des Weiteren ist das Datenblatt des Hexapoden „H-811“ von Physik-Instrumente dargestellt. Dieser Hexapod ist gewählt worden, weil dieser am ehesten die Anforderungen erfüllt und somit als Referenz gewählt wurde.¹⁴

¹⁴ Physik- Instrumente (2015), Onlinequelle [01.07.2015].

BEUTEILUNGSPROTOKOLL (leer)

	Abtastastand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]
Verfahrweg			
Kleinste Schrittweite			
Anbaureproduzierbarkeit (Montage, danach Feinabgleich)			
Absolute Verstellgenauigkeit			
Umkehrspiel			
Max. Geschwindigkeit			
Steifigkeit			

Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]

Betriebstemperaturbereich:
Maße:
Gewicht:

Quelle:

P-587 6-Achsen-Piezopräzisionsversteller (von Physik Instrumente)

	Abtastastand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]
Verfahrweg	200 μ m	800 μ m	800 μ m
Kleinste Schrittweite			
Anbaureproduzierbarkeit (Montage, danach Feinabgleich)			
Absolute Verstellgenauigkeit			
Umkehrspiel			
Max. Geschwindigkeit			
Steifigkeit	0,55N/ μ m	0,55N/ μ m	0,55N/ μ m

Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]
± 5 Rad	± 5 Rad	± 5 Rad

Betriebstemperaturbereich: -20 bis 80
Maße: 240 mm \times 240 mm \times 50 mm
Gewicht: 7,2kg
Große Stellwege, mit direkter Positionsmessung
Integrierter Sensor: Kapazitiv
Aufgrund der Parallelkinematik ist in der Extremposition der Kippwinkel keine lineare Bewegung in X oder Y gleichzeitig möglich.
Druck- / Zugbelastbarkeit in Stellrichtung: 50 / 10 N



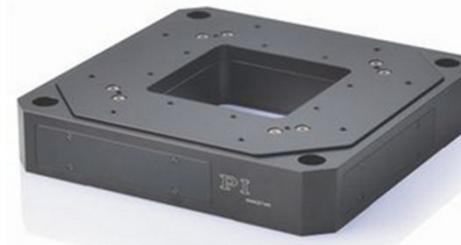
Quelle: Physik Instrumente (PI) (2015): <http://www.physikinstrumente.de/produkt-detailseite/p-587-201600.html> [Stand 03.08.2015]

P-562.6CD PIMars 6-Achsen-Piezosystem (von Physik Instrumente)

	Abtastastand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]
Verfahrweg	200µm	200µm	200µm
Kleinste Schrittweite			
Anbaureproduzierbarkeit (Montage, danach Feinabgleich)			
Absolute Verstellgenauigkeit			
Umkehrspiel			
Max. Geschwindigkeit			
Steifigkeit			

Gieren [θz]	Rollen [θx]	Nicken [θy]
±0,5mRad	±0,5mRad	±0,5mRad

Betriebstemperaturbereich: -20 bis 80°C
Maße: 150 x 150 x 30mm
Gewicht: 1,45kg
Druck- / Zugbelastbarkeit in Stellrichtung: 120 / 30 N
Belastbarkeit: 50N



Quelle: Physik Instrumente (PI) (2015): <http://www.physikinstrumente.de/produkt-detailseite/p-5626cd-201555.html> [Stand 03.08.2015]

SF-6500 PS SpaceFAB (von Physik Instrumente)

	Abtastastand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]
Verfahrweg	13mm	13mm	10mm
Kleinste Schrittweite			
Anbaureproduzierbarkeit (Montage, danach Feinabgleich)			
Absolute Verstellgenauigkeit			
Umkehrspiel			
Max. Geschwindigkeit	10mm/s	10mm/s	10mm/s
Steifigkeit			

Gieren [θz]	Rollen [θx]	Nicken [θy]
12°	12°	12°
5°/s	5°/s	5°/s

Betriebstemperaturbereich:
Maße: 206x276x60mm
Gewicht:
Load capacity up to 2 kg center mounted

SF-6500 PS SpaceFAB



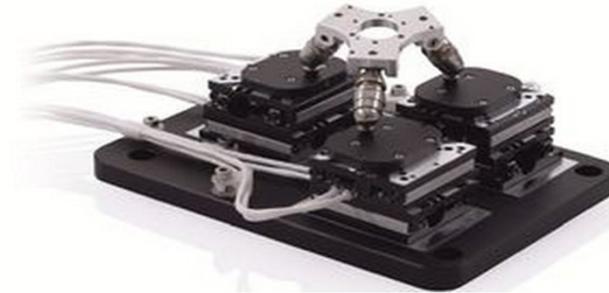
Quelle: Physik Instrumente (PI) (2015): <http://www.physikinstrumente.de/produkt-detailseite/sf-6500-ps-1204700.html> [Stand 03.08.2015]

SF-450 PS SpaceFAB (von Physik Instrumente)

	Abtastastand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]
Verfahrweg	13mm	13mm	10mm
Kleinste Schrittweite			
Anbaureproduzierbarkeit (Montage, danach Feinabgleich)			
Absolute Verstellgenauigkeit			
Umkehrspiel			
Max. Geschwindigkeit	10mm/s	10mm/s	10mm/s
Steifigkeit			

Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]
14°	14°	14°
5°/s	5°/s	5°/s

Betriebstemperaturbereich:
Maße: 171x199x80 mm
Gewicht:
Load capacity up to 1 kg center mounted is driven by pizo stick slip motor.



Quelle: Physik Instrumente (PI) (2015): <http://www.physikinstrumente.de/produkt-detailseite/sf-450-ps-1204600.html> [Stand 03.08.2015]

H-206 6-Achsen-Justiersystem (von Physik Instrumente)

	Abtastastand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]
Verfahrweg	-.8 bis 5,7mm	±5,7mm	±6,7mm
Kleinste Schrittweite	0,1µm	0,1µm	0,1µm
Anbaureproduzierbarkeit (Montage, danach Feinabgleich)			
Absolute Verstellgenauigkeit			
Umkehrspiel			
Max. Geschwindigkeit	10mm/s	10mm/s	10mm/s
Steifigkeit			

Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]
±5,7°	±6,6°	±5,5°
2µRad	2µRad	2µRad

Betriebstemperaturbereich: 5 bis 35°C
Maße: 220 x 269 x 158 mm
Gewicht: 5,8kg
Belastbarkeit (Grundplatte horizontal): 1,5kg



Quelle: Physik Instrumente (PI) (2015): <http://www.physikinstrumente.de/produkt-detailseite/h-206-700820.html> [Stand 03.08.2015]

COMMANDER 6 (von Fraunhofer Institut)

	Abtastastand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]
Verfahrweg	> ± 3 mm	> ± 3 mm	> ± 3 mm
Kleinste Schrittweite	< 50 nm	< 50 nm	< 50 nm
Anbaureproduzierbarkeit (Montage, danach Feinabgleich)			
Absolute Verstellgenauigkeit			
Umkehrspiel			
Max. Geschwindigkeit			
Steifigkeit			

Gieren [θz]	Rollen [θx]	Nicken [θy]
< 5 μrad	< 5 μrad	< 5 μrad

Betriebstemperaturbereich:

Maße: < 100 x 100 x 100 mm

Gewicht:



Quelle: Pressrelations (2015): http://www.pressrelations.de/new/standard/result_main.cfm?aktion=jour_pm&r=446439 [Stand 03.07.2015]

Sechssachspositionierer I6000 (von Luminos Industries)

	Abtastastand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]
Verfahrweg	12,7mm	2,5mm	2,5mm
Kleinste Schrittweite	0,1μm	0,04μm	0,04μm
Anbaureproduzierbarkeit (Montage, danach Feinabgleich)			
Absolute Verstellgenauigkeit			
Umkehrspiel			
Max. Geschwindigkeit			
Steifigkeit	0,13N/μm	0,095N/μm	0,04N/μm

Gieren [θz]	Rollen [θx]	Nicken [θy]
±1.5 degrees	±1.5 degrees	±1.5 degrees
0,5μRad	1μRad	1μRad
0,075Nm/mRad	0,1Nm/μRad	0,13Nm/μRad

Betriebstemperaturbereich: Temperaturstabil ??

Maße: 50 x 250 x 153 mm

Gewicht: 1,5kg

Traglast: 1kg bis 4,5kg



Quelle: Luminos Industries Ltd (2015): <http://luminos.com/products/positioners/hybrid/i6000/> [Stand 03.08.2015]

6- Achsen- Miniatur- Hexapod

SCHNELL, KOMPAKT UND HÖCHST PRÄZISE



H-811

- + Stellwege bis 34 mm / 42°
- + Belastbarkeit bis 5 kg
- + Aktorauflösung 40 nm
- + Kleinste Schrittweite bis 0,2 µm
- + Wiederholgenauigkeit bis ±0,1 µm
- + Mit integrierten Scanalgorithmen für faseroptische Justage
- + Geschwindigkeit bis 10 mm/ s
- + Vakuumversion verfügbar
- + Leistungsfähiger Controller mit Vektorsteuerung, virtueller Pivotpunkt
- + Umfangreiches Softwarepaket

6- Achsen- System der Referenzklasse

Parallelkinematischer Aufbau für sechs Freiheitsgrade, dadurch wesentlich kompakter und steifer als Seriellkinematik- Systeme, höhere Dynamik, keine bewegten Kabel: höhere Zuverlässigkeit, reduzierte Reibung. Version für Vakuumumgebung bis 10⁻⁶ hPa erhältlich

Direktantrieb mit bürstenlosen DC- Motoren (BLDC) und Kugelumlaufspindeln

Höchste Präzision, Geschwindigkeit und Zyklenzahlen

Leistungsfähiger Digitalcontroller, offene Softwarearchitektur

Stabiler Pivotpunkt, per Software im Raum frei wählbar. Positionsvorgabe in kartesischen Koordinaten. Makroprogrammierung.

Open- Source LabVIEW- Treiber und Bibliotheken. Simulation des Arbeitsraums. Virtuelle Maschine zur Hexapodemulation.

Optional: Software zur Vermeidung von Kollisionen.

H-811.xx1 inkl. C-887.11 6D- Controller für Hexapoden, inkl. Ansteuerung von zwei Zusatzachsen. Optionen:

- Analoge Schnittstellen- / Photometerkarten für sichtbares Licht (F-206.VVU) oder für den Infrarotbereich (F-206.iiU)
- F-206.NCU Schnelles Piezo- Nanojustiersystem für Justagen mit Nanometer- Präzision

H-811.xx2 inkl. kompaktem 6D- Controller C-887.21

Einsatzgebiete

Industrie und Forschung, auch in Vakuumumgebung. Für Mikrofertigung, Medizintechnik, Werkzeugkontrolle

Spezifikationen

	H-811.D1x	Einheit	Toleranz
Aktive Achsen	X, Y, Z, θ_x , θ_y , θ_z		

Bewegung und Positionieren			
Stellweg* X, Y, Z	±17, ±16, ±6,5	mm	
Stellweg* $\theta_x, \theta_y, \theta_z$	±10, ±10, ±21	°	
Rechnerische Aktoraufösung	40	nm	
Kleinste Schrittweite X, Y	0,5	μm	typ.
Kleinste Schrittweite Z	0,2	μm	typ.
Kleinste Schrittweite $\theta_x, \theta_y, \theta_z$	3,5	μrad	typ.
Umkehrspiel X, Y	1	μm	typ.
Umkehrspiel Z	0,2	μm	typ.
Umkehrspiel θ_x, θ_y	10	μrad	typ.
Umkehrspiel θ_z	15	μrad	typ.
Wiederholgenauigkeit X, Y	±0,3	μm	typ.
Wiederholgenauigkeit Z	±0,1	μm	typ.
Wiederholgenauigkeit θ_x, θ_y	±4	μrad	typ.
Wiederholgenauigkeit θ_z	±8	μrad	typ.
Max. Geschwindigkeit X, Y, Z	10	mm/ s	
Max. Geschwindigkeit $\theta_x, \theta_y, \theta_z$	250	mrads / s	
Typ. Geschwindigkeit X, Y, Z	5	mm/ s	
Typ. Geschwindigkeit $\theta_x, \theta_y, \theta_z$	120	mrads / s	
Mechanische Eigenschaften			
Steifigkeit X, Y	0,2	N/ μm	
Steifigkeit Z	3,6	N/ μm	
Belastbarkeit (Grundplatte horizontal / beliebig)	5 / 2,5	kg	max.
Haltekraft, unbestromt (Grundplatte horizontal / beliebig)	15 / 2,5	N	max.
Motortyp	Bürstenloser DC- Motor		
Anschlüsse und Umgebung			
Betriebstemperaturbereich	0 bis 50	°C	
Material	Edelstahl, Aluminium		
Masse	2,2	kg	±5 %
Kabellänge	2	m	±10 mm

Vakuumversionen bis 10^{-6} hPa sind erhältlich unter Bestellnummer H-811.DVx. Die Spezifikationen für Vakuumversionen können abweichen. Technische Daten werden bei 20 ± 3 °C spezifiziert.

* Die maximalen Stellwege der einzelnen Koordinaten (X, Y, Z, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$) sind voneinander abhängig. Die genannten Daten geben den maximalen Stellweg einzelner Achsen an, bei denen alle anderen Achsen und der Pivotpunkt auf Referenzposition stehen. Sonderausführungen auf Anfrage.

Bestellinformation

Bestellung als System inklusive Controller

H-811.D11

Miniatur- Hexapod- Mikroroboter, Direktantrieb, 10 mm/ s, 5 kg Last, 2 m Kabel, mit 6D- Controller für Hexapoden, inkl. Ansteuerung von zwei Zusatzachsen, TCP/ IP und RS-232- Schnittstelle, 19"- Chassis

H-811.D12

Miniatur- Hexapod- Mikroroboter, Direktantrieb, 10 mm/ s, 5 kg Last, 2 m Kabel, mit 6D- Controller für Hexapoden, TCP/ IP und RS-232- Schnittstelle, Tischgerät

H-811.DV1

Miniatur- Hexapod- Mikroroboter, Direktantrieb, 10 mm/ s, 5 kg Last, vakuumkompatibel bis 10^{-6} hPa, 2 m Kabel vakuumseitig, Durchführung, 3 m Kabel luftseitig, mit 6D- Controller für Hexapoden, inkl. Ansteuerung von zwei Zusatzachsen, TCP/ IP und RS-232- Schnittstelle, 19"- Chassis

H-811.DV2

Miniatur- Hexapod- Mikroroboter, Direktantrieb, 10 mm/ s, 5 kg Last, vakuumkompatibel bis 10^{-6} hPa, 2 m Kabel vakuumseitig, Durchführung, 3 m Kabel luftseitig, mit 6D- Controller für Hexapoden, TCP/ IP und RS-232- Schnittstelle, Tischgerät

Hexapodsysteme mit Feldbus- Schnittstelle

H-811.D31

Miniatur- Hexapod- Mikroroboter, Direktantrieb, 10 mm/ s, 5 kg Last, Kabelsatz 5 m, mit 6D- Controller für Hexapoden, EtherCAT®- Schnittstelle

Sonderausführungen auf Anfrage.

Die bisherigen M-811 Hexapoden werden durch die neuen H-811 Hexapodsysteine abgelöst. Mit den neuen Systemen wird auch ein erweiterter Funktionsumfang angeboten.

Für weitere Informationen [kontaktieren Sie bitte PI](#).

Controller / Treiber / Verstärker

[C-887 Controller für Hexapod- Positioniersysteme](#)

Verwandte Produkte

[H-206 6-Achsen-Justiersystem](#)

[H-810 6-Achsen-Miniatur-Hexapod](#)

[H-840 6-Achsen-Hexapod](#)

[H-850 6-Achsen-Hexapod](#)

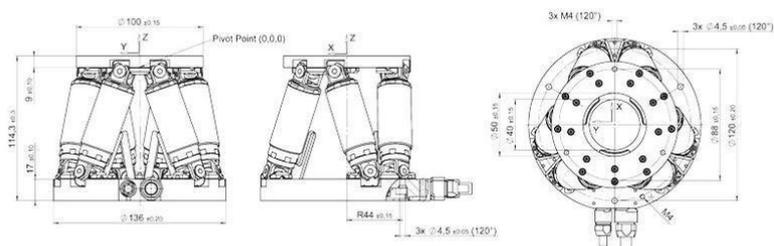
[H-824 6-Achsen-Hexapod](#)

Technologie

[Hexapodspezifische Software von PI | Hexapoden erfordern aufgrund ihres parallelkinematischen Aufbaus eine besonders komplexe Ansteuerung. Weiterlesen ...](#)

[Hexapoden – Parallelkinematische Positioniersysteme | Ein Hexapod ist ein System für die Bewegung und Positionierung, Justierung und Verschiebung von Lasten in sechs Achsen im Raum, drei linearen und drei rotatorischen. Weiterlesen ...](#)

Zeichnungen / Bilder



H-811,
Abmessungen in
mm



PI Hexapods are delivered as complete turnkey systems. In addition to the ordered controller configuration, immediate use is provided for with the included communication and interconnecting cables, peripheral devices and a substantial software package. The figure shows the H-850 high-load Hexapod and H-811 miniature Hexapod, the C-887.11, 19"-rackmount Hexapod controller and the C-887.21 compact controller

Anhang C: zu Kapitel 3: Lastenheft:

Auf den folgenden Seiten ist das modifizierte Lastenheft des Unternehmens Heidenhain mit Stand 11.März 2015 dargestellt.

Außerdem werden von Heidenhain übermittelte Zeichnungen dargestellt, welche den Bauraum deklarieren sowie die Anbauposition der Adapterplatte.



Anforderungsprofil

F. Urban
 MG-E IV
 11.03.2015

➤ Anforderungen an die Positionierung der Encoder

	Abtastabstand [Z]	Strichrichtung [Y]	Messrichtung [X]	Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]
Erforderlicher Verfahrensweg	$\pm 3 \text{ mm}$	$\pm 2 \text{ mm}$	$\pm 2 \text{ mm}$	$\pm 60 \text{ mRad}$ / Wunsch $\pm 90 \text{ mRad}$	$\pm 60 \text{ mRad}$	$\pm 60 \text{ mRad}$
Kleinste Schrittweite	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 5 \text{ }\mu\text{Rad}$
Anbaureproduzierbarkeit <small>(Montage, danach Feinabgleich)</small>	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 50 \text{ }\mu\text{Rad}$
Absolute Verstellgenauigkeit	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 10 \text{ }\mu\text{Rad}$
Wiederholgenauigkeit	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$
Umkehrspiel	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$	$\leq \pm 3 \text{ }\mu\text{Rad}$
Max. Geschwindigkeit	$> 0,5 \text{ mm/s}$	$> 0,5 \text{ mm/s}$	$> 0,5 \text{ mm/s}$	$> 0,5 \text{ mRad/s}$	$> 0,5 \text{ mRad/s}$	$> 0,5 \text{ mRad/s}$
Steifigkeit	$2\text{N}/\mu\text{m}$	$2\text{N}/\mu\text{m}$	$2\text{N}/\mu\text{m}$	so hoch als möglich		

- Es sollen sowohl einzelne Freiheitsgrade, als auch beliebige Kombinationen der 6 Freiheitsgrade verfahren werden
- Ein gleichzeitiges Anfahren aller Extremlagen ist erforderlich

Modifiziertes Lastenheft: Abgeänderte Anforderungen an die Positionierung und Steifigkeit

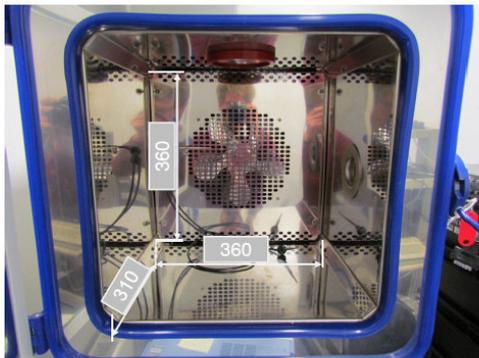


Anforderungsprofil

F. Urban
MG-E IV
11.03.2015

➤ Abmessungen/Montage

- 6-Achs-Versteller soll direkt auf der Verfahrenseinheit montiert werden. Eine Anschlussmaßzeichnung wird diesem Lastenheft beigelegt
- 170mm x 310mm x 200mm (BxTxH) – Abmessungen des verfügbaren Raums für eine 6D-Verstelleinheit.
- Es sollen mindestens zwei Verfahrenseinheiten incl. 6-Achsversteller nebeneinander in der Klimakammer betrieben werden.



Verfügbarer Innenraum der Klimakammer



Verbleibender Innenraum über der Voice-Coil-Verfahrvorrichtung

Modifiziertes Lastenheft: Abgeänderter Abmessungen für den Bauraum



Anforderungsprofil

F. Urban
MG-E IV
11.03.2015

➤ Steuerung und Software

- Senden und Empfangen einzelner String-Befehle über COM-Schnittstelle zur Kommunikation zwischen 6D-Versteller-Steuerung und JH-Prüfsoftware
- Prüfabläufe werden über JH-Prüfsoftware durch JH-Personal erstellt

➤ Angewandte Verfahrenstrategie

- Zunächst werden alle Freiheitsgrade einzeln in 10 Schritten auf ihre jeweiligen Minima und Maxima verfahren.
- Im Anschluss werden kombinierte Positionen angefahren. Dabei werden schrittweise einzelne Freiheitsgrade verstellt, bis schließlich alle Extremlagen kombiniert angefahren sind.
- Grundsätzlich muss das Anfahren beliebiger Kombinationen möglich sein.
- Die Definition der Versuchsabläufe ist nicht Teil der Aufgabe. Eine mögliche Verstellstrategie ist normiert im angehängten Excel-File aufgeführt.

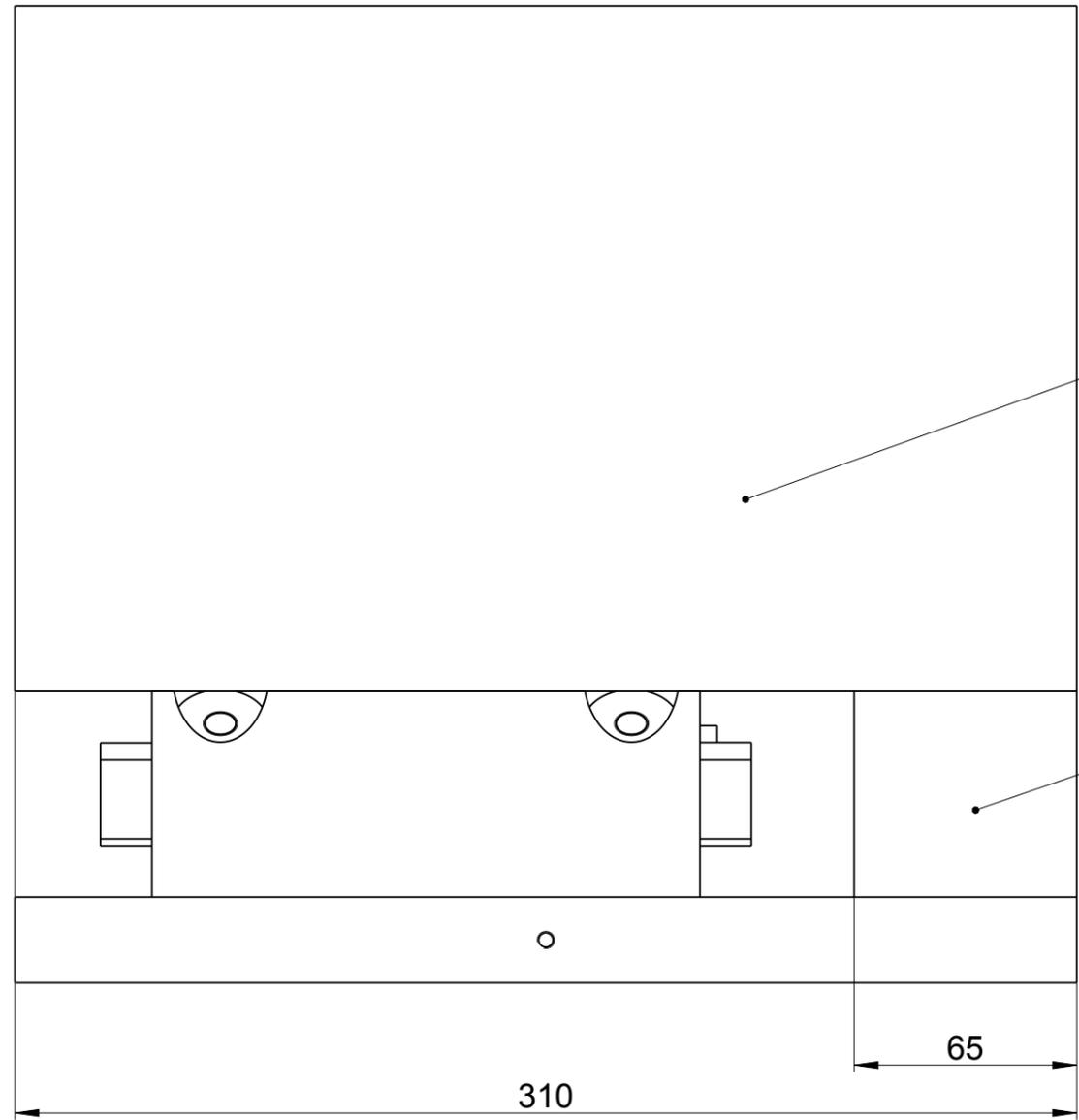
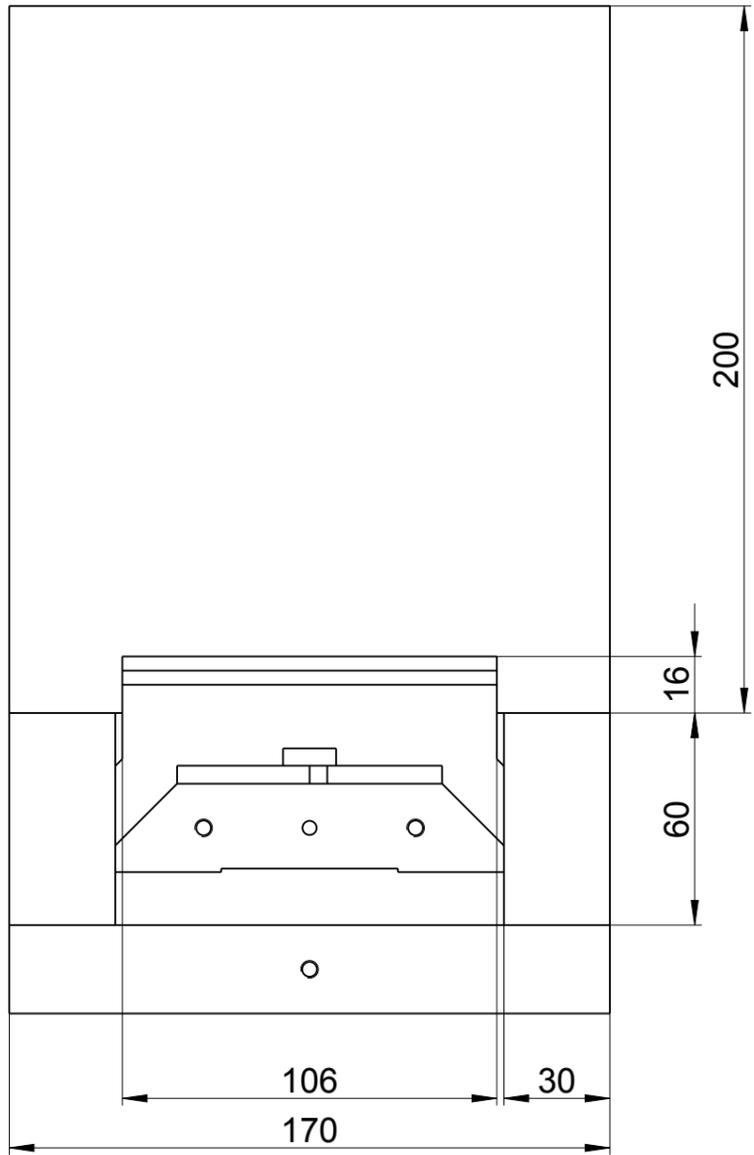
➤ Medienführung

- Die Anzahl der erforderlichen Leitungen ist auf ein Minimum zu reduzieren
- Größe der Kabeldurchführung in die Klimakammer (Ø 50mm)

➤ Sicherheit

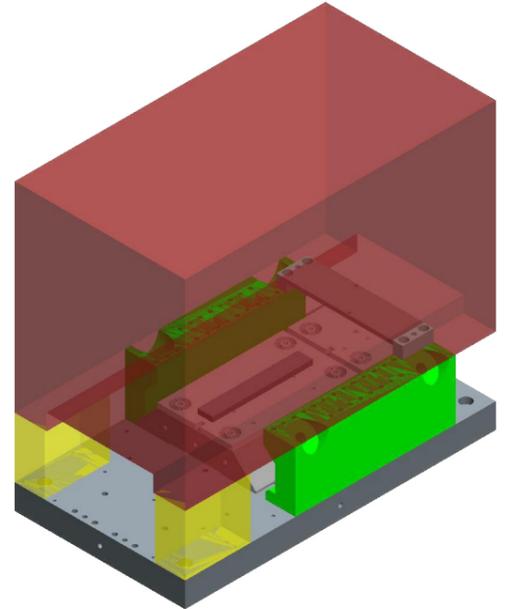
- Derzeit gültige Sicherheitsrichtlinien (EU, D, JH) sind einzuhalten. CE-Konformitätsprozess wird durch JH bearbeitet.
- Laserschutzklasse 1 müsste im Fall von eingesetzten Lasermessgeräten gewährleistet sein

Modifiziertes Lastenheft: Zusätzliche Information über angewandte Verfahrenstrategie



Bauraum für den Hexapod

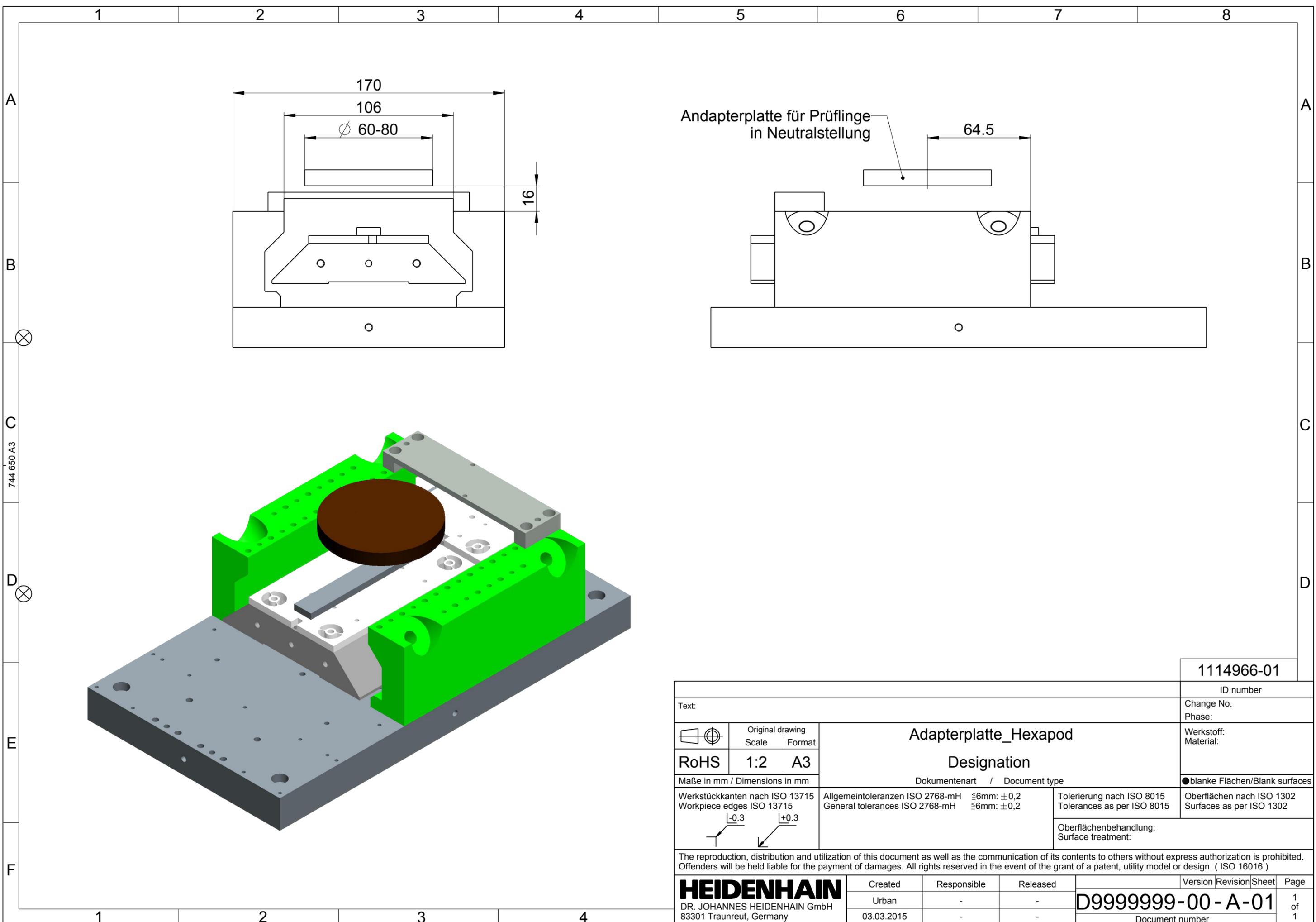
Zusaetzlicher Bauraum für Stützen



1:5

1114966-01

Text:			ID number	
Original drawing			Change No.	
Scale			Phase:	
Format			Werkstoff:	
RoHS			Material:	
1:2			●blanke Flächen/Blank surfaces	
A3			Designation	
Maße in mm / Dimensions in mm			Dokumentenart / Document type	
Werkstückkanten nach ISO 13715 Workpiece edges ISO 13715		Allgemeintoleranzen ISO 2768-mH General tolerances ISO 2768-mH		Tolerierung nach ISO 8015 Tolerances as per ISO 8015
		$\leq 6\text{mm}: \pm 0,2$ $\leq 6\text{mm}: \pm 0,2$		Oberflächen nach ISO 1302 Surfaces as per ISO 1302
Oberflächenbehandlung: Surface treatment:				
The reproduction, distribution and utilization of this document as well as the communication of its contents to others without express authorization is prohibited. Offenders will be held liable for the payment of damages. All rights reserved in the event of the grant of a patent, utility model or design. (ISO 16016)				
HEIDENHAIN			Created	Page
DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH			Responsible	1
83301 Traunreut, Germany			Released	of
			Version	1
			Revision	1
			Sheet	1
			D9999999-00 - A-01	
			Document number	
			03.03.2015	



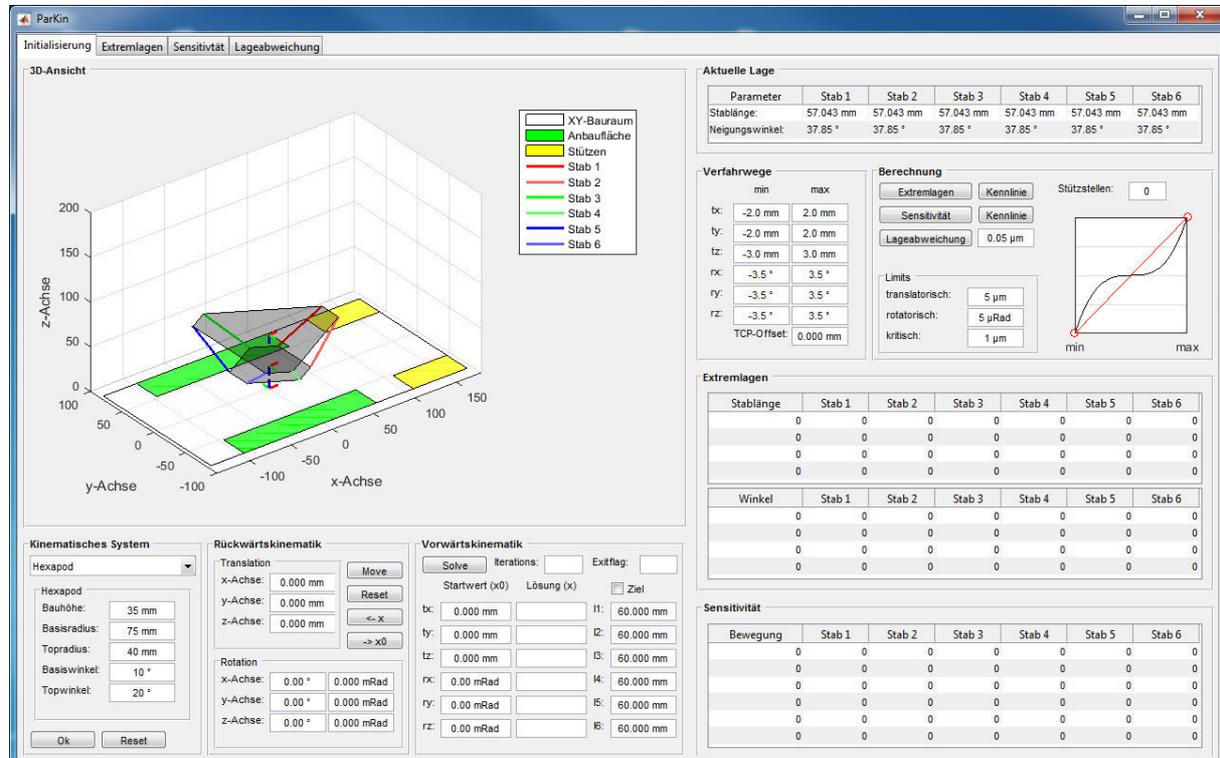
Adapterplatte für Prüflinge
in Neutralstellung

1114966-01

Text:			ID number	
Original drawing Scale Format			Change No. Phase:	
RoHS	1:2	A3	Werkstoff: Material:	
Maße in mm / Dimensions in mm			Dokumentenart / Document type	
Werkstückkanten nach ISO 13715 Workpiece edges ISO 13715		Allgemeintoleranzen ISO 2768-mH General tolerances ISO 2768-mH	Tolerierung nach ISO 8015 Tolerances as per ISO 8015	●blanke Flächen/Blank surfaces Oberflächen nach ISO 1302 Surfaces as per ISO 1302
		Oberflächenbehandlung: Surface treatment:		
The reproduction, distribution and utilization of this document as well as the communication of its contents to others without express authorization is prohibited. Offenders will be held liable for the payment of damages. All rights reserved in the event of the grant of a patent, utility model or design. (ISO 16016)				
HEIDENHAIN DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH 83301 Traunreut, Germany			Created Urban 03.03.2015	Responsible - -
			Released - -	Version Revision Sheet Page D99999999-00 - A-01 1 of 1
			Document number	

Anhang D: zu Kapitel 4: Kinematikstudie

Dieser Abschnitt entfällt, hier wird auf die Arbeit von MARTIN SCHARF verwiesen, welcher zum Zeitpunkt dieser Arbeit als Studentischer Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik angestellt war. [Stand: 03.08.2015]



Anhang E: zu Kapitel 5: Steifigkeitsanalyse

Auf den folgenden Seiten befinden sich die Berechnungstabellen und Steifigkeitsdiagramme für die beiden Kinematiken „Doppelter Tricept in X- bzw. Y-Ausführung“. Außerdem werden die drei Kinematiken hinsichtlich der Steifigkeit verglichen. Hier werden auch die Mindest- und Maximallängen der Verbindungsstreben definiert, und somit der nötige Hub.

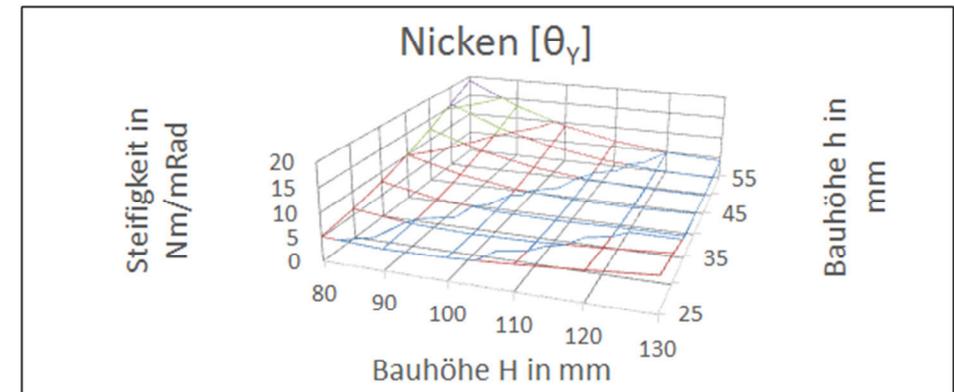
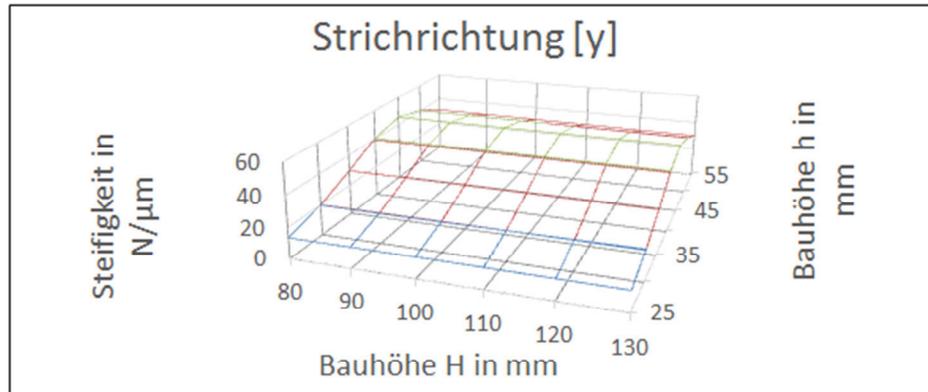
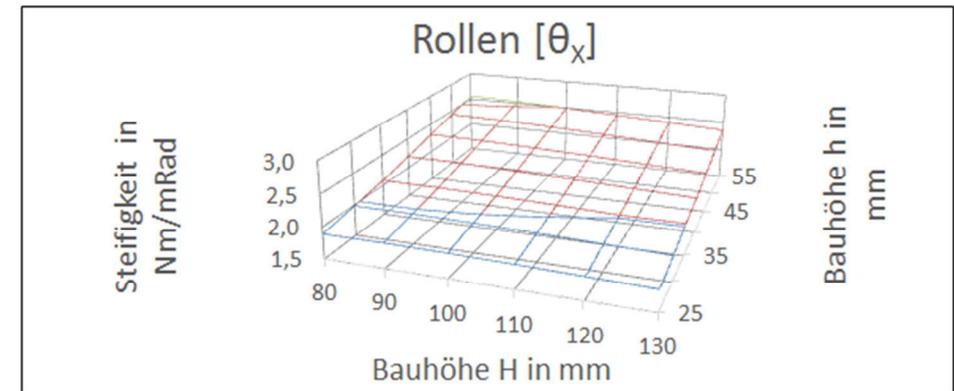
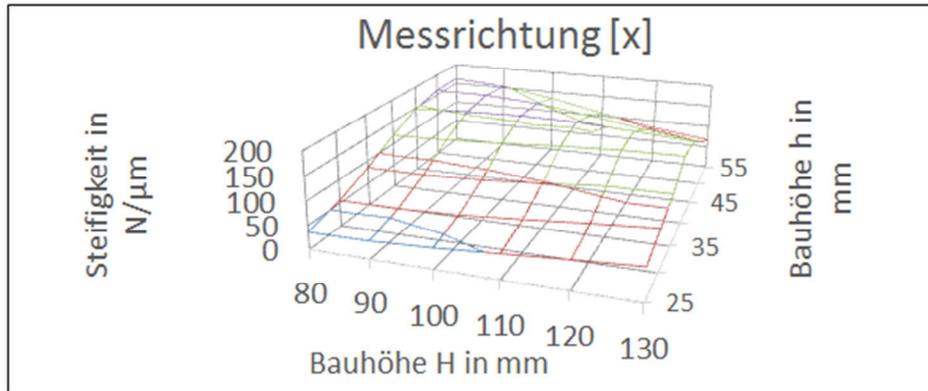
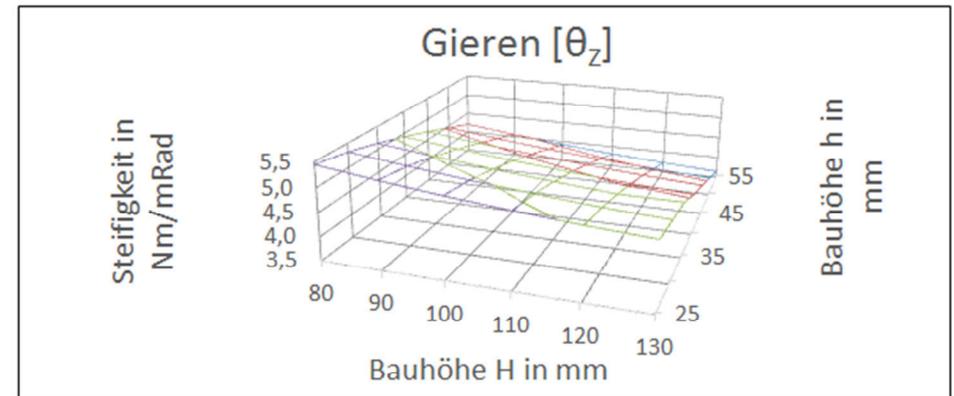
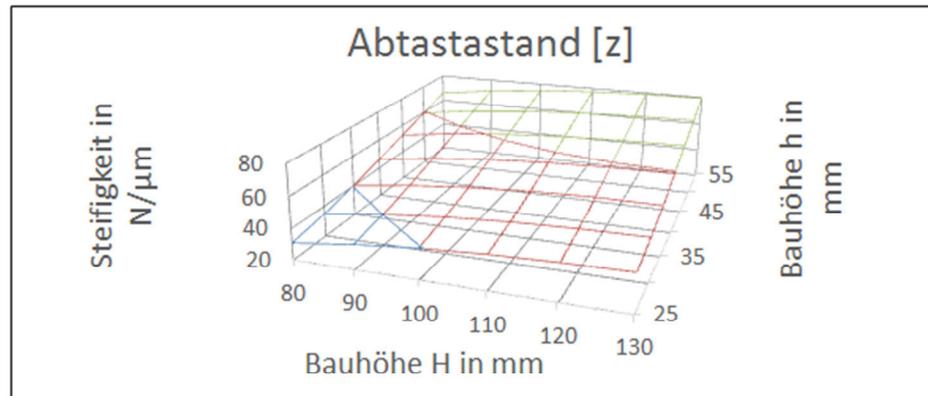
Doppelter Tricept in X-Ausführung

Steifigkeitswerte in Tabelle

Baumaß		Vergleichssteifigkeit			Vergleichssteifigkeit		
h	H	Abtastastand [Z]	Messrichtung [X]	Strichrichtung [Y]	Gieren [ØZ]	Rollen [ØX]	Nicken [ØY]
mm	mm	N/µm	N/µm	N/µm	Nm/mRad	Nm/mRad	Nm/mRad
25	80	31,0	36,3	13,5	5,4	1,9	5,2
25	90	36,1	37,6	13,6	5,3	1,9	4,5
25	100	39,8	43,4	13,5	5,2	1,9	4,7
25	110	42,2	52,0	13,5	5,1	1,9	5,4
25	120	43,6	60,9	13,4	5,0	1,9	6,4
25	130	44,3	68,5	13,3	4,9	1,8	7,4
30	80	35,0	55,9	20,1	5,3	2,0	6,3
30	90	40,1	55,1	20,1	5,2	2,0	4,9
30	100	43,8	59,7	20,1	5,0	2,0	4,4
30	110	46,2	68,8	20,0	4,9	2,0	4,7
30	120	47,6	79,2	19,9	4,8	1,9	5,4
30	130	48,3	88,3	19,8	4,8	1,9	6,2
35	80	40,2	85,0	29,7	5,1	2,1	7,9
35	90	45,2	84,6	29,7	5,0	2,1	5,7
35	100	48,9	89,1	29,7	4,9	2,1	4,6
35	110	51,4	98,2	29,6	4,8	2,0	4,4
35	120	52,8	108,8	29,5	4,7	2,0	4,7
35	130	52,8	108,8	29,5	4,7	2,0	4,7
40	80	46,2	119,2	40,5	4,9	2,2	10,1
40	90	51,3	122,9	40,5	4,8	2,2	6,9
40	100	55,0	129,2	40,5	4,6	2,2	5,2
40	110	57,5	137,0	40,5	4,5	2,1	4,4
40	120	58,9	142,9	40,5	4,4	2,1	4,3
40	130	59,5	145,0	40,4	4,4	2,1	4,6
45	80	52,8	147,5	45,4	4,7	2,3	12,7
45	90	57,9	152,7	45,4	4,5	2,3	8,7
45	100	61,6	156,0	45,4	4,4	2,3	6,1
45	110	64,0	154,0	45,4	4,3	2,2	4,8
45	120	65,4	146,5	45,4	4,2	2,2	4,2
45	130	66,1	137,4	45,4	4,1	2,2	4,2
50	80	59,6	161,7	40,3	4,4	2,4	15,7
50	90	64,6	160,9	40,2	4,3	2,4	10,8
50	100	68,3	152,1	40,1	4,2	2,4	7,5
50	110	70,8	134,5	39,9	4,1	2,3	5,5
50	120	72,2	114,4	39,8	4,0	2,3	4,5
50	130	72,9	99,0	39,7	3,9	2,3	4,1
55	80	66,3	162,7	31,0	4,2	2,6	19,0
55	90	71,3	153,0	30,8	4,1	2,5	13,2
55	100	75,0	133,2	30,6	3,9	2,5	9,2
55	110	77,5	107,1	30,3	3,8	2,4	6,5
55	120	78,9	83,1	30,1	3,7	2,4	5,0
55	130	79,5	66,8	29,9	3,6	2,4	4,2

Doppelter Tricept in X-Ausführung

Steifigkeitswerte in Diagramm



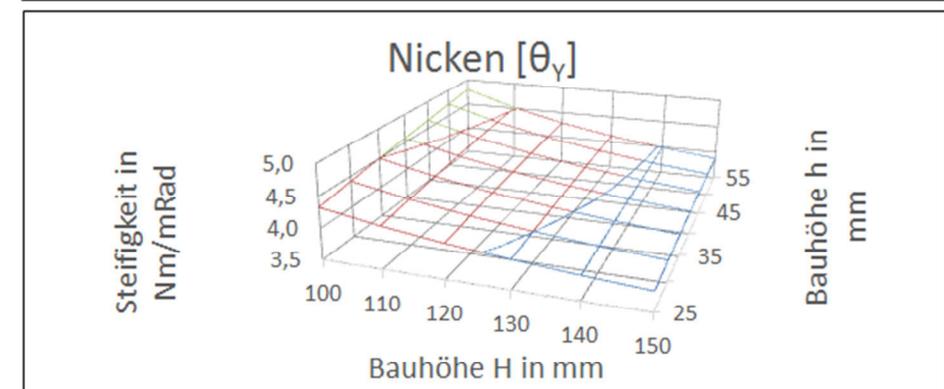
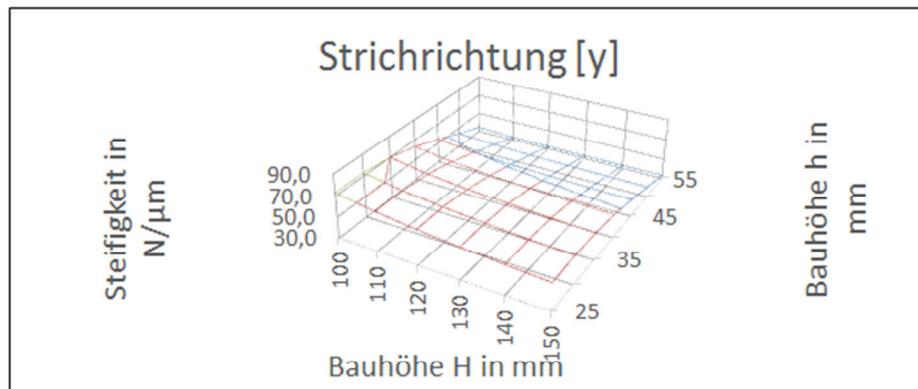
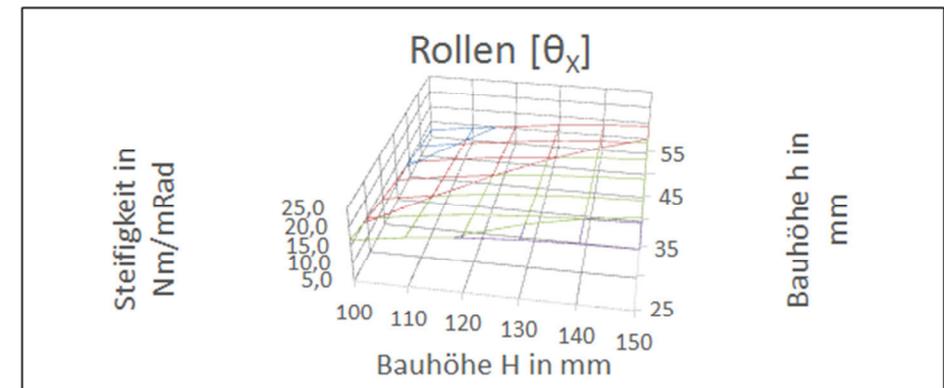
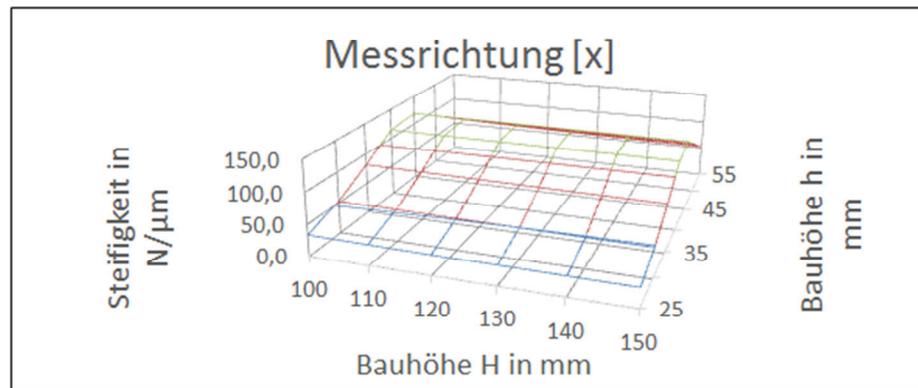
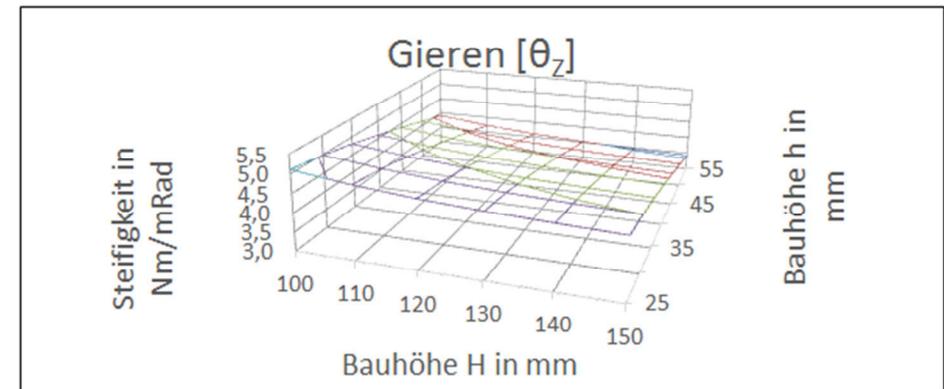
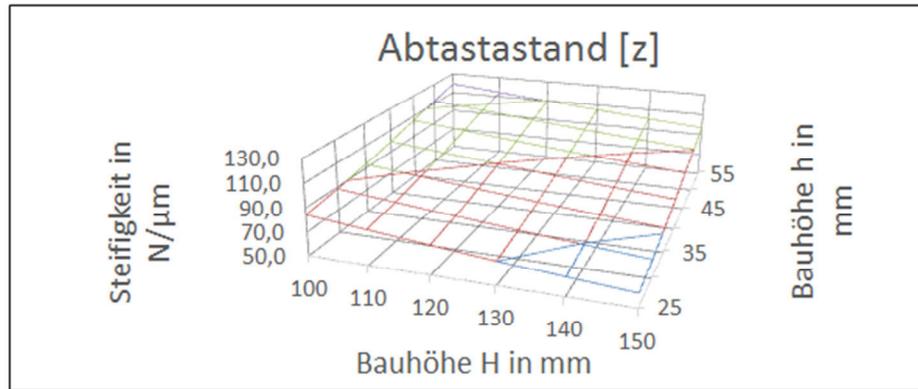
Doppelter Tricept in Y-Ausführung

Steifigkeitswerte in Tabelle

Baumaß		Vergleichssteifigkeit			Vergleichssteifigkeit		
h	H	Abtastastand [Z]	Messrichtung [X]	Strichrichtung [Y]	Gieren [ØZ]	Rollen [ØX]	Nicken [ØY]
mm	mm	N/µm	N/µm	N/µm	Nm/mRad	Nm/mRad	Nm/mRad
25	100	31,0	36,3	13,5	5,4	1,9	5,2
25	110	36,1	37,6	13,6	5,3	1,9	4,5
25	120	39,8	43,4	13,5	5,2	1,9	4,7
25	130	42,2	52,0	13,5	5,1	1,9	5,4
25	140	43,6	60,9	13,4	5,0	1,9	6,4
25	150	44,3	68,5	13,3	4,9	1,8	7,4
30	100	35,0	55,9	20,1	5,3	2,0	6,3
30	110	40,1	55,1	20,1	5,2	2,0	4,9
30	120	43,8	59,7	20,1	5,0	2,0	4,4
30	130	46,2	68,8	20,0	4,9	2,0	4,7
30	140	47,6	79,2	19,9	4,8	1,9	5,4
30	150	48,3	88,3	19,8	4,8	1,9	6,2
35	100	40,2	85,0	29,7	5,1	2,1	7,9
35	110	45,2	84,6	29,7	5,0	2,1	5,7
35	120	48,9	89,1	29,7	4,9	2,1	4,6
35	130	51,4	98,2	29,6	4,8	2,0	4,4
35	140	52,8	108,8	29,5	4,7	2,0	4,7
35	150	52,8	108,8	29,5	4,7	2,0	4,7
40	100	46,2	119,2	40,5	4,9	2,2	10,1
40	110	51,3	122,9	40,5	4,8	2,2	6,9
40	120	55,0	129,2	40,5	4,6	2,2	5,2
40	130	57,5	137,0	40,5	4,5	2,1	4,4
40	140	58,9	142,9	40,5	4,4	2,1	4,3
40	150	59,5	145,0	40,4	4,4	2,1	4,6
45	100	52,8	147,5	45,4	4,7	2,3	12,7
45	110	57,9	152,7	45,4	4,5	2,3	8,7
45	120	61,6	156,0	45,4	4,4	2,3	6,1
45	130	64,0	154,0	45,4	4,3	2,2	4,8
45	140	65,4	146,5	45,4	4,2	2,2	4,2
45	150	66,1	137,4	45,4	4,1	2,2	4,2
50	100	59,6	161,7	40,3	4,4	2,4	15,7
50	110	64,6	160,9	40,2	4,3	2,4	10,8
50	120	68,3	152,1	40,1	4,2	2,4	7,5
50	130	70,8	134,5	39,9	4,1	2,3	5,5
50	140	72,2	114,4	39,8	4,0	2,3	4,5
50	150	72,9	99,0	39,7	3,9	2,3	4,1
55	100	66,3	162,7	31,0	4,2	2,6	19,0
55	110	71,3	153,0	30,8	4,1	2,5	13,2
55	120	75,0	133,2	30,6	3,9	2,5	9,2
55	130	77,5	107,1	30,3	3,8	2,4	6,5
55	140	78,9	83,1	30,1	3,7	2,4	5,0
55	150	79,5	66,8	29,9	3,6	2,4	4,2

Doppelter Tricept in Y-Ausführung

Steifigkeitswerte in Diagramm



Steifigkeitsvergleich von verschiedenen Kinematiken

Hexapod	
Höhe	Winkel
40	36,1296

Abtastastand [Z]	Messrichtung [X]	Strichrichtung [Y]
N/ μm	N/ μm	N/ μm
120,7	95,9	95,9

Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]
Nm/mRad	Nm/mRad	Nm/mRad
66,4	17,6	17,7

Stablänge 6x	
min	max
50 mm	65 mm

X-DTricept	
h	H
45	100

Abtastastand [Z]	Messrichtung [X]	Strichrichtung [Y]
N/ μm	N/ μm	N/ μm
61,6	156,0	45,4

Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]
Nm/mRad	Nm/mRad	Nm/mRad
4,4	2,3	6,1

Stablänge 4x	
min	max
79 mm	86 mm

Stablänge 2x	
min	max
99 mm	107 mm

Y-DTricept	
h	H
35	100

Abtastastand [Z]	Messrichtung [X]	Strichrichtung [Y]
N/ μm	N/ μm	N/ μm
93,5	81,9	69,9

Gieren [θ_z]	Rollen [θ_x]	Nicken [θ_y]
Nm/mRad	Nm/mRad	Nm/mRad
4,8	12,7	4,5

Stablänge 4x	
min	max
79 mm	90 mm

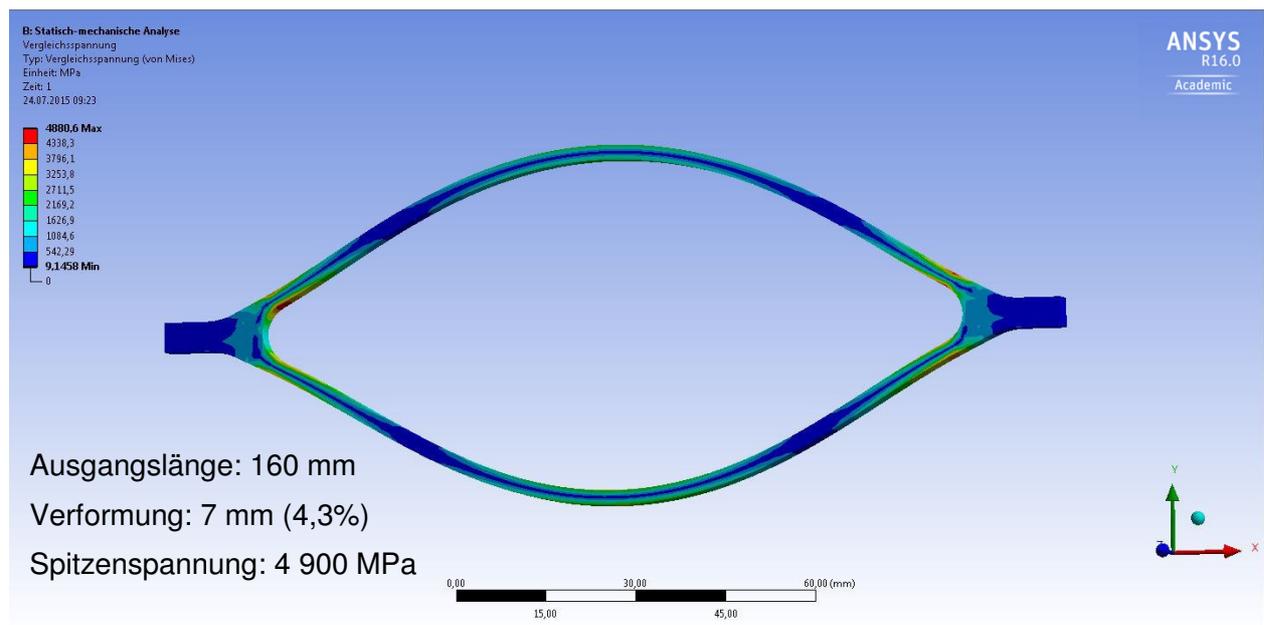
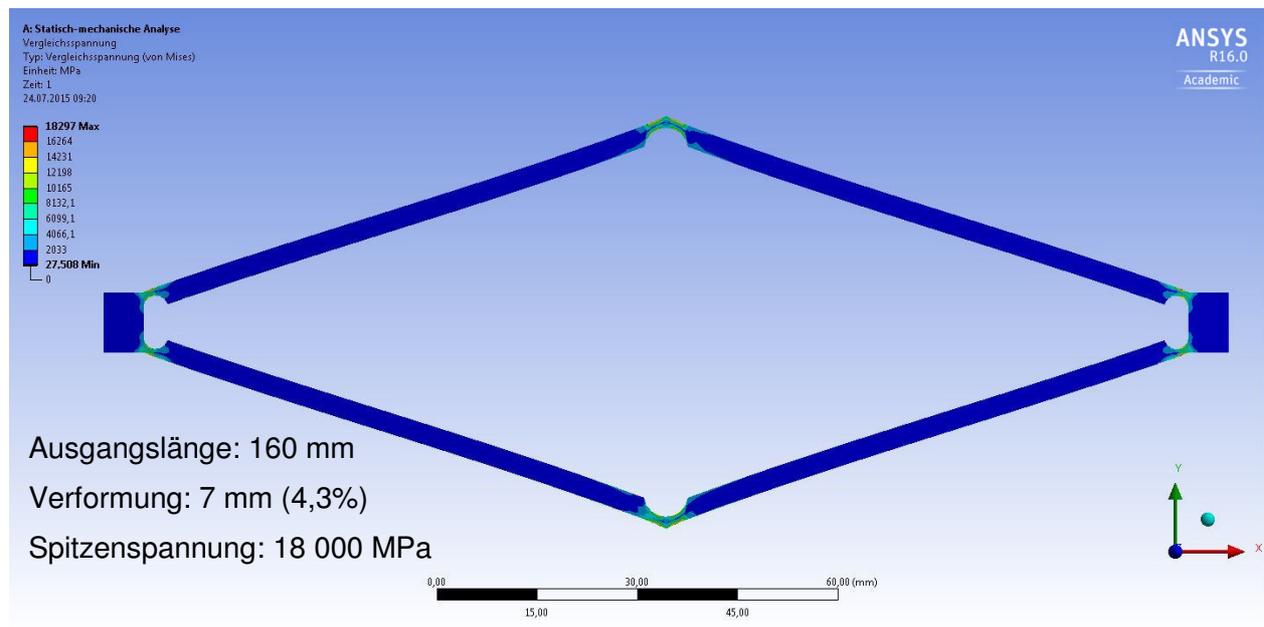
Stablänge 2x	
min	max
101 mm	111 mm

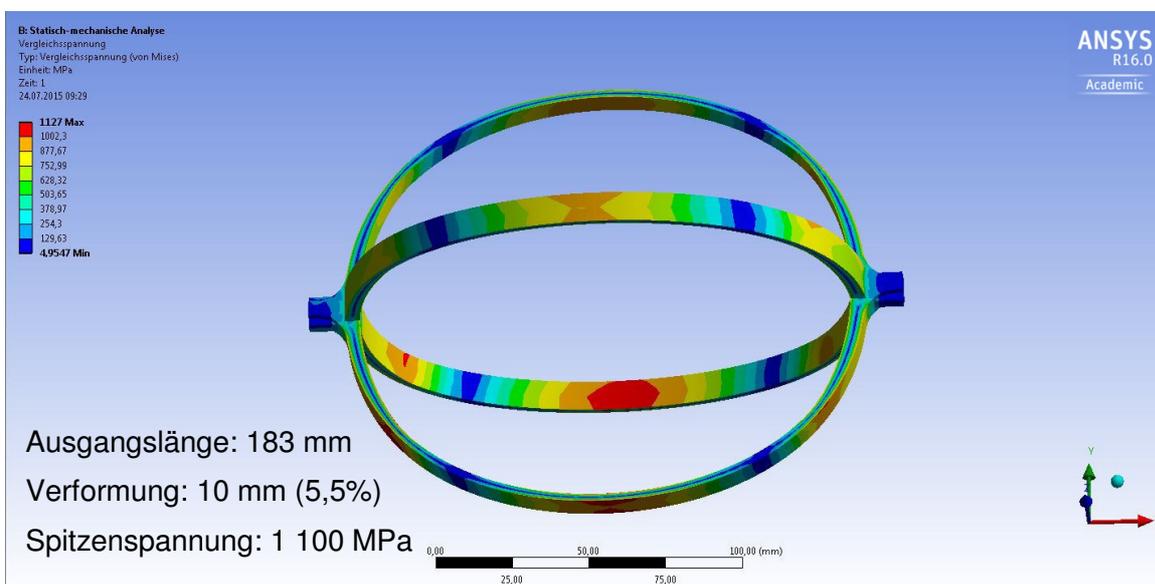
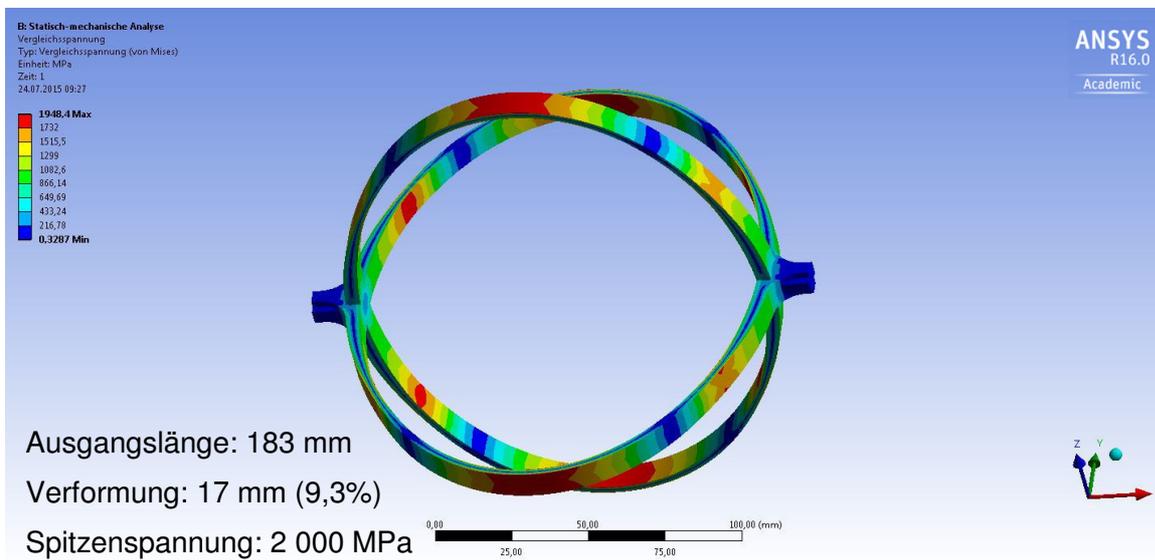
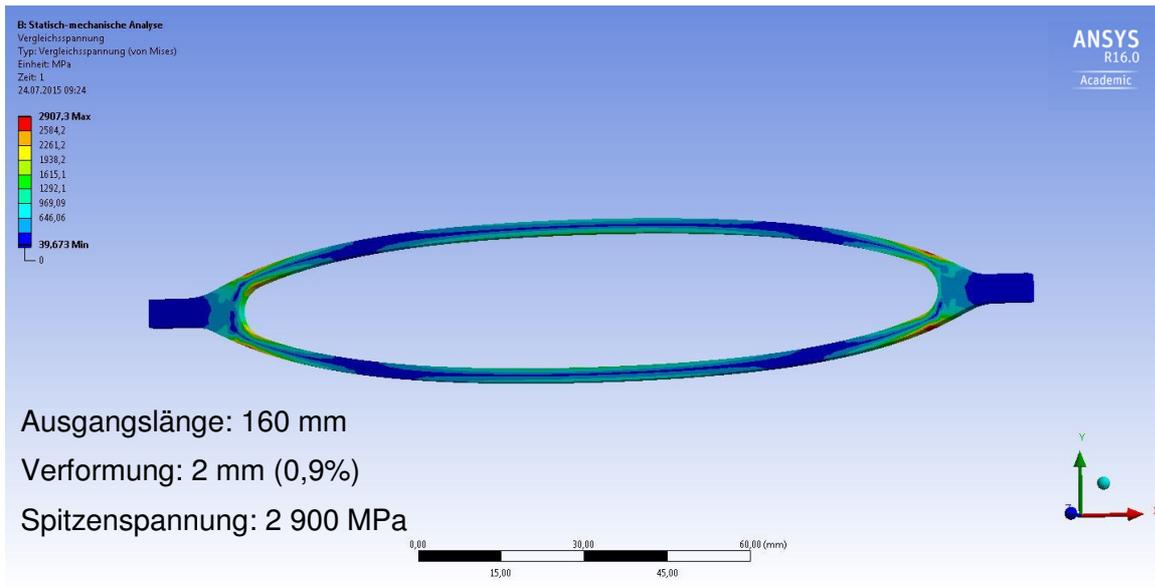
Anhang F: zu Kapitel 6: Fluidischer Aktor

Auf den folgenden Seiten befinden sich die ANSYS Berechnungen zu den Formstrukturen. Durch einen Stichprobentest wurden Kräfte simuliert und die Spannung und die Längenänderung ermittelt. Laut den MATLAB Berechnungen ist eine Längenänderung von 30% bei akzeptablen Spannungen erforderlich, dies wird in keiner Formstruktur erreicht.

Außerdem befindet sich hier eine Reihe von Informationen bezüglich des fluidischen Aktors:

- das Datenblatt zum Lasersintermaterial Titanium Ti64 von EOS
- die Berechnungstabelle zu den Unterschieden zwischen der 3D und 2D Berechnung
- die Berechnungstabelle zur Verfeinerung der Elementgröße
- die gesamten Messprotokolle zum verformbaren Metallfederbalg
- eine Mail des Unternehmen Anton Paar bezüglich der Fertigung mittels Lasersintern
- eine Beschreibung zu einem Versuchsaufbau des fluidischen Aktors





EOS Titanium Ti64

EOS Titanium Ti64 ist ein vorlegiertes Ti6Al4V-Pulver, welches speziell für die Verarbeitung in EOSINT M-Systemen optimiert wurde.

Dieses Dokument bietet Informationen und Daten für Bauteile, die mit dem Pulverwerkstoff EOS Titanium Ti64 (EOS Art.-Nr. 9011-0014) auf folgenden Systemen gebaut werden:

- EOSINT M 270 Installationsmodus *Xtended*
mit PSW 3.4 und Defaultjob Ti64_30_030_default.job
- EOSINT M 270 Dual Mode
mit PSW 3.5 und Original EOS Parametersatz Ti64_Performance 2.0
- EOSINT M 280
mit PSW 3.5 und Original EOS Parametersatz Ti64_Speed 1.0

Beschreibung

Bauteile aus EOS Titanium Ti64 erfüllen die Anforderungen der Normen ISO 5832-3, ASTM F1472 und ASTM B348 bezüglich der chemischen Zusammensetzung.

Diese häufig verwendete Leichtmetall-Legierung zeichnet sich durch ausgezeichnete mechanische Eigenschaften und hohe Korrosionsbeständigkeit aus, sowie durch niedriges spezifisches Gewicht und Biokompatibilität.

Dieser Werkstoff ist ideal für viele anspruchsvolle industrielle Anwendungen, zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt und im Rennsport, sowie für medizinische Anwendungen. Anmerkung: Anforderungen hinsichtlich Validierung und gesetzlicher Regelungen sind ggf. zu beachten, z. B. für den kommerziellen Einsatz als medizinisches Produkt in den meisten Ländern.

Aufgrund des Schichtaufbaus weisen die Bauteile anisotropische Eigenschaften auf – siehe technische Daten für Beispiele.

Materialdatenblatt

Technische Daten

Allgemeine Prozess- und geometrische Daten

Typisch erreichbare Bauteilgenauigkeit [1]	$\pm 50 \mu\text{m}$
Kleinste Wandstärke [2]	ca. 0,3 – 0,4 mm
Oberflächenrauigkeit, wie gebaut [3]	
Ti64_30_030_default.job Ti64 Performance (30 μm)	$R_a 9 - 12 \mu\text{m}, R_z 40 - 80 \mu\text{m}$
Ti64 Speed 1.0 (60 μm)	$R_a 6 - 10 \mu\text{m}, R_z 35 - 40 \mu\text{m}$
Volumenrate [4]	
Ti64_30_030_default.job Ti64 Performance (30 μm)	$3.75 \text{ mm}^3/\text{s}$ $13.5 \text{ cm}^3/\text{h}$
Ti64 Speed 1.0 (60 μm)	$9 \text{ mm}^3/\text{s}$ $32.4 \text{ cm}^3/\text{h}$

- [1] Erfahrungswert von Anwendern bezüglich Maßgenauigkeit typischer Geometrien. Bauteilgenauigkeit setzt geeignete Datenaufbereitung und Bauteilnachbearbeitung voraus, gemäß EOS-Schulung.
- [2] Mechanische Stabilität abhängig von der Geometrie (Wandhöhe usw.) und Anwendung
- [3] Aufgrund des Schichtaufbaus hängt die Oberflächenbeschaffenheit stark von der Orientierung der Oberfläche ab, z. B. schräge und gekrümmte Flächen weisen einen Stufeneffekt auf. Die Werte hängen auch stark vom Messverfahren ab. Die Angaben hier geben einen Eindruck, welche Werte für waagerechte (nach oben weisende) sowie senkrechte Flächen erwartet werden können.
- [4] Die Volumenrate ist ein Maß für die Baugeschwindigkeit während der Laserbelichtung der Schraffur. Die gesamte Baugeschwindigkeit ist abhängig von der durchschnittlichen Volumenrate, der Beschichtungsdauer (je nach Anzahl der Schichten) sowie weitere geometrie- und maschineneinstellungsbezogenen Faktoren.

Materialdatenblatt

Physikalische und chemische Eigenschaften der Bauteile

Materialzusammensetzung	Ti (Rest) Al (5,5 – 6,75 Gew.-%) V (3,5 – 4,5 Gew.-%) O < 2000 ppm N < 500 ppm C < 800 ppm H < 150 ppm Fe < 3000 ppm
Relative Dichte	ca. 100 %
Dichte	ca. 4,41 g/cm ³

Materialdatenblatt

Mechanische Eigenschaften der Bauteile

	Wie gebaut	Nach Wärmebehandlung [6]
Zugfestigkeit [5]		
- in horizontaler Richtung (XY)	typ. 1230 ± 50 MPa	min. 930 MPa typ. 1050 ± 20 MPa
- in vertikaler Richtung (Z)	typ. 1200 ± 50 MPa	min. 930 MPa typ. 1060 ± 20 MPa
Streckgrenze (R_{p0.2}) [5]		
- in horizontaler Richtung (XY)	typ. 1060 ± 50 MPa	min. 860 MPa typ. 1000 ± 20 MPa
- in vertikaler Richtung (Z)	typ. 1070 ± 50 MPa	min. 860 MPa typ. 1000 ± 20 MPa
Bruchdehnung [5]		
- in horizontaler Richtung (XY)	typ. (10 ± 2) %	min. 10 % typ. (14 ± 1 %)
- in vertikaler Richtung (Z)	typ. (11 ± 3) %	min. 10 % typ. (15 ± 1 %)
E-Modul [5]		
- in horizontaler Richtung (XY)	typ. 110 ± 10 GPa	typ. 116 ± 10 GPa
- in vertikaler Richtung (Z)	typ. 110 ± 10 GPa	typ. 114 ± 10 GPa
Härte [7]	typ. 320 ± 12 HV5	

[5] Mechanische Festigkeit geprüft gemäß EN ISO 6892-1:2009 Anhang D, Proportionalstäbe, Probendurchmesser 5 mm, Anfangsmesslänge 25 mm.

[6] Die Proben wurden unter Argonschutzgas für eine Dauer von 4 Stunden bei einer Haltetemperatur von 800 °C behandelt. Die mechanischen Eigenschaften werden hier mit Minimalwerten angegeben, um darzustellen, dass die mechanischen Eigenschaften größer sind als die minimale geforderten Material-Spezifikationen in ASTM F1472-08^{e1}. Mit Einhaltung der dort geforderten Minimalwerte sind gleichzeitig die Material-Spezifikationen der Normen ASTM B348-09 und ISO 5832-3:2000 erfüllt.

[7] Härteprüfung nach Vickers (HV) entsprechend EN ISO 6507-1 auf polierter Oberfläche. Zu beachten ist, dass die gemessene Härte sehr stark von der Art der Probenvorbereitung abhängen kann.

Materialdatenblatt

Thermische Eigenschaften der Bauteile

Max. dauerhafte Betriebstemperatur	ca. 350 °C
------------------------------------	------------

Abkürzungen

typ.	typisch
min.	minimum
Gew.	Gewicht

Anmerkungen

Die Daten gelten für die auf Seite 1 erwähnten Kombinationen von Pulverwerkstoff, Maschine und Parametersätzen, verarbeitet gemäß der jeweils gültigen Bedienungsanleitung (inkl. Installationsbedingungen und Wartung) und Parameterblatt. Die Bestimmung der Bauteileigenschaften erfolgt gemäß definierter Prozeduren. Weitere Details zu den von EOS verwendeten Testprozeduren sind auf Anfrage erhältlich.

Die Angaben entsprechen unserem Kenntnis- und Erfahrungsstand zum Zeitpunkt der Veröffentlichung. Sie bilden allein keine ausreichende Grundlage für eine Bauteilauslegung. Bestimmte Eigenschaften des Produktes oder eines Bauteils oder die Eignung des Produktes oder von Bauteilen für eine spezifische Anwendung werden hiermit weder vereinbart noch garantiert. Der Produzent oder der Abnehmer eines Bauteils ist für die Überprüfung der Eigenschaften und der Eignung für eine konkrete Anwendung verantwortlich. Dies gilt auch hinsichtlich der Wahrung von möglichen Schutzrechten sowie bestehender Gesetze und Bestimmungen. Im Rahmen der kontinuierlich von EOS betriebenen Entwicklungs- und Verbesserungsprozesse können sich die Angaben ohne Vorankündigung ändern.

EOS[®], EOSINT[®] und DMLS[®], sind eingetragene Warenzeichen der EOS GmbH.

© 2011 EOS GmbH – Electro Optical Systems. Alle Rechte vorbehalten.

Verwendung eines 2D-Modelles

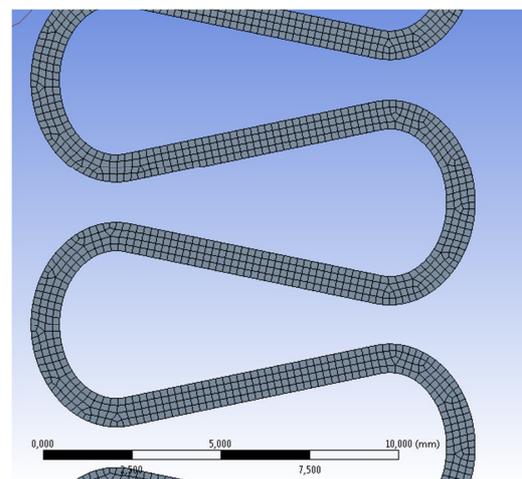
Druck bar	Spannung					Druck bar	Verformung				
	3D (179°)	3D (45°)	3D (1°)	3D (1° fein)	2D		3D (179°)	3D (45°)	3D (1°)	3D (1° fein)	2D
	N/mm ²		mm	mm	mm	mm	mm				
5	214,47	181,15	168,63	190,79	190,18	5	1,5514	1,5915	1,6247	1,6555	1,6557
10	420,13	354,93	330,4	372,77	371,64	10	2,9965	3,0698	3,1303	3,1859	3,1861
15	617,96	522,15	486,09	547,05	545,45	15	4,3487	4,4498	4,5327	4,6086	4,609
20	808,78	683,52	636,36	714,54	712,52	20	5,6192	5,7439	5,8456	5,9383	5,9388
25	993,33	839,65	781,78	875,99	873,62	25	6,8176	6,9624	7,0801	7,1869	7,1875
30	1172,2	991,04	922,83	1032,1	1029,4	30	7,952	8,1141	8,2455	8,3643	8,3649
35	1345,9	1138,1	1059,9	1183,3	1180,3	35	9,0291	9,2064	9,3496	9,4785	9,4792
40	1515	1281,3	1193,4	1330,1	1326,9	40	10,055	10,245	10,399	10,537	10,537
45	1679,7	1421	1323,6	1472,8	1469,5	45	11,034	11,237	11,399	11,545	11,545
50	1840,6	1557,3	1450,8	1611,9	1608,4	50	11,972	12,184	12,355	12,507	12,508
55	1997,9	1690,5	1575,2	1747,7	1744	55	12,871	13,093	13,27	13,429	13,429
60	2151,9	1821	1697	1880,2	1876,5	60	13,735	13,965	14,149	14,313	14,313

Diese beiden Tabellen behandeln wie sich das 3D-Modell gegenüber dem 2D-Modell verhält. Die linke Tabelle zeigt die höchste auftretende Spannung in Abhängigkeit vom Druck. Die rechte Tabelle zeigt die Verformung in Abhängigkeit vom Druck. Nicht berücksichtigt wurde die unterschiedliche Elementgröße, wodurch zum Teil sehr verschiedene Resultate erfolgen. Im Vergleich zum feinen 3D-Modell von einem Grad Querschnitt herrscht beinahe kein Unterschied. Daher werden nur 2D-Modelle verwendet.

Verfeinerung der Elementgröße

Kantenlänge	"grob"	1.0mm	0.7mm	0.5mm	0.4mm	0.3mm	0.2mm	0.1mm
Druck bar	Verformung mm							
5	1,536	1,5354	1,5349	1,5355	1,5362	1,537	1,5375	1,5375
10	3,0034	3,0024	3,0013	3,0025	3,0039	3,0053	3,0062	3,0063
15	4,4054	4,4039	4,4025	4,4041	4,4062	4,4082	4,4094	4,4096
20	5,7456	5,7437	5,7419	5,744	5,7466	5,7491	5,7507	5,7509
25	7,0277	7,0255	7,0233	7,0258	7,0289	7,0319	7,0338	7,0341
30	8,2554	8,253	8,2506	8,2534	8,257	8,2603	8,2625	8,2628
35	9,4325	9,4298	9,4272	9,4303	9,4343	9,438	9,4405	9,4408
40	10,562	10,56	10,557	10,56	10,565	10,569	10,571	10,572
45	11,649	11,646	11,643	11,646	11,651	11,655	11,658	11,658
50	12,694	12,691	12,687	12,691	12,696	12,701	12,704	12,704
55	13,701	13,698	13,694	13,698	13,704	13,709	13,712	13,712
60	14,673	14,669	14,666	14,67	14,676	14,681	14,684	14,685

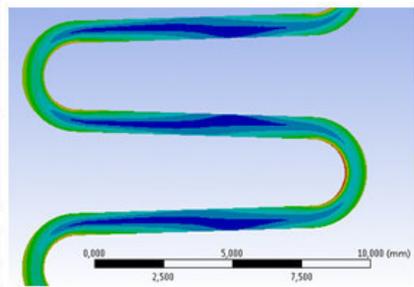
Diese Tabelle zeigt die Verformung des fluidischen Aktors in Abhängigkeit von Druck und der Elementgröße. Selbst mit der von ANSYS gegebenen Eigenschaft „grob“ sind keine großen Unterschiede zu erkennen, mit Ausnahme der hier nicht aufgelisteten Rechenzeit. Allerdings hat die Elementgröße in einer reinen 2D-Berechnung kaum Einfluss auf die Rechenzeit, wodurch die Entscheidung auf eine feine Einstellung fallen kann. Die maximale Kantenlänge beträgt in allen Berechnungen maximal 0,2 Millimeter.

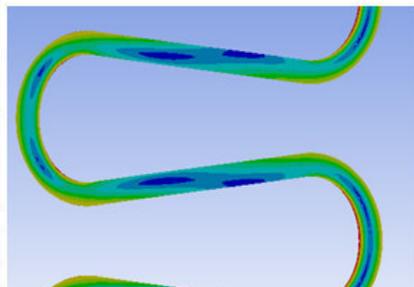


Simulationsprotokolle zum fluidischen Aktor

Auf den nächsten Seiten befinden sich die Simulationsprotokolle für den fluidischen Aktor. Wie im Bericht erklärt wurde auf die Darstellung des Spannung-Dehnungs-Diagramms verzichtet. Die Nummerierung bei „System“ besteht aus zwei Zahlen. Die erste Zahl beschreibt die Anzahl der Windungen, während die zweite Zahl eine fortlaufende Nummer ist. Diese beginnt mit null und ist die Ausgangskonfiguration, welche bis auf die Anzahl der Windungen für alle Systeme gleich ist.

System 8

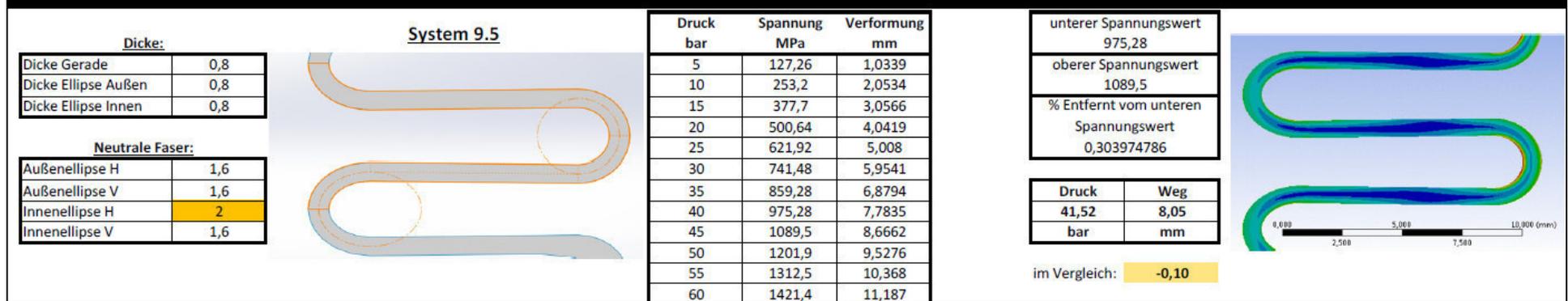
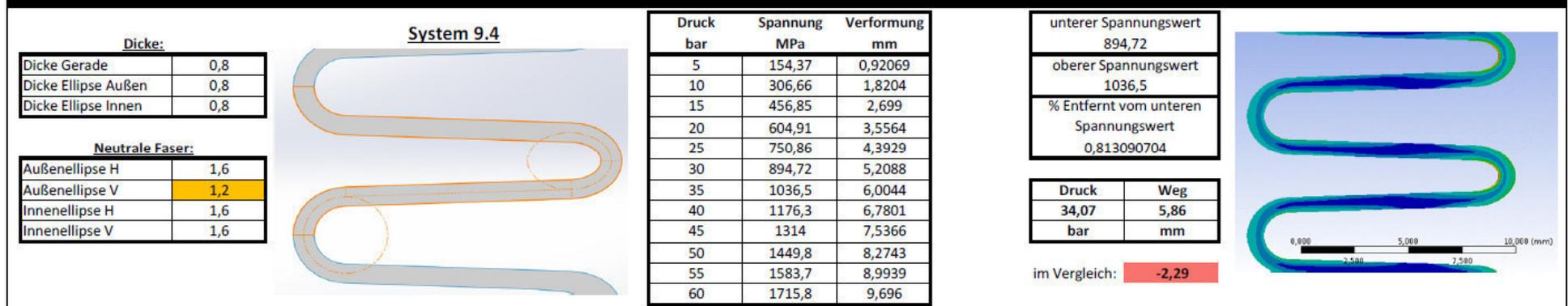
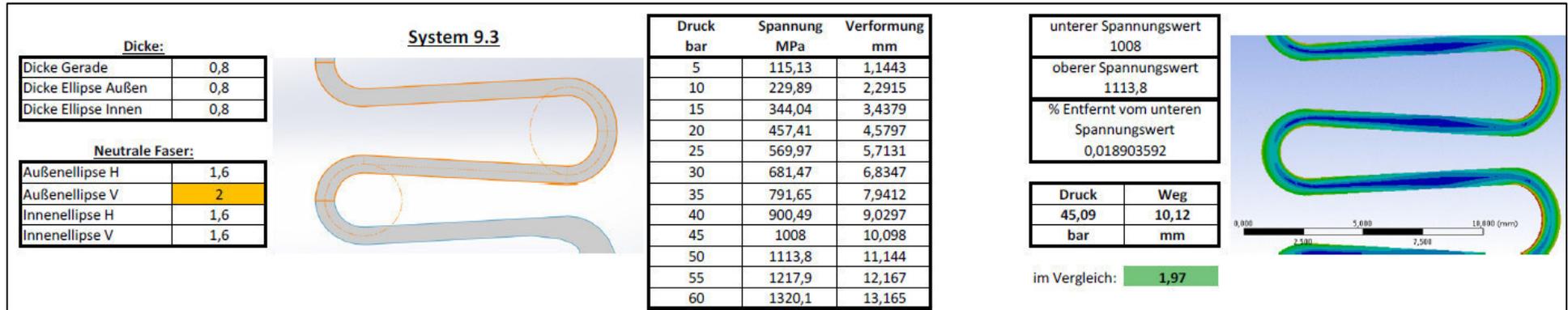
System 8.0		Druck	Spannung	Verformung																											
		bar	MPa	mm																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: left;">Globale Variablen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>"Anzahl"</td><td>= 8</td></tr> <tr><td>"Baulänge"</td><td>= 65mm</td></tr> <tr><td>"Deckel"</td><td>= 3mm</td></tr> <tr><td>"Außendurchmesser"</td><td>= 40mm</td></tr> <tr><td>"Innendurchmesser"</td><td>= 15mm</td></tr> <tr><td>"Dicke Gerade"</td><td>= 0.8mm</td></tr> <tr><td>"Dicke Ellipse Außen"</td><td>= 0.8mm</td></tr> <tr><td>"Dicke Ellipse Innen"</td><td>= 0.8mm</td></tr> <tr><td>"Neutrale Faser AußenEllipse H"</td><td>= 1.6</td></tr> <tr><td>"Neutrale Faser AußenEllipse V"</td><td>= 1.6</td></tr> <tr><td>"Neutrale Faser InnenEllipse H"</td><td>= 1.6</td></tr> <tr><td>"Neutrale Faser InnenEllipse V"</td><td>= 1.6</td></tr> </tbody> </table>		Globale Variablen		"Anzahl"	= 8	"Baulänge"	= 65mm	"Deckel"	= 3mm	"Außendurchmesser"	= 40mm	"Innendurchmesser"	= 15mm	"Dicke Gerade"	= 0.8mm	"Dicke Ellipse Außen"	= 0.8mm	"Dicke Ellipse Innen"	= 0.8mm	"Neutrale Faser AußenEllipse H"	= 1.6	"Neutrale Faser AußenEllipse V"	= 1.6	"Neutrale Faser InnenEllipse H"	= 1.6	"Neutrale Faser InnenEllipse V"	= 1.6	5	176,65	1,468	unterer Spannungswert 985,45
		Globale Variablen																													
		"Anzahl"	= 8																												
		"Baulänge"	= 65mm																												
		"Deckel"	= 3mm																												
		"Außendurchmesser"	= 40mm																												
		"Innendurchmesser"	= 15mm																												
		"Dicke Gerade"	= 0.8mm																												
		"Dicke Ellipse Außen"	= 0.8mm																												
		"Dicke Ellipse Innen"	= 0.8mm																												
		"Neutrale Faser AußenEllipse H"	= 1.6																												
		"Neutrale Faser AußenEllipse V"	= 1.6																												
"Neutrale Faser InnenEllipse H"	= 1.6																														
"Neutrale Faser InnenEllipse V"	= 1.6																														
10	348,18	2,8726	oberer Spannungswert 1133,6																												
15	514,66	4,2147	% Entfernt vom unteren Spannungswert 0,165710429																												
20	676,22	5,4965																													
25	833,08	6,7209																													
30	985,45	7,891																													
35	1133,6	9,0102																													
40	1277,7	10,082																													
45	1418,1	11,109																													
50	1555	12,095																													
55	1688,6	13,043																													
60	1819,1	13,955																													

System 8.1		Druck	Spannung	Verformung																											
		bar	MPa	mm																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: left;">Globale Variablen</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>"Anzahl"</td><td>= 8</td></tr> <tr><td>"Baulänge"</td><td>= 65mm</td></tr> <tr><td>"Deckel"</td><td>= 3mm</td></tr> <tr><td>"Außendurchmesser"</td><td>= 40mm</td></tr> <tr><td>"Innendurchmesser"</td><td>= 15mm</td></tr> <tr><td>"Dicke Gerade"</td><td>= 0.8mm</td></tr> <tr><td>"Dicke Ellipse Außen"</td><td>= 0.8mm</td></tr> <tr><td>"Dicke Ellipse Innen"</td><td>= 0.8mm</td></tr> <tr><td>"Neutrale Faser AußenEllipse H"</td><td>= 2</td></tr> <tr><td>"Neutrale Faser AußenEllipse V"</td><td>= 2.5</td></tr> <tr><td>"Neutrale Faser InnenEllipse H"</td><td>= 2</td></tr> <tr><td>"Neutrale Faser InnenEllipse V"</td><td>= 2.5</td></tr> </tbody> </table>		Globale Variablen		"Anzahl"	= 8	"Baulänge"	= 65mm	"Deckel"	= 3mm	"Außendurchmesser"	= 40mm	"Innendurchmesser"	= 15mm	"Dicke Gerade"	= 0.8mm	"Dicke Ellipse Außen"	= 0.8mm	"Dicke Ellipse Innen"	= 0.8mm	"Neutrale Faser AußenEllipse H"	= 2	"Neutrale Faser AußenEllipse V"	= 2.5	"Neutrale Faser InnenEllipse H"	= 2	"Neutrale Faser InnenEllipse V"	= 2.5	5	134,02	1,318	unterer Spannungswert 994,08
		Globale Variablen																													
		"Anzahl"	= 8																												
		"Baulänge"	= 65mm																												
		"Deckel"	= 3mm																												
		"Außendurchmesser"	= 40mm																												
		"Innendurchmesser"	= 15mm																												
		"Dicke Gerade"	= 0.8mm																												
		"Dicke Ellipse Außen"	= 0.8mm																												
		"Dicke Ellipse Innen"	= 0.8mm																												
		"Neutrale Faser AußenEllipse H"	= 2																												
		"Neutrale Faser AußenEllipse V"	= 2.5																												
"Neutrale Faser InnenEllipse H"	= 2																														
"Neutrale Faser InnenEllipse V"	= 2.5																														
10	270,6	2,6945	oberer Spannungswert 1145,9																												
15	409,86	4,1335	% Entfernt vom unteren Spannungswert 0,10486102																												
20	551,88	5,6387																													
25	696,7	7,213																													
30	844,19	8,8576																													
35	994,08	10,571																													
40	1145,9	12,349																													
45	1298,8	14,182																													
50	1451,9	16,056																													
55	1621,1	17,947																													
60	1806,7	19,84																													

System 9

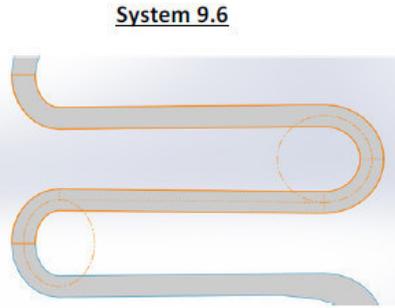
Für das Wellenrohr mit neun Windungen werden am meisten Untersuchungen dargestellt. Hier befindet ab System 9.1 auch ein weiteres Feld, welche die Längenänderung zum System 9.0 darstellt.





Dicke:	
Dicke Gerade	0,8
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	1,6
Innenellipse H	1,2
Innenellipse V	1,6

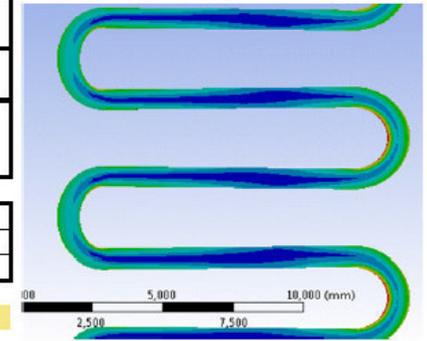


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	131,15	1,0995
10	260,93	2,1839
15	389,17	3,2508
20	515,73	4,2979
25	640,49	5,3237
30	763,36	6,3268
35	884,28	7,3063
40	1003,2	8,2617
45	1120,2	9,1927
50	1235,1	10,099
55	1348,1	10,982
60	1459,2	11,841

unterer Spannungswert	1003,2
oberer Spannungswert	1120,2
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,058119658

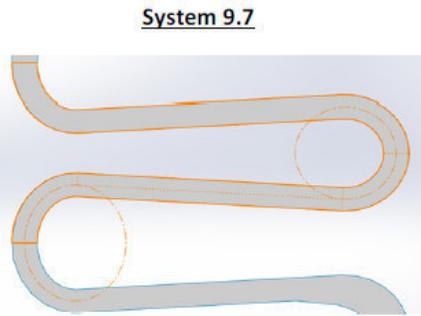
Druck	Weg
40,29	8,32
bar	mm

im Vergleich: **0,17**



Dicke:	
Dicke Gerade	0,8
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	1,6
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	2

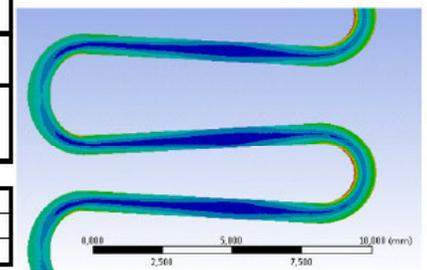


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	132,29	1,0946
10	264,52	2,1927
15	396,45	3,2913
20	527,87	4,387
25	658,54	5,4766
30	788,24	6,557
35	916,76	7,6253
40	1043,9	8,679
45	1169,6	9,7158
50	1293,7	10,734
55	1416	11,732
60	1536,5	12,708

unterer Spannungswert	916,76
oberer Spannungswert	1043,9
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,733364795

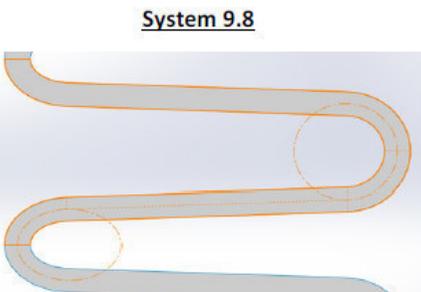
Druck	Weg
38,67	8,40
bar	mm

im Vergleich: **0,25**



Dicke:	
Dicke Gerade	0,8
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	1,6
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	1,2

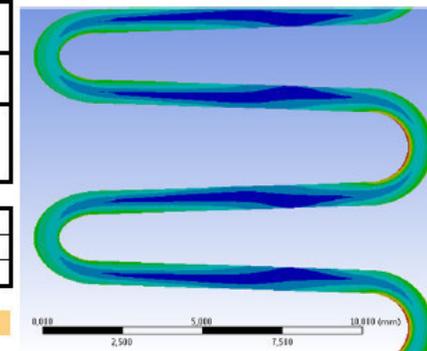


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	121,56	0,95581
10	241,11	1,8879
15	358,67	2,7962
20	474,23	3,6808
25	587,82	4,542
30	699,48	5,3802
35	809,24	6,1959
40	917,15	6,9898
45	1023,3	7,7625
50	1127,6	8,5147
55	1230,3	9,2472
60	1331,4	9,9607

unterer Spannungswert	917,15
oberer Spannungswert	1023,3
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,874705605

Druck	Weg
44,37	7,67
bar	mm

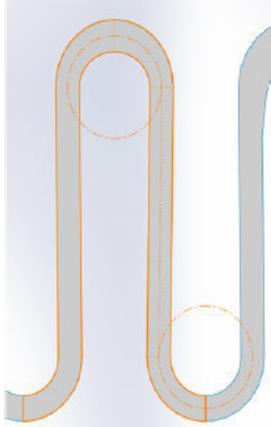
im Vergleich: **-0,48**



System 9.9

Dicke:	
Dicke Gerade	0,8
Dicke Ellipse Außen	1
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	1,6
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	1,6

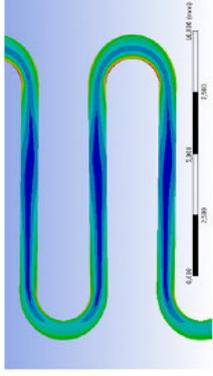


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	106,47	0,88568
10	212,06	1,7622
15	316,63	2,6283
20	420,07	3,4827
25	522,34	4,3244
30	623,53	5,1526
35	723,39	5,9665
40	821,83	6,7658
45	918,82	7,5499
50	1014,3	8,3187
55	1108,3	9,072
60	1200,7	9,8098

unterer Spannungswert	918,82
oberer Spannungswert	1014,3
% Entfemt vom unteren Spannungswert	0,95496439

Druck	Weg
49,77	8,28
bar	mm

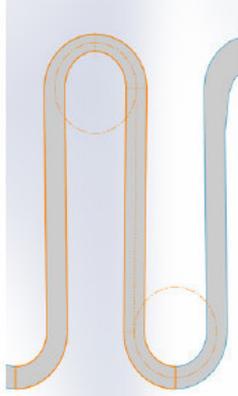
im Vergleich: **0,13**



System 9.10

Dicke:	
Dicke Gerade	0,8
Dicke Ellipse Außen	0,6
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	1,6
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	1,6

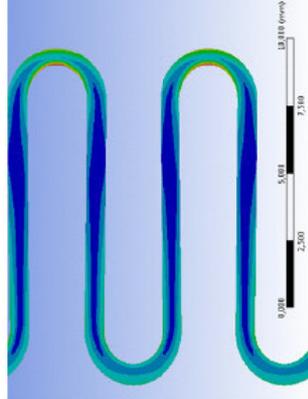


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	197,57	1,3641
10	391,74	2,6995
15	582,14	4,002
20	768,5	5,2688
25	950,64	6,4979
30	1128,5	7,6881
35	1302	8,8392
40	1471,3	9,9513
45	1636,3	11,025
50	1797,3	12,062
55	1954,4	13,063
60	2107,6	14,03

unterer Spannungswert	950,64
oberer Spannungswert	1128,5
% Entfemt vom unteren Spannungswert	0,333745643

Druck	Weg
26,67	6,90
bar	mm

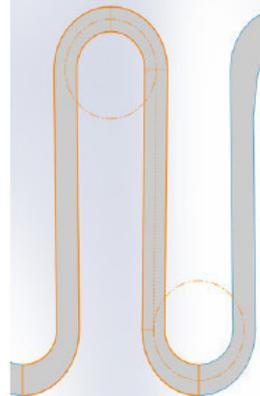
im Vergleich: **-1,25**



System 9.11

Dicke:	
Dicke Gerade	0,8
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	1

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	1,6
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	1,6

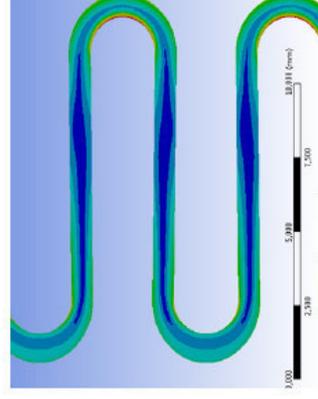


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	125,95	0,97694
10	250,75	1,9428
15	374,27	2,8959
20	496,41	3,8347
25	617,06	4,7579
30	736,15	5,6645
35	853,63	6,5536
40	969,44	7,4247
45	1083,6	8,2774
50	1196	9,1115
55	1306,8	9,9268
60	1415,8	10,723

unterer Spannungswert	969,44
oberer Spannungswert	1083,6
% Entfemt vom unteren Spannungswert	0,35529082

Druck	Weg
41,78	7,73
bar	mm

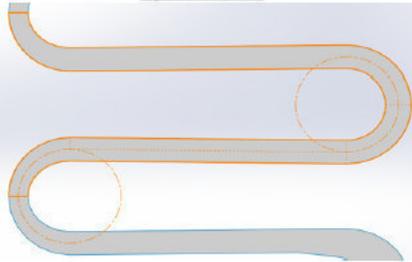
im Vergleich: **-0,42**



System 9.12

Dicke:	
Dicke Gerade	0,8
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,6

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	1,6
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	1,6

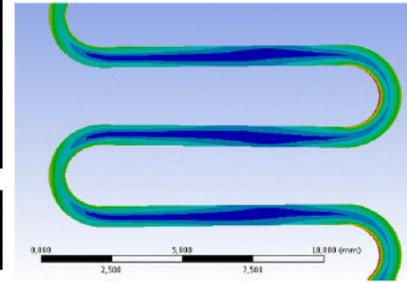


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	133,05	1,1813
10	264,48	2,3413
15	394,08	3,4774
20	521,73	4,5873
25	647,32	5,6697
30	770,77	6,7234
35	892,07	7,748
40	1011,2	8,7434
45	1128,1	9,7098
50	1242,9	10,648
55	1355,7	11,558
60	1466,3	12,44

unterer Spannungswert	892,07
oberer Spannungswert	1011,2
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,989926971

Druck bar	Weg mm
39,95	8,73

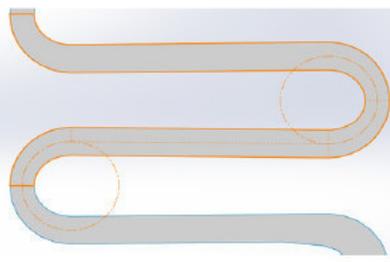
im Vergleich: 0,58



System 9.13

Dicke:	
Dicke Gerade	1
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	1,6
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	1,6

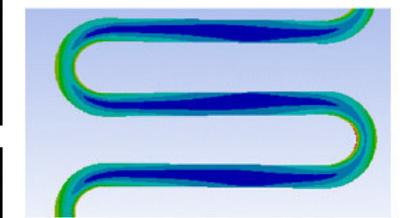


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	127,3	0,71633
10	253,77	1,4267
15	379,36	2,1307
20	504,01	2,8279
25	627,68	3,5178
30	750,32	4,2001
35	871,92	4,8746
40	992,42	5,5409
45	1111,8	6,1988
50	1230,1	6,8482
55	1347,2	7,4889
60	1463,2	8,1209

unterer Spannungswert	992,42
oberer Spannungswert	1111,8
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,147260848

Druck bar	Weg mm
40,74	5,64

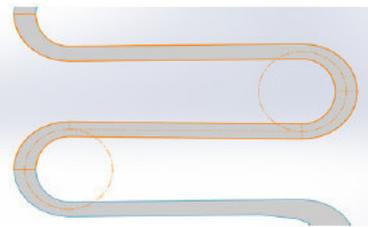
im Vergleich: -2,51



System 9.14

Dicke:	
Dicke Gerade	0,6
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	1,6
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	1,6

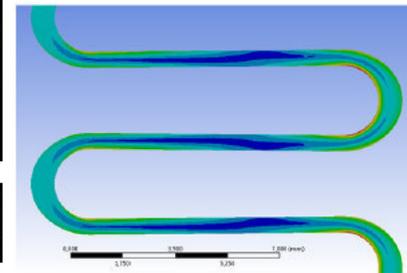


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	177,1	1,8697
10	350,09	3,6792
15	517,71	5,412
20	679,21	7,059
25	834,24	8,6169
30	982,76	10,087
35	1124,9	11,473
40	1261	12,78
45	1391,2	14,014
50	1516	15,181
55	1635,8	16,287
60	1750,8	17,338

unterer Spannungswert	982,76
oberer Spannungswert	1124,9
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,191642043

Druck bar	Weg mm
30,96	10,35

im Vergleich: 2,20



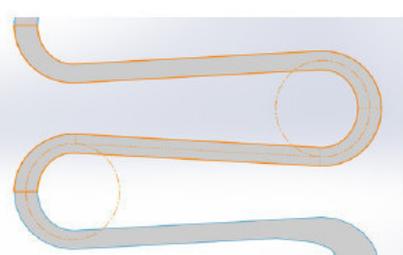
Ab dem System 9.15 werden mehrere Parameter gleichzeitig verändert, um noch bessere Resultate zu erlangen.

Veränderung an mehreren Parametern

System 9.15

Dicke:	
Dicke Gerade	0,7
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	1,8
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	1,8

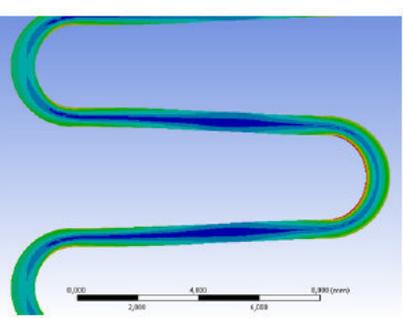


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	132,07	1,4631
10	265,66	2,9368
15	399,95	4,4115
20	534,08	5,8785
25	667,34	7,3276
30	799,03	8,7509
35	928,6	10,141
40	1055,6	11,493
45	1179,6	12,803
50	1300,6	14,069
55	1418,2	15,288
60	1532,6	16,462

unterer Spannungswert	928,6
oberer Spannungswert	1055,6
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,640944882

Druck bar	Weg mm
38,20	11,01

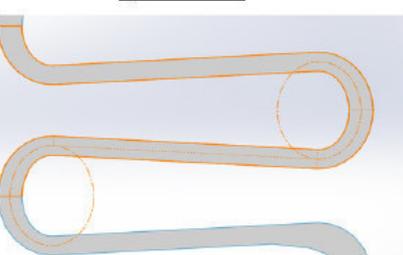
im Vergleich: 2,86



System 9.16

Dicke:	
Dicke Gerade	0,7
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,4
Außenellipse V	1,8
Innenellipse H	1,4
Innenellipse V	1,8

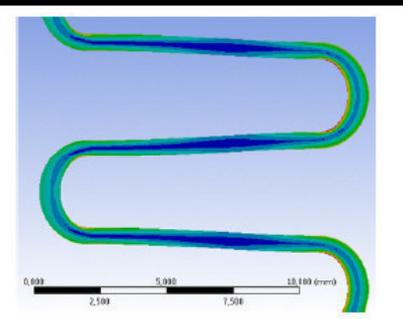


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	147,93	1,5213
10	297,07	3,055
15	446,5	4,5903
20	595,23	6,1167
25	742,51	7,623
30	887,57	9,0998
35	1030,6	10,54
40	1170,4	11,936
45	1306,5	13,286
50	1438,6	14,586
55	1566,7	15,836
60	1690,6	17,037

unterer Spannungswert	887,57
oberer Spannungswert	1030,6
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,855974271

Druck bar	Weg mm
34,28	10,33

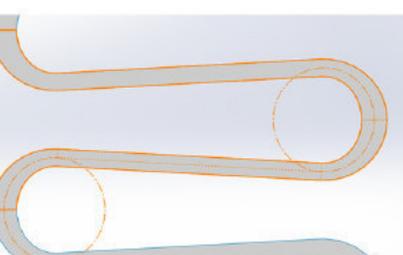
im Vergleich: 2,18



System 9.17

Dicke:	
Dicke Gerade	0,6
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	1,8
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	1,8

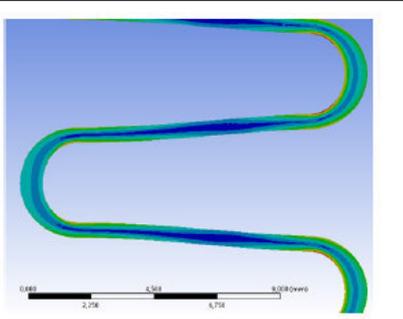


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	176,39	1,9743
10	356,33	3,9814
15	537,46	5,9901
20	717,03	7,9698
25	893,27	9,8908
30	1064,5	11,732
35	1229,7	13,482
40	1388,3	15,134
45	1540,2	16,69
50	1685,4	18,152
55	1824,3	19,527
60	1957	20,822

unterer Spannungswert	893,27
oberer Spannungswert	1064,5
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,681714653

Druck bar	Weg mm
28,41	11,15

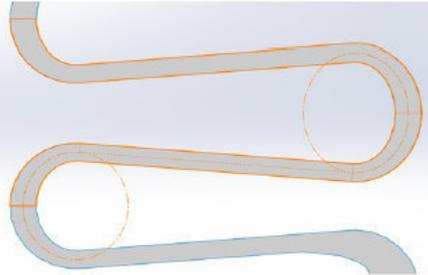
im Vergleich: 3,00



System 9.18

Dicke:	
Dicke Gerade	0,6
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	2
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	1,8

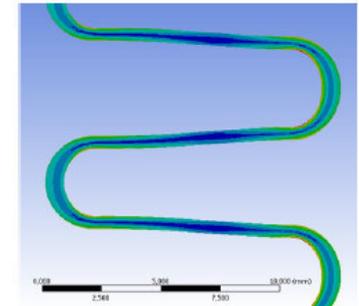


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	169,52	1,9288
10	346,41	3,9373
15	528,77	6,0031
20	714,09	8,095
25	899,58	10,176
30	1083,3	12,209
35	1263,5	14,164
40	1437,1	16,023
45	1603,3	17,774
50	1761,6	19,418
55	1912,1	20,957
60	2055	22,399

unterer Spannungswert	899,58
oberer Spannungswert	1083,3
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,601023296

Druck bar	Weg mm
28,01	11,40

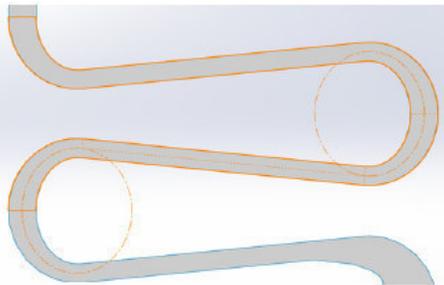
im Vergleich: **3,25**



System 9.19

Dicke:	
Dicke Gerade	0,6
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	2
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	2

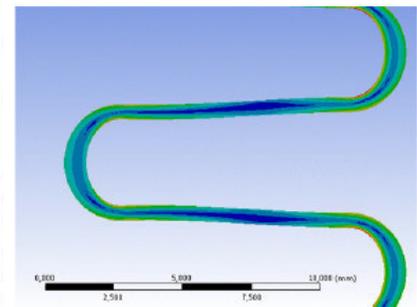


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	156,23	1,8084
10	322,35	3,7252
15	497,8	5,7456
20	681,16	7,8543
25	870,07	10,023
30	1061,6	12,211
35	1252,3	14,379
40	1439,4	16,477
45	1621,4	18,478
50	1797,2	20,363
55	1964,2	22,128
60	2122,5	23,773

unterer Spannungswert	870,07
oberer Spannungswert	1061,6
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,730590508

Druck bar	Weg mm
28,65	11,62

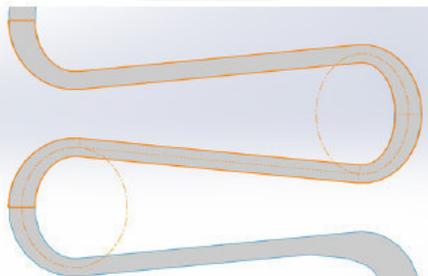
im Vergleich: **3,47**



System 9.20

Dicke:	
Dicke Gerade	0,6
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,4
Außenellipse V	2
Innenellipse H	1,6
Innenellipse V	2

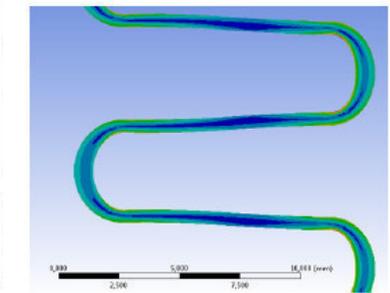


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	172,91	1,8617
10	355,57	3,8392
15	547,23	5,9268
20	746,22	8,1067
25	949,86	10,346
30	1154,9	12,599
35	1357,7	14,82
40	1556,7	16,96
45	1749,7	18,99
50	1933,7	20,894
55	2108,2	22,669
60	2273,2	24,32

unterer Spannungswert	949,86
oberer Spannungswert	1154,9
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,293308623

Druck bar	Weg mm
26,47	11,01

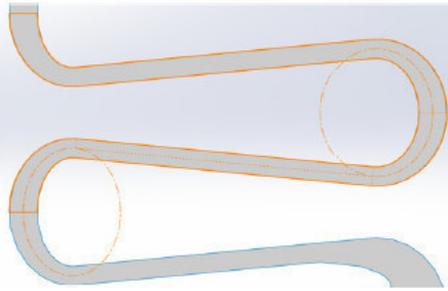
im Vergleich: **2,86**



System 9.21

Dicke:	
Dicke Gerade	0,6
Dicke Ellipse Außen	0,8
Dicke Ellipse Innen	0,8

Neutrale Faser:	
Außenellipse H	1,6
Außenellipse V	2
Innenellipse H	1,4
Innenellipse V	2

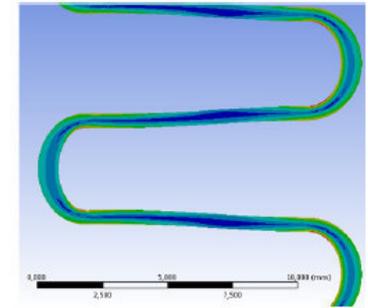


Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	158,18	1,8425
10	326,54	3,7993
15	504,44	5,8654
20	690,32	8,024
25	881,62	10,244
30	1075,2	12,479
35	1267,2	14,685
40	1455,1	16,814
45	1636,7	18,834
50	1810,5	20,731
55	1976,2	22,5
60	2133,8	24,146

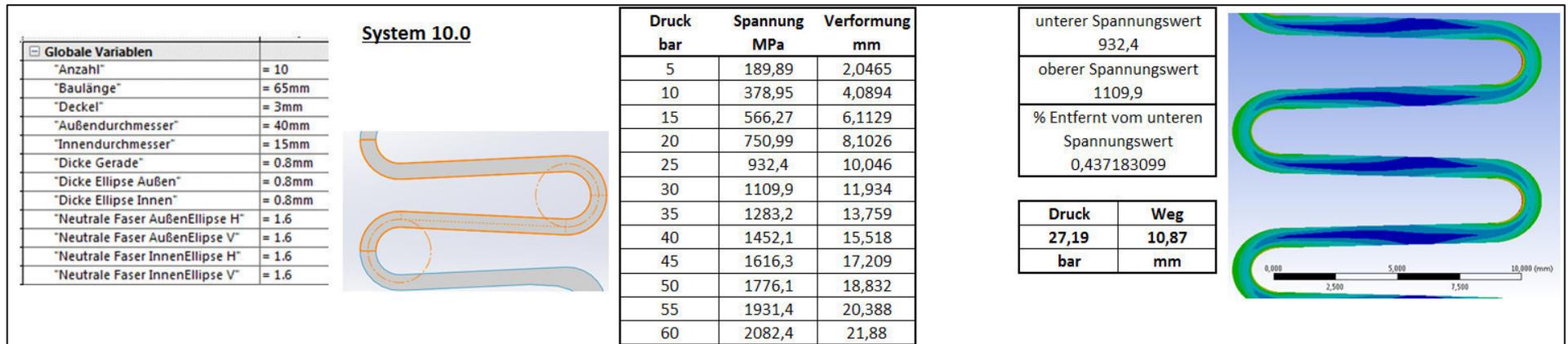
unterer Spannungswert	881,62
oberer Spannungswert	1075,2
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,663188346

Druck	Weg
28,32 bar	11,73 mm

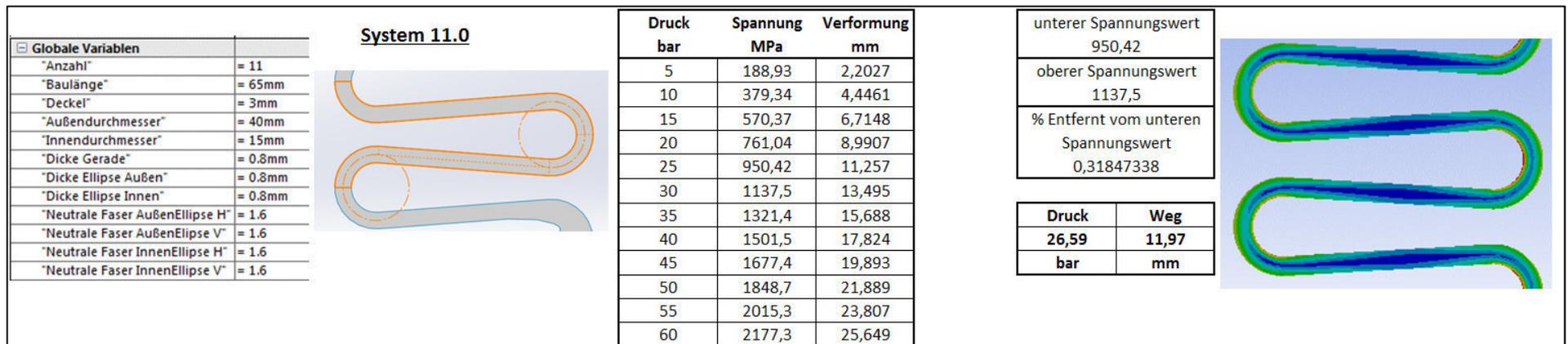
im Vergleich: **3,58**



System 10



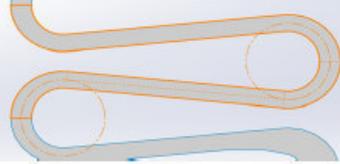
System 11



System 12

System 12.0

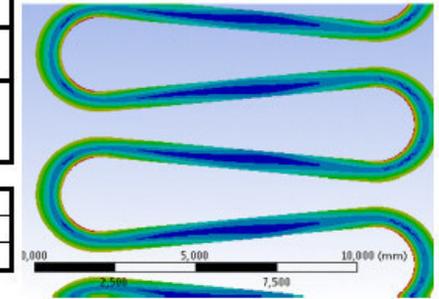
Globale Variablen	
"Anzahl"	= 12
"Baulänge"	= 65mm
"Deckel"	= 3mm
"Außendurchmesser"	= 40mm
"Innendurchmesser"	= 15mm
"Dicke Gerade"	= 0.7mm
"Dicke Ellipse Außen"	= 0.8mm
"Dicke Ellipse Innen"	= 0.8mm
"Neutrale Faser AußenEllipse H"	= 1.6
"Neutrale Faser AußenEllipse V"	= 1.6
"Neutrale Faser InnenEllipse H"	= 1.6
"Neutrale Faser InnenEllipse V"	= 1.6



Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	186,18	2,9007
10	388,93	5,957
15	605,84	9,1485
20	833,02	12,438
25	1065,6	15,77
30	1298,6	19,082
35	1535,5	22,313
40	1769,5	25,416
45	1994,4	28,358
50	2208,2	31,128
55	2409,9	33,724
60	2599,6	36,155

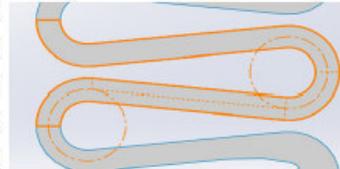
unterer Spannungswert	833,02
oberer Spannungswert	1065,6
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,760942471

Druck bar	Weg mm
23,80	14,97



System 12.1

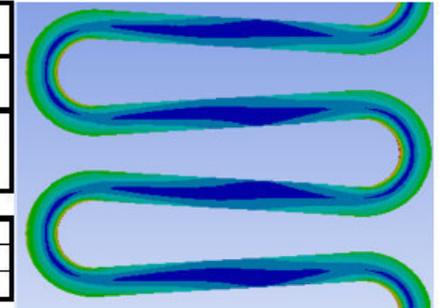
Globale Variablen	
"Anzahl"	= 12
"Baulänge"	= 65mm
"Deckel"	= 3mm
"Außendurchmesser"	= 40mm
"Innendurchmesser"	= 15mm
"Dicke Gerade"	= 1mm
"Dicke Ellipse Außen"	= 1mm
"Dicke Ellipse Innen"	= 1mm
"Neutrale Faser AußenEllipse H"	= 1.6
"Neutrale Faser AußenEllipse V"	= 1.6
"Neutrale Faser InnenEllipse H"	= 1.6
"Neutrale Faser InnenEllipse V"	= 1.6



Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	137,47	1,1751
10	275,27	2,3634
15	413,36	3,564
20	551,66	4,7759
25	690,12	5,9978
30	828,66	7,2286
35	967,21	8,4667
40	1105,7	9,7107
45	1244	10,959
50	1382,2	12,21
55	1520	13,462
60	1657,4	14,714

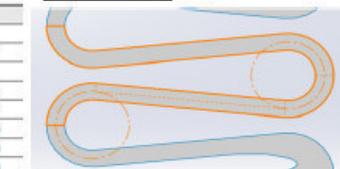
unterer Spannungswert	967,21
oberer Spannungswert	1105,7
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,308975377

Druck bar	Weg mm
36,54	8,85



System 12.2

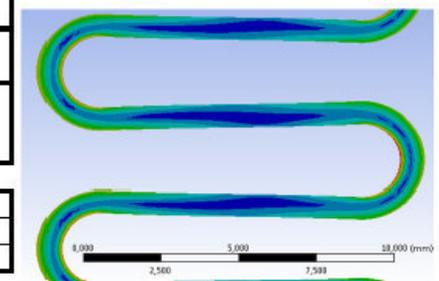
Globale Variablen	
"Anzahl"	= 12
"Baulänge"	= 65mm
"Deckel"	= 3mm
"Außendurchmesser"	= 40mm
"Innendurchmesser"	= 15mm
"Dicke Gerade"	= 0.8mm
"Dicke Ellipse Außen"	= 0.8mm
"Dicke Ellipse Innen"	= 0.8mm
"Neutrale Faser AußenEllipse H"	= 1.6
"Neutrale Faser AußenEllipse V"	= 1.6
"Neutrale Faser InnenEllipse H"	= 1.6
"Neutrale Faser InnenEllipse V"	= 1.6



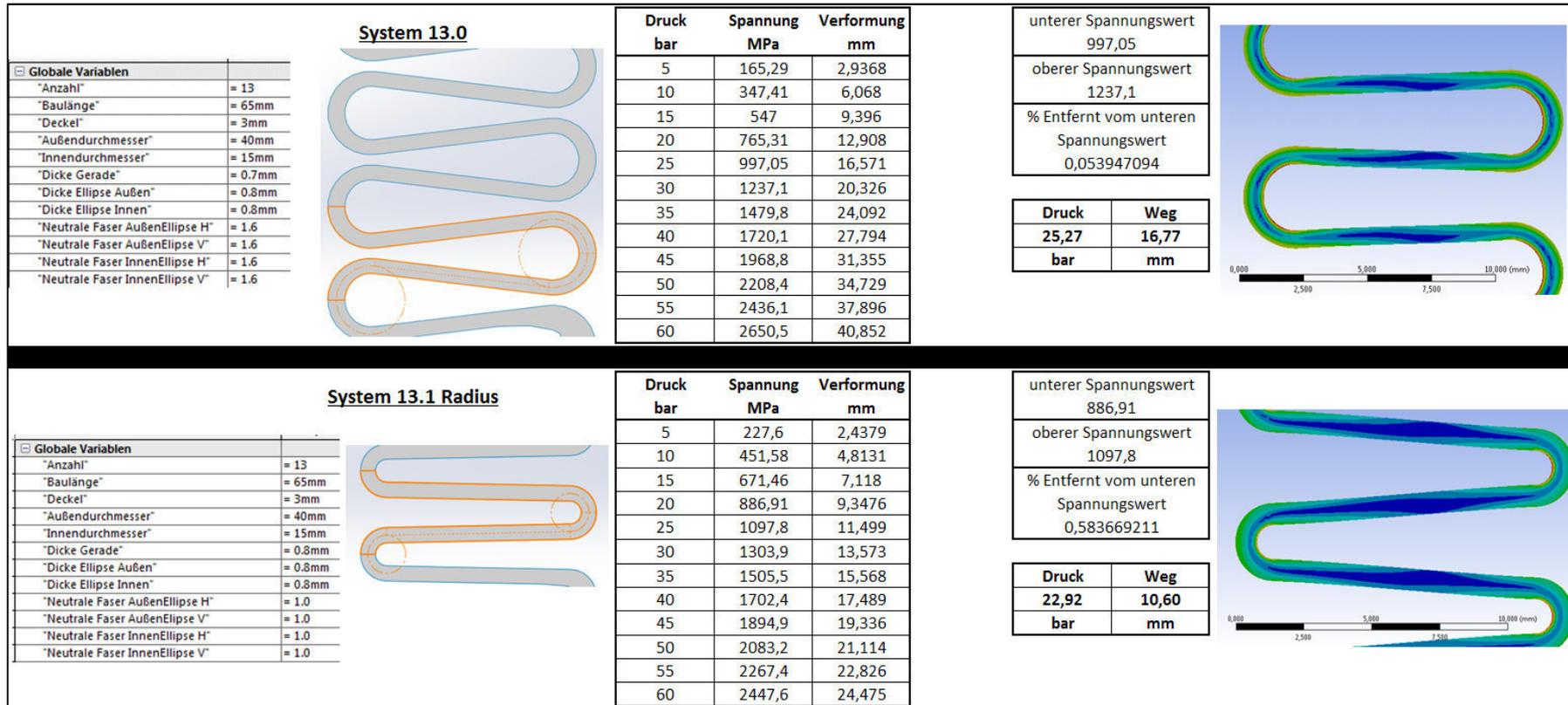
Druck bar	Spannung MPa	Verformung mm
5	185,03	2,2987
10	373,09	4,6732
15	563,68	7,1143
20	756,09	9,6086
25	949,39	12,139
30	1142,5	14,683
35	1334,5	17,221
40	1524	19,731
45	1710,3	22,191
50	1892,6	24,586
55	2070,3	26,903
60	2243,1	29,134

unterer Spannungswert	949,39
oberer Spannungswert	1142,5
% Entfernt vom unteren Spannungswert	0,313862565

Druck bar	Weg mm
26,57	12,94

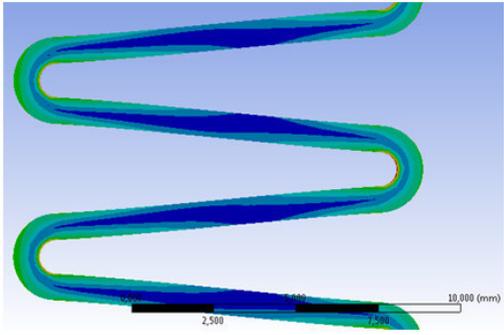


System 13



System 14

Für Wellenrohr mit 14 Windungen sind die ursprünglichen Start- Parameter nicht anwendbar, da sich die Windungen bereits überlappen. Daher wurden neue Startparameter gewählt.

Globale Variablen		System 14.0			Druck Spannung Verformung			unterer Spannungswert		
"Anzahl"	= 13	5	235,92	2,3262	915,69					
"Baulänge"	= 65mm	10	467,32	4,5775	oberer Spannungswert					
"Deckel"	= 3mm	15	693,95	6,7509	1132,5					
"Außendurchmesser"	= 40mm	20	915,69	8,8456	% Entfernt vom unteren					
"Innendurchmesser"	= 15mm	25	1132,5	10,862	Spannungswert					
"Dicke Gerade"	= 0,8mm	30	1344,5	12,803	0,434989161					
"Dicke Ellipse Außen"	= 0,8mm	35	1551,7	14,669	Druck					
"Dicke Ellipse Innen"	= 0,8mm	40	1754,4	16,466	22,17					
"Neutrale Faser AußenEllipse H"	= 0,9	45	1952,6	18,195	Weg					
"Neutrale Faser AußenEllipse V"	= 0,9	50	2146,7	19,861	9,72					
"Neutrale Faser InnenEllipse H"	= 0,9	55	2336,7	21,467	bar					
"Neutrale Faser InnenEllipse V"	= 0,9	60	2522,9	23,016	mm					

E-Mail des Unternehmens ANTON PAAR vom 15. April 2015

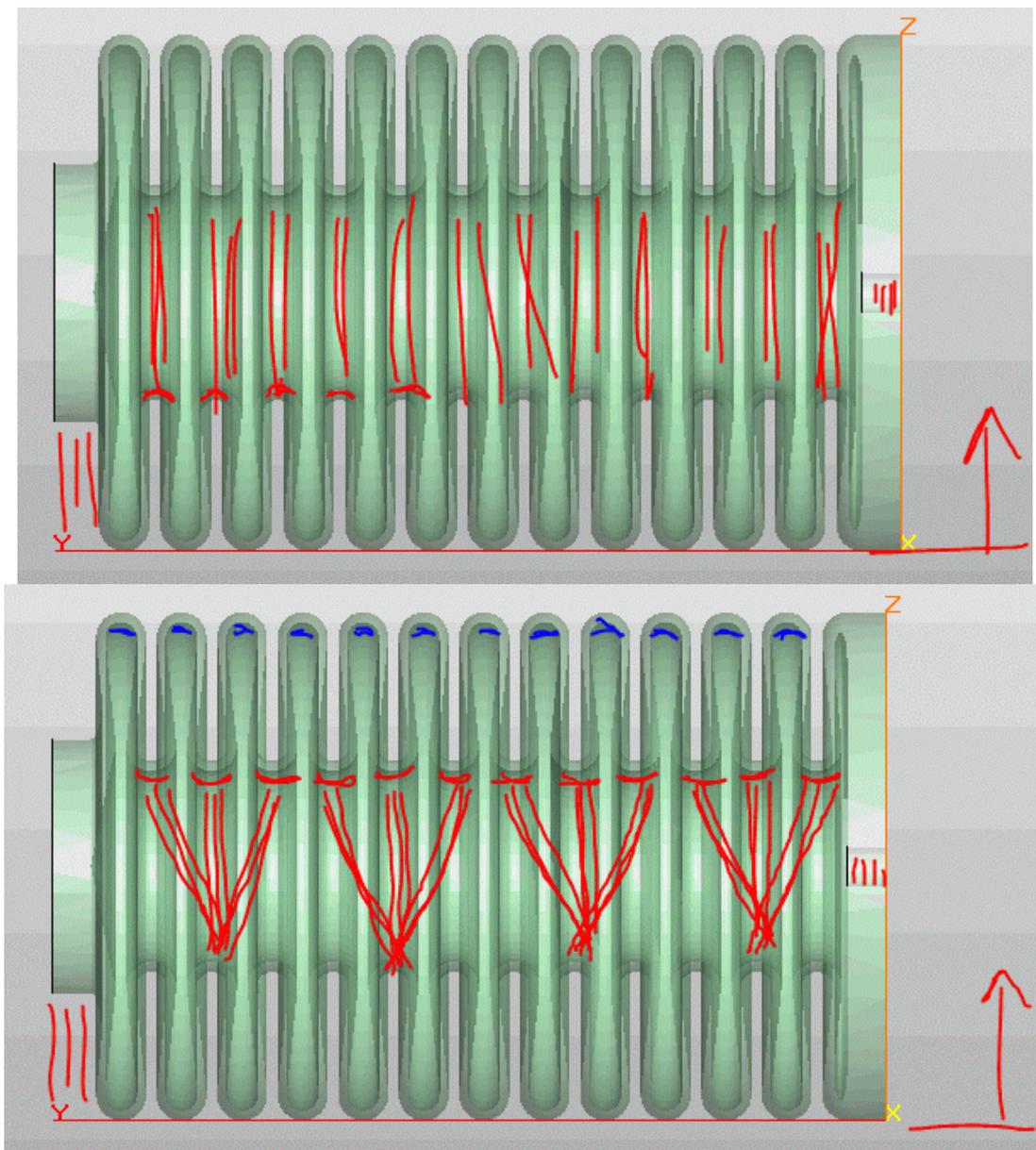
Hallo Herr Bumberger,
vielen Dank für Ihre Anfrage.

Direkt in der vorliegenden Form werden wir Stützgeometrien benötigen, da wir die Wärme aus dem Schweißprozess abführen müssen.

Eine stehende Orientierung ist aufgrund der hinterschnittigen Bereiche ungünstig.

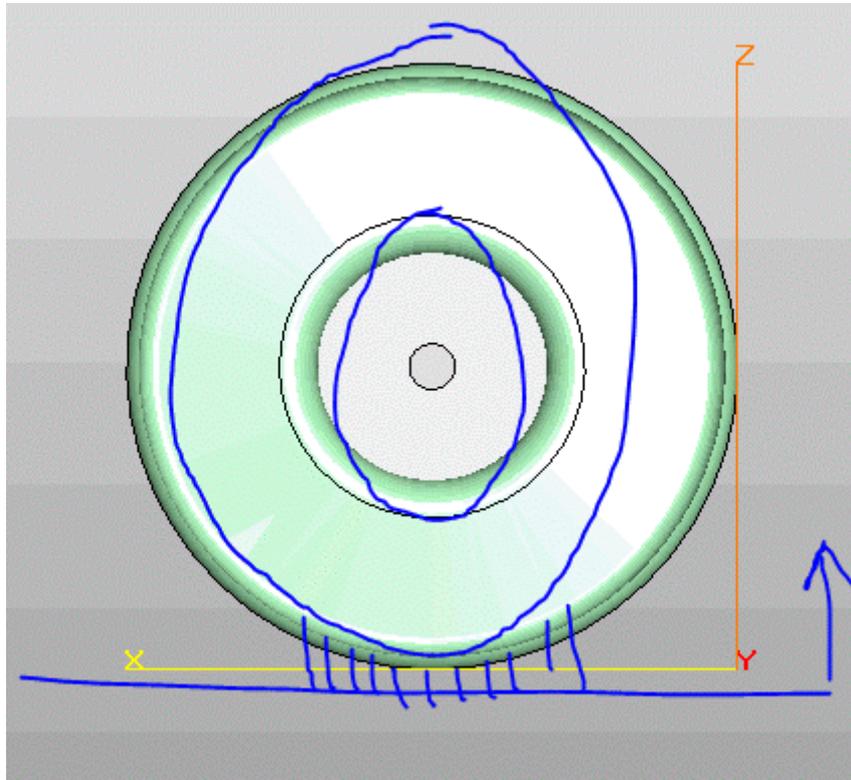
Bei einer liegenden Orientierung benötigen wir Stützstrukturen (da sind mehrere Varianten denkbar) und die blau markierten Stellen werden etwas rauher als 'normal'.

Im Falle von Titan lassen sich die Stützstrukturen allerdings um ein Vielfaches besser entfernen als bei der Edelstahlvariante.



Wenn man von der kreisrunden Form auf eine elliptische ausweichen könnte, wäre eine liegende Fertigung ggf. auch ohne Stützstrukturen möglich (müsste man testen). Anschlussquerschnitte könnten dabei kreisrund bleiben.

Lediglich auf der Unterseite müsste man das Bauteil auf der Bauplattform fixieren.



Sorry für die schlechte Skizzenqualität (liegt am 'snipping tool' von Windows).

Grundsätzlich denkbar wäre es auch die Scheiben zu segmentieren und danach mittels Handlaser zu heften und anfolgend mittels Laser zu verschweißen. Ist allerdings ein etwas höherer Aufwand.

Muss sich das Bauteil in axialer Richtung dehnen können?

Sind irgendwelche Bereiche kritisch hinsichtlich erhöhter Rauigkeit aufgrund von Stützstrukturen?

Benötigen Sie eine hohe Bauteiloberfläche?

Sobald wir eine Geometrie präferenzieren können, wird unser Bauexperte Herr Roth die Geometrie mal durchkalkulieren. Aufgrund der geringen Baugröße, dürften sich die Kosten aber in Grenzen halten.

Restliches fallweise telefonisch.

Beste Grüße

Stefan Pfanner

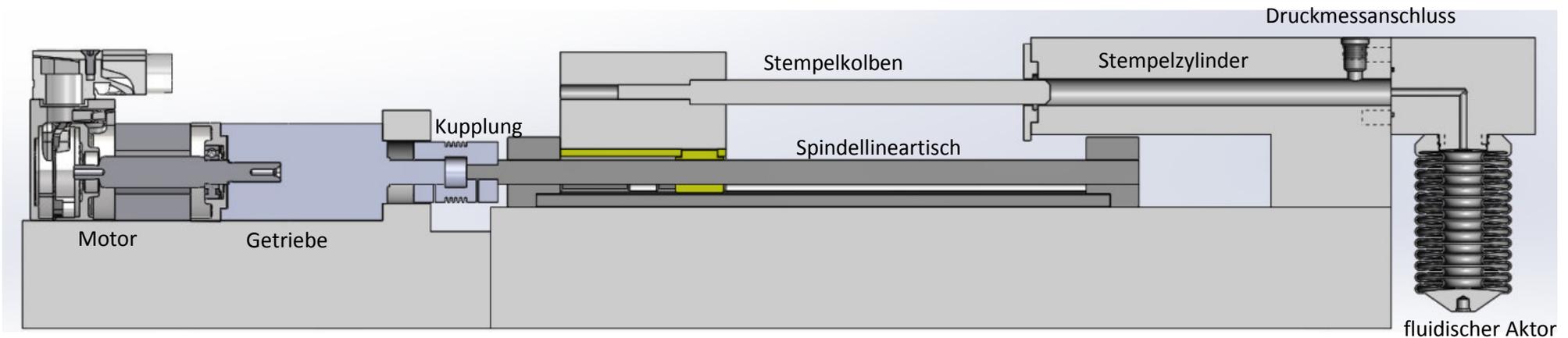
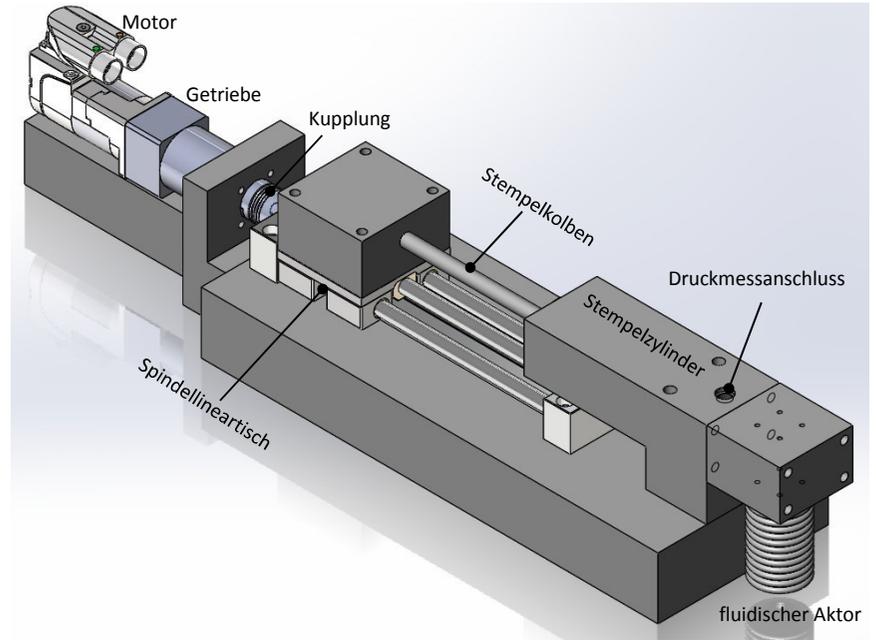
Prüfungsaufbau für den fluidischen Aktor

Im Folgenden wird ein entworfener Prüfungsaufbau für einen fluidischen Aktor (Metallfederbalg) beschrieben. Der Aufbau besteht aus Motor und Getriebe, welche über eine Kupplung an einen Spindellineartisch verbunden ist. An diesem ist der Stempelkolben für den Stempelzylinder angebracht. Die Hydraulikflüssigkeit wird durch die Vorwärtsbewegung in den Metallfederbalg gedrückt, welcher vertikal angebracht ist, um Querverformungen aufgrund der Schwerkraft zu vermeiden. Die Längenänderung wird mit einem Laserinterferrometer gemessen (nicht eingezeichnet) und der Druck zur Vollständigkeit über einen Druckmessanschluss überprüft. Zum Entlüften der Anlage muss der fluidische Aktor anfangs mechanisch gedehnt werden, da sonst die Luft in den Hinterschneidungen nicht austreten kann.

Das Flüssigkeitsvolumen wurde in Solid-Works berechnet. In der Ausgangslage fasst der Metallfederbalg etwa 30 cm^3 , auf 13 mm gedehnt etwa 39 cm^3 . Daher muss der Stempel ein Volumen von 9 cm^3 fassen können. Bei einem gewählten Stempeldurchmesser ergibt sich der erforderliche Verfahrensweg zu etwa 115 mm .

Empfohlene Bauelemente

- Motor: Kompaktmotor (Synchronmotor) des Unternehmens Bernecker und Rainer, Baugröße 1, Typ: 8LVA1.¹
- Getriebe: Planetengetriebe mit Abtriebswelle des Unternehmens Bernecker und Rainer, Typ: 8GP40.²
- Kupplung: Miniaturbalgkupplung mit geteilter Klemmnabe des Unternehmens R+W, Baureihe MKH 20 mit Gesamtlänge 35 mm .³
- Spindellineartisch: Spindellineartisch des Unternehmens IGUS, Baureihe DryLin® SLW: Artikelnummer SLW-1040 mit Baulänge 150 mm .⁴



¹ Quelle: Bernecker + Rainer Industrie-Elektronik (2015): <http://www.br-automation.com/de-at/produkte/antriebstechnik/kompaktantrieb-8lva/> [Stand 03.08.2015]

² Quelle: Bernecker + Rainer Industrie-Elektronik (2015): <http://www.br-automation.com/de-at/produkte/antriebstechnik/standard-planetengetriebe/> [Stand 03.08.2015]

³ Quelle: R+W Antriebselemente (2015): <http://www.rw-kupplungen.de/produkte/praezisionskupplungen/miniaturbalgkupplungen/mkh.html> [Stand 03.08.2015]

⁴ Quelle: igus (2015): http://www.igus.at/wpck/2363/DryLin_SLW_der_Kompakte?C=AT&L=de [Stand 03.08.2015]

Anhang G: zu Kapitel 7: Ergebnisse und Diskussion

Hier befindet sich die Berechnung zum Stablängeneffekt. Dieser besagt, dass die Höhenverschiebung der Endplattform größer ist als die Längenänderung der Verbindungsstreben.

