Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

zum BMWK-Projekt:

Entwicklung einer Ausgleichskinematik zur Onlinebahnkorrektur im Rahmen des Verbundvorhabens Advanced Machining and Sealing (ADMAS)

Förderkennzeichen: 20W1901E

Erstellt am: 31.07.2024

Firma: Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG
Auf der Römerstraße 1
76228 Karlsruhe
Deutschland

Berichtszeitraum: 01.10.2020 – 31.03.2024

Autoren: David Morof, Christian Muellerleile, Philipp Argus, Yannik Dosch, Tomas Kropaci

All information provided and contained in this document constitutes confidential, proprietary and secret information. It is intended only for the use of the individual or entity to whom it is sent and for the purpose for which it was provided. Any dissemination or copying of this information to anyone other than originally specified without the written consent of Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG is strictly prohibited!

© Physik Instrumente (PI)

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzdarstellung des Projektes 3

1.1 Aufgabenstellung 3

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens 5

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 6

1.4 Stand der Wissenschaft der Technik 8

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 11

2 Eingehende Darstellung der Projektergebnisse 12

2.1 Anforderungen- und Schnittstellendefinition 12

2.2 Beschreibung der realisierten Hexapod Ausgleichs-Parallelkinematik 15

2.2.1 3D-druckbare Faltenbalgdichtung 17

2.3 Beschreibung der realisierten Elektronik-Architektur zur Regelung der Parallelkinematik 19

2.4 Positionierfähigkeit des Hexapod-Systems im Test 21

2.4.1 Ergebnisse Einzelbein-Dynamikuntersuchungen 21

2.4.2 Minimale Schrittweite, Linearität, Wiederholgenauigkeit und Umkehrspiel 25

2.4.3 Ergebnisse Dynamikuntersuchungen mit dem Hexapod-System 28

2.4.4 Erreichbare Genauigkeiten im Anwendungsfall Fräsen 32

2.5 Condition Monitoring 35

2.5.1 Allgemeine Beschreibung 35

2.5.2 Voruntersuchung an einem Einzelbeinprüfstand 35

2.5.3 Erstellen einer Testroutine für den Kundeneinsatz 36

2.6 Schlussfolgerung 39

2.7 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit 40

2.8 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse 40

2.9 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 40

2.10 Veröffentlichungen der Ergebnisse 40

2.11 Wissenschaftliche Referenzen und Patente 41

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

1 Kurzdarstellung des Projektes

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel des hier beschriebenen Teilprojekts im Verbundvorhaben „ADMAS“ war die Entwicklung einer hochdynamischen und kostengünstigen Ausgleichskinematik zur Minderung der Prozess- und Zeitkosten bei der Konturenbearbeitung von A320 Flügelschalen. Das Positioniersystem sollte hierfür mit einem Standard-Industrieroboter kombiniert werden, um zusätzlich zur groben Positionierung eine hochdynamische Feinpositionierung der Bearbeitungs- bzw. Versiegelungswerkzeuge zu ermöglichen. Mittels einer zu entwickelnden Echtzeitregelung sollte die Bearbeitungsbahn anhand gezielt vermessener Bauteilmerkmale an die tatsächliche Bauteilgeometrie adaptiert werden, wobei die Ausgleichskinematik die hierzu erforderlichen, hochdynamischen Korrekturbewegungen ausführt. Hierfür mussten die Anforderungen an die Ausgleichskinematik gemeinsam mit den Partnern erarbeitet werden, um insbesondere die gewünschten Abmessungen, Schnittstellen, Stellwege, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Genauigkeiten, Umweltbedingungen in der Produktion, zu erwartende Prozesskräfte, bewegte Masse und den Energieverbrauch bei der Entwicklung zu berücksichtigen. In die Entwicklung sollten zudem die Ergebnisse von Voruntersuchungen einfließen, die beim Partner Fraunhofer IFAM durchgeführt wurden, um den auszugleichenden Fehler abzuschätzen. Gemeinsam mit den Partnern des Verbundvorhabens wurde ein Wechselmechanismus für die Bearbeitungs- bzw. Versiegelungswerkzeuge in die Ausgleichkinematik integriert. Die Entwicklungsaktivitäten umfassten Konstruktion, Inbetriebnahme und Parametereinstellung der Ausgleichskinematik, Prüfung bzgl. Sicherheit, EMV, Standfestigkeit etc. sowie die Anbindung der zugehörigen Kinematik-Steuerung an die übergeordnete Systemsteuerung. Zum Abschluss des HAP 2 wurden umfangreiche Funktionstests der Kinematik in einer idealisierten Umgebung durchgeführt. Des Weiteren war PI im HAP 6 "Integration und Validierung in idealisierter Arbeitsumgebung" beteiligt. PI begleitete und unterstützte zudem die Inbetriebnahme und Integration der Ausgleichskinematik in das Gesamtsystem. Abschließend wurde die Kinematik im Gesamtsystem erprobt und validiert.

Für die generelle Aufgabenstellung der Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme des Parallelkinematik-Systems wurde in Kapitel 2.1 mittels Definition des Lastenhefts ein umfangreiches SMART-Ziel definiert, das vor allem hinsichtlich aufgebrachter Last und benötigter Beschleunigungen im gegebenen Bauraum herausfordernd war. Ausgehend von dieser generellen Aufgabenstellung wurden weitere untergeordnete SMART-Ziele innerhalb der Vorhabensbeschreibung definiert. Diese stellten interne Entwicklungsziele dar und sollen an dieser Stelle aufgeführt werden:

Thema	1. Verbesserung der Wartbarkeit unter Berücksichtigung zu ermittelnder Wartungsintervalle, Gegebenheiten in der Industrieumgebung und Einhaltung der Genauigkeitsanforderungen 2. Integration von Diagnosemöglichkeiten zur Erkennung des Systemzustandes, um z.B. erforderliche Wartungsintervalle planen zu können
Spezifisch	• Bestimmung der Aussagekraft von Indikatoren hinsichtlich Verschleißes von Schraubgetriebe und Lagerung • Vibrationsspektrum durch Beschleunigungssensoren bestimmen, Vibrations-Baseline messen

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

	• Vorgehen für Routine-Test-Sequenz zur Datenaufnahme und Ablage durch IFAM definieren und umsetzen • Wartungsintervalle festlegen (nicht umsetzbar aufgrund der fehlenden Datenlage/ Betriebszeit)
Messbar	• Sensorik im Einzelbein integrieren (Beschleunigungssensor, Motortemperaturfühler) • Controller/ Treiberarchitektur in der Lage Sensorik Signale hochfrequent abzurufen/ speichern • Skript/ Zugangsmöglichkeit für Datenaufnahme und Ablage/ Automatisierung
Attraktiv	• Bei hochgenauen Positioniersystemen bedeutet bereits ein Umkehrspiel im einstelligen µm-Bereich ein Systemausfall/ Kundenreklamation. Dieses verschleißbedingte Verhalten lässt sich im Feld/ beim Kunden schwierig mittels konventioneller Messtechnik (Kap-Sensorik/ Interferometer) detektieren. • Anlagenstillstand = sehr große Produktionsverluste
Realistisch	• Nur bedingt innerhalb des Projekts umsetzbar, da Stückzahl 1 und keine Langzeitdaten erzeugbar, die Integration innerhalb des Einzelbeins, sowie Datenverarbeitung- und Abruf kann umgesetzt werden.
Terminiert	• Projektende

Thema	3. Weiterentwicklung der Kapselung, um die mechanischen und elektronischen Komponenten wirkungsvoll vor dem Einfluss der Umweltbedingungen in einer Produktionsumgebung zu schützen (z.B. Staub, Flüssigkeiten wie Kühlschmierstoffe, Feuchtigkeit) 4. Verbesserte Anbindung der bewegten Kabel innerhalb des Hexapoden unter Beachtung der geometrischen Randbedingungen der Schnittstellen zum Wechselmechanismus für die Bearbeitungs- bzw. Versiegelungswerkzeuge 5. Definition tauglicher und für die Industrieumgebung typischer Kommunikationsschnittstellen, Protokolle und Steckverbinder in Abstimmung mit den Partnern des Verbundvorhabens
Spezifisch	• Notwendige IP-Klasse festlegen für diese bestimmte Umgebung (IP54) • Einzelbeindichtung Konzepte erarbeiten und testen (bisher keine bewährte Lösung bei PI bekannt) • Definition und Auflistung der benötigten Schnittstellenanbindungen (in Kooperation mit IFAM) • Kabelführung innerhalb des Hexapoden möglichst ohne große Rückstellkräfte
Messbar	• IP-Klasse messen • Rückstellkräfte der Kabel messen • Simulation der Kabelbewegung anhand von Ausrichtung und Länge der Kabel • Gestaltung der Anschlussmöglichkeit: a. entweder Annahme geringe Steckervielfalt bzw. hohe Standardisierung b. oder Austauschbarkeit der Anschlusselemente für Individualisierbarkeit (Problem entsteht vornehmlich durch Schnittstellen innerhalb eines gekapselten Systems)
Attraktiv	• Plug&Play (Industriekompatibilität/ Standards werden verwendet) • Schnittstellenangebot passend für viele Kunden (z.B. Analogie Frässpindel HSK Aufnahme)

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

Realistisch	• Dichtigkeit muss innerhalb des Projektes gelöst werden • Schnittstellenfreiheit und geringe Rückstellkräfte nicht obligatorisch
Terminiert	• Auslieferungsstand Hexapod-System

	6. Weiterentwicklung der integrierten Elektronik wie Motortreiber, Kinematik-Steuerung und Kommunikationsschnittstellen für den robusten Einsatz in einer Industrieumgebung

Spezifisch	• Totzeit EtherCAT Schnittstelle 14-18ms reduzieren
	  ○ Proprietäres Zukauf EtherCAT-Modul ersetzen
	• Verbindung zwischen Controller und Treibern nicht Applikationstauglich (SPI-Kabellänge <1m EMV)
	  ○ Elektrische SPI-Datenübertragung überarbeiten/ ersetzen
	• Austauschbarkeit von Stecker an Treiberbausgangsseite vorsehen (Kompatibilität ermöglichen)

Messbar	• Nachweis Störbeständigkeit durch Vergleichssysteme (Glasfaserdatenübertragung Störsicherheit = Stand der Technik) – Umsetzung jedoch nicht trivial • Totzeit EtherCAT Schnittstelle (Maximalangabe = 3 Taktzyklen = Datenanfrage, Verarbeitung, Datenabruf = 0,5ms*3 = 1,5ms * Sicherheitsfaktor (2) = Ziel Totzeit auf <3ms reduzieren)
Attraktiv	• Architekturfreiheit für Hexapodsystem aus Controller/ Treibern und Mechanik (Hexapod-Manipulator) herstellen • keine explizite Dichtung des Controllers nötig „Schaltschrankkomponente“ mit Standard-nicht gedichteten Schnittstellen • EMV-Robustheit, Kompatibilität mit Kundenanlagen • Verdrahtung für Individualisierbarkeit Kundensystem möglich
Realistisch	• Kommunikation zwischen Treibern und Controller muss innerhalb des Projektes robust gelöst werden
Terminiert	• Auslieferungsstand Hexapod-System

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

PI stattet seit über 20 Jahren Kunden mit Hexapoden aus, die in unterschiedlichsten Applikationen (Astronomie, Automatisierung, Medizintechnik, Siliziumphotonik, Telekommunikation, uvm.) eingesetzt werden [Rud15, San18]. Die Expertise liegt dabei in der mechanischen Dimensionierung und der Ausarbeitung von parallelkinematischen Systemen. Dazu zählen zum Beispiel die Definition der kinematischen Struktur, die Entwicklung von Antriebssträngen (Motor-Getriebe-Spindel-Systeme, piezomagnetisch oder elektromotorbasiert) [Gloe04], die Entwicklung von Übertragungselementen wie z.B. Gelenke (Kugel- oder Kardangelenke, Rotationsachsen mit Achsversatz, Festkörpergelenke) [Gloe09], als auch die Entwicklung der zugehörigen Ansteuerelektronik (Motortreiber, Kommunikation, ...) sowie der Ansteueralgorithmen (kinematische Berechnungen, Bahn- und Trajektoriengeneration) [Rud10]. Die Anwendung von Hexapoden innerhalb von Bearbeitungsmaschinen (Fräsen, Drehen, ...) gehört klassischerweise nicht zu den Anwendungsgebieten der Hexapoden von PI, wurde jedoch in der Vergangenheit bereits in einer Forschungskooperation getestet [Muth23].

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

Die Expertise von PI spiegelt sich darüber hinaus in der Entwicklung der Verkaufszahlen von Hexapoden wider, die im Jahr 2022 eine hohe dreistellige Anzahl an Hexapodsystemen erreicht hat.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde mit einer Laufzeit von 3 Jahren geplant und in 7 Hauptarbeitspaketen (HAP) organisiert. Die Übersicht aller HAPs mit jeweils zuständigem Projektpartner ist in Abbildung 1 zu sehen.

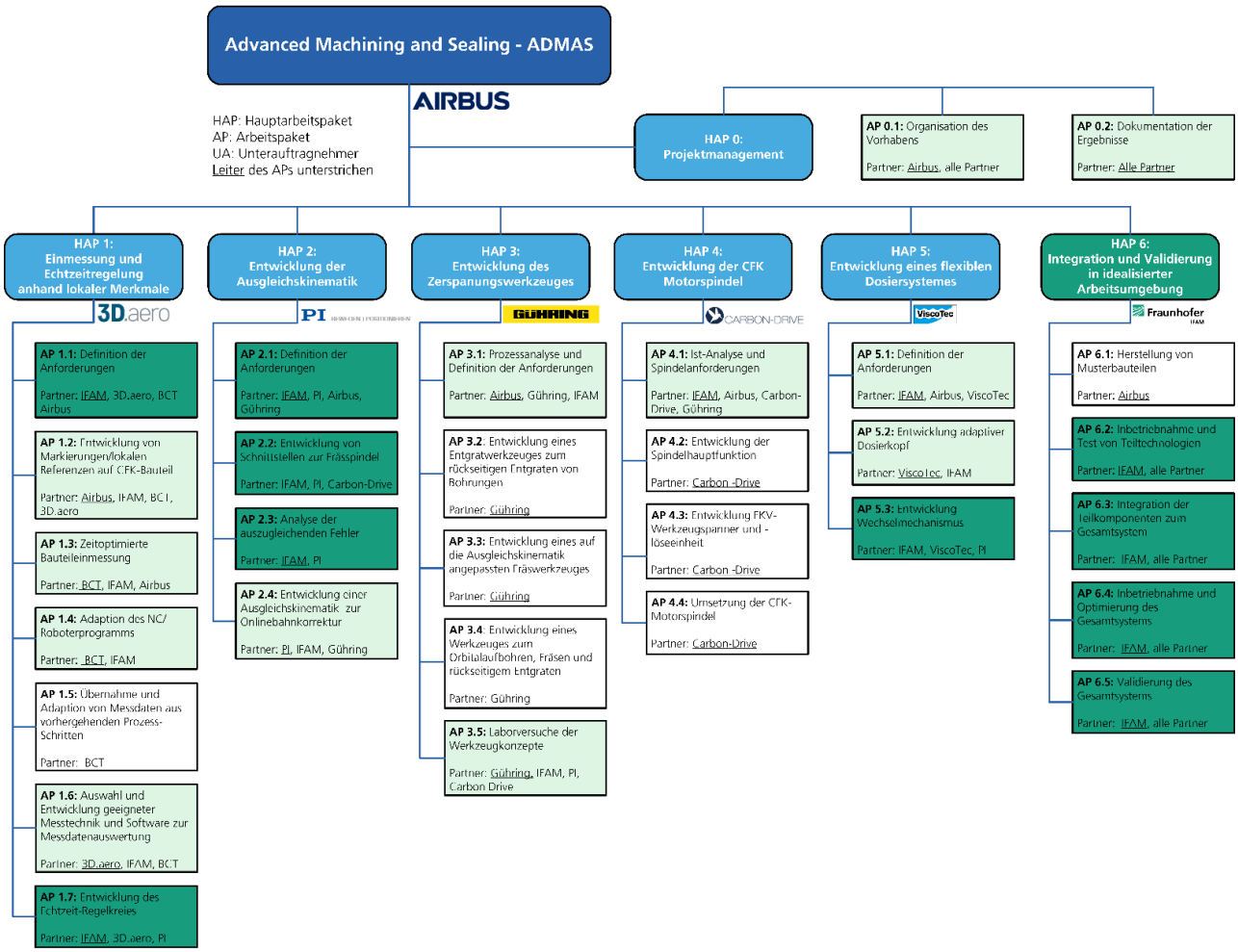


Abbildung 1: Projektstrukturplan mit allen Arbeitspaketen

Der Hauptanteil der Arbeiten seitens PI hat in HAP 2 stattgefunden. Bei der Entwicklung der Ausgleichskinematik standen folgende Aspekte im Vordergrund und liefen chronologisch nacheinander ab:

- Erstellung Pflichtenheft
- Entwicklung Einzelbein
    - Auslegung und Design des Einzelbeins
    - Design Prüfstand
    - Beschaffung aller Komponenten
    - Aufbau und Inbetriebnahme

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

    - Qualifikation des Einzelbeins
    - Konzeptfreigabe des Gesamtsystems
- Elektronik und Software
    - Schaltplan, Layout, Review sowie Beschaffung von:
        - Prozessorboard für optische Datenübertragung
        - Trägerkarte für Test des Prozessorboards
        - Controller mit Gehäuse
        - EtherCAT Interface-Elektronik
        - Industrietaugliche Treiberbox mit optischem Link
    - Programmierung Elektronik
        - Field Programmable Gate Array (FPGA)
        - Hardware-Treiber
        - USB-Funktionalität
        - EtherCAT Funktionalität
        - Funktionale Tests aller Komponenten
- Entwicklung Gesamtsystem
    - Erstellung von Konzepten für
        - Kinematik
        - Mediendurchführung
        - Sicherheit
    - Konstruktion der Mechanik und Elektronik
    - Designfreigabe
    - Beschaffung Hexapod
    - Erstaufbau und Inbetriebnahme
    - Charakterisierung
    - Dokumentation

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

1.4 Stand der Wissenschaft der Technik

In der Forschung im Bereich der Zerspanungs- und Fertigungstechnik zeigt sich, anhand der Anzahl Publikationen, beginnend in den frühen 2000ern im Zeitraum der letzten 20 Jahren ein gesteigertes Interesse an parallelkinematisch aufgebauten Mehrachsverstellern [Rus24]. Die parallelkinematische Struktur kann, verglichen mit einer seriell kinematischen Struktur, höhere Lasten mit größeren Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, genauer positionieren [Rus24]. Fehler in den Antriebsketten summieren sich nicht auf und die bewegte Masse ist vergleichbar klein [Rus24], nachteilig ist jedoch der begrenzte Arbeitsraum. Parallelkinematisch aufgebaute Bearbeitungsmaschinen erfüllen somit wichtige Leistungsanforderungen der Zerspannungs- und Fertigungstechnik und bieten das Potenzial Durchlaufzeiten zu verringern und die Bearbeitungsqualität zu erhöhen. Dennoch existieren trotz intensiver Forschungsanstrengungen der letzten Jahrzehnte in Bezug auf parallelkinematisch aufgebaute Maschinen nur eine Handvoll erfolgreicher, industriell umgesetzter Produkte [Rus24]. Dazu zählen beispielsweise die Produkte Tricept [Ola07] (z.B. T605, T805 und T9000 der Firma Hartwig, Inc.), XMini (der Firma Exechon) und Sprint Z3 (z.B. eingebaut in ECOSPEED F 1540 der Firma Starrag) basierend auf einer Tripod Struktur. Pentapod (z.B. P700 der Firma Metrom) und PKM/ SigmaTau („Parallel Kinematic Module“ der Firma ELHA/ Cognibotics) sind Beispiele für Parallelkinematiken mit 5- und 6-Freiheitsgraden („Pentapod“ und „Hexapod“). Darüber hinaus existieren ausgereifte parallelkinematische Aufbauten, die sich aus Forschungsvorhaben heraus entwickelt haben, z.B. Hexaglide [Heb00], DiaRom [Liu19] oder Hexapoden mit variabler Position der unteren Gelenkanschlüsse z.B. „FreeHex“ [Axi11], siehe Abbildung 2.

Abbildung 2: (Von links nach rechts) Hexaglide [Bos04], DiaRom [Liu19] und Free-Hex [Axi11, Ola14]

FreeHex kann hinsichtlich Baugröße (350x350x350mm) und erreichten Vorschubgeschwindigkeiten (10-30 mm/s) der Frässpindel als Vergleichssystem für die in diesem Projekt zu entwickelnde Parallelkinematik herangezogen werden. Unterschiede existieren bei der Spindelleistung mit maximalem Drehmoment von 0,15 Nm, beim Gesamtgewicht des Hexapoden (7kg, beachte Verzicht von Grundplatte ~10kg) sowie dem aus Steifigkeitsbetrachtungen günstiger gelegenem Tool-Center Point innerhalb der Hexapod-Struktur [Axi11, Ola14], vgl. Abbildung 2. Zusätzlich ergibt sich für das FreeHex-System die Herausforderung hinsichtlich der Positionierfähigkeit aufgrund der variablen Position der unteren Gelenkpunkte, die einen zusätzlichen Kalibrierschritt erfordert. Der Positionsfehler im kartesischen Raum nach Kalibrierung beträgt <60µm [Axi11]. Bei der Bearbeitung einer Kreiskontur mit Durchmesser von 32mm in ein Messingwerkstück, ergaben sich bei fünf unterschiedlichen Konfigurationen der Position der unteren Gelenkwinkel Durchmesserabweichungen von +123µm, +15µm, +23µm, +99µm und +88µm [Ola14].

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

In der Literatur werden auch Fräsversuche mithilfe eines Handhabungshexapoden der Firma Fanuc F200iB geschildert (Abbildung 3). Dieses mittlerweile abgekündigte System wird im Datenblatt mit ±100µm Wiederholgenauigkeit spezifiziert. Die absolute Positionsabweichung konnte in der Studie jedoch mehrere hundert Mikrometer betragen, sodass das System in dieser Konfiguration als nicht fähig für die hochpräzise Bearbeitung befunden wurde [Bar16].

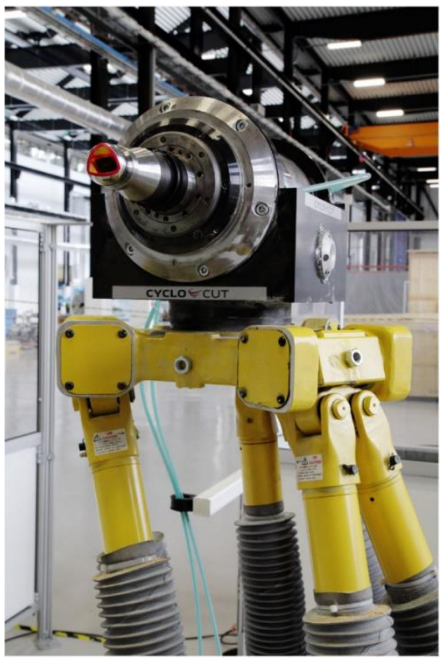


Abbildung 3: Fanuc F200iB mit Frässpindel

Darüber hinaus existieren in der Literatur und der Praxis bereits unterschiedliche Lösungen, um den Nachteil des begrenzten Arbeitsraums beim Einsatz von Parallelkinematiken in Bearbeitungszentren zu überwinden. Einerseits können Bearbeitungsmaschinen mit großen Gesamtabmessungen realisiert werden, mitunter aufgrund des Leichtbaupotenzials der parallelkinematischen Struktur, andererseits werden Kombinationen aus Seriellkinematik mit großen Stellwegen und Parallelkinematik genutzt. Abbildung 4 links zeigt eine solche Kombination aus Tricept T805 und Linearschlitten zur Bohr- und Senkbearbeitung einer Komponente des Airbus A340 [Ola07]. In Abbildung 4 rechts ist die Lösung „Craftsrobot“ dargestellt. Diese besteht aus einer Kombination aus seriellem AGV (Automated Guided Vehicle, dt: Fahrerloses Transportfahrzeug), Knickarmroboter- und parallelkinematischem Endeffektor, der als kompakte und leichte Version von der DiaRom Parallelkinematik abgeleitet ist (Arbeitsraum 300x300x200mm³, Gewicht ~300kg) [Xie22].

Abbildung 4: (Links) A340 Bearbeitungsvorrichtung [Ola07], (rechts) Craftsrobot.

Die Positioniergenauigkeit der Initialversion DiaRom nach [Liu19] (Arbeitsraum 600x600x400mm³, Gewicht ~800kg) wird mit 18µm ohne Prozesskräfte angegeben und ein maximaler Positionsfehler von 68µm bei der Fräsbearbeitung genannt [Xie22]. Die kompakte DiaRom Version im Craftsrobot wird mit einer Positioniergenauigkeit von 15µm spezifiziert und im kombinierten System Craftsrobot wurden Fräsgenauigkeiten an Schweißnähten <100µm und für die Oberflächenbearbeitung <200µm erzielt [Xie22].

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

Diese aus den speziellen Veröffentlichungen bekanntgegebenen Werte decken sich mit den erzielbaren Genauigkeiten im Gesamtarbeitsraum von (Teil-) parallelkinematisch aufgebauten Bearbeitungsmaschinen, die typischerweise zwischen ±10µm bis ±50µm liegen [Ola07, Heb00]. Typischerweise weisen diese Maschinen Vorschubgeschwindigkeiten von 150 bis 1000 mm/s auf und besitzen einen Arbeitsraum von >500x500x500mm³, wobei hier auf den negativen Zusammenhang zwischen Arbeitsraumgröße und maximal erreichbarer Steifigkeit hingewiesen werden muss [Heb00].

In der Literatur existieren auch Demonstrationsanlagen mit dem Ziel die Positionsabweichung einer Seriellkinematik bei der zerspanenden Bearbeitung zu messen und mithilfe einer Parallelkinematik auszugleichen [Sch16]. Ein Beispiel für ein solches System wird in Abbildung 5 dargestellt. Die Abweichungen des verwendeten Industrieroboters von einem Sollkreis belaufen sich bei der spanenden Bearbeitung zwischen -700 und +400 µm, wobei bei Ein- und Austritt des Fräsers in das Werkstück die größten Fehler entstehen. Wird die Positionsabweichung mithilfe des 6D-Messsystems bestimmt und in einem geschlossenen Regelkreis durch den Industrieroboter kompensiert lässt sich eine Verbesserung um 81,5% verglichen mit der unkompensierten Bearbeitung erreichen [Sch16]. Dies entspricht, abgesehen von wenigen Ausreißern, Fehler in einem Bereich von ±100 µm um die Nullfehlerlinie. Wird zusätzlich die Parallelkinematik (3D-Piezo-Ausgleichsaktorik) zur Kompensation der Fehler des Industrieroboters eingesetzt, ergibt sich nach Mittelung der spitzen Ausreißer ein Fehler von ±50 µm, um die Nullfehlerlinie. Dies entspricht einer Verbesserung von 87.4% verglichen mit der unkompensierten Bearbeitung [Sch16]. Die in der Arbeit verwendete 3D-Piezo-Ausgleichsaktorik hat einen Arbeitsraum in X-Y-Z von 0,690x0,505x0,550 mm [Puz11]. Die in den in Versuchen von Puzik erreichte Bearbeitungsqualität konnte mit Hilfe der 3D-Piezo-Ausgleichsaktorik in allen Ausgleichsrichtungen gesteigert werden. Hierbei konnten die statischen Zustellgenauigkeiten beim Fräsen von Treppenstufen von Fehlern bis 152 µm auf Fehler kleiner 33,5 µm reduziert werden. Die Messung der Oberflächenprofile hat ebenso eine deutliche Reduzierung des Profilfehlers von 126 µm auf 41 µm aufgezeigt [Puz11].

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

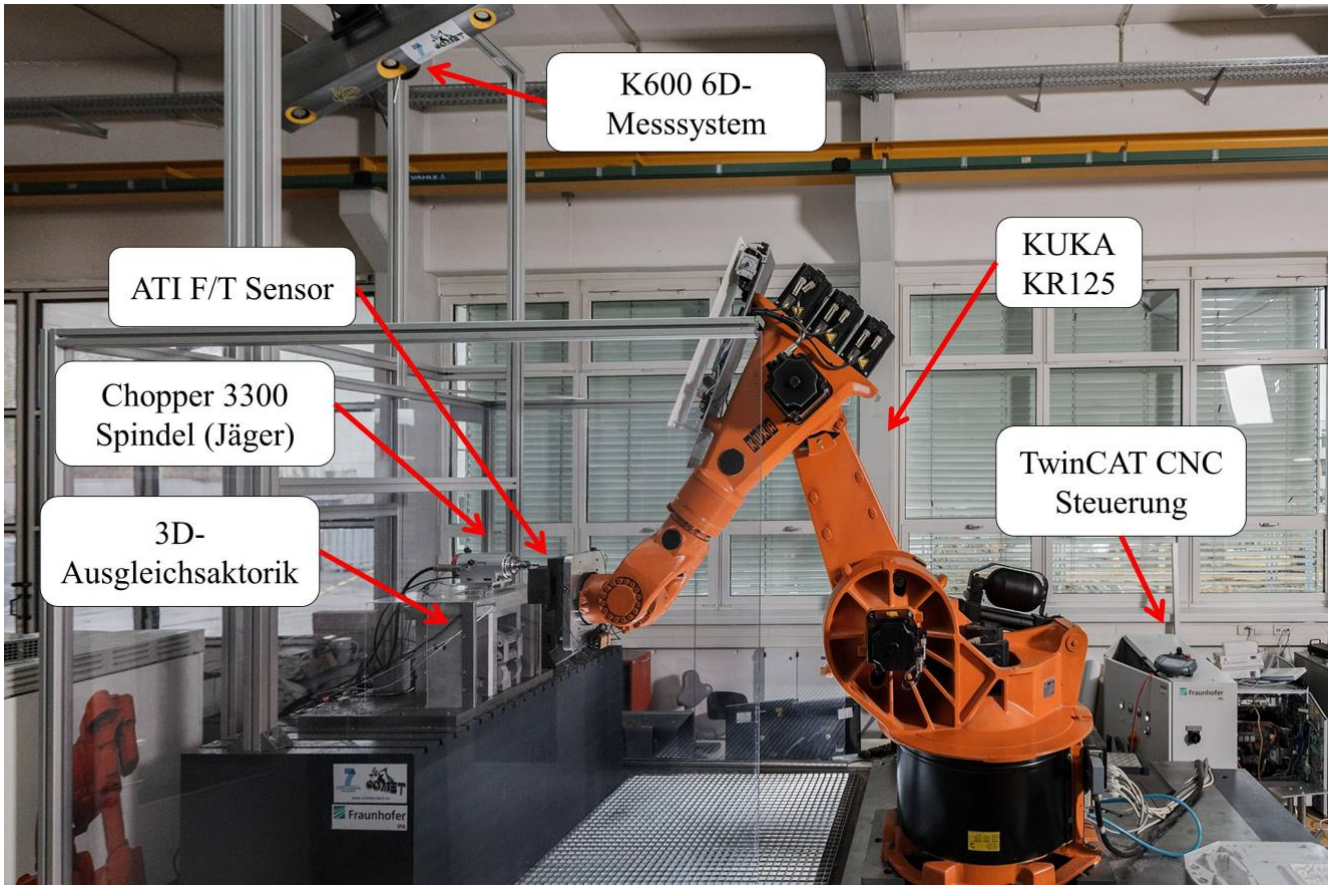


Abbildung 5: Aufbau der Versuchszelle aus [Sch16] mit TwinCAT CNC Steuerung, KUKA KR125 Roboter, ATI Kraft-/Momentensensor Ausgleichsaktorik ([Puz11]), Jäger Spindel und Nikon 6D-Messsystem

Mit Blick auf den Ausgleich von Fehlern bei der Bearbeitung von Bauteilen deren Abmessungen mehrere Meter umfasst, kann das zu bearbeitende Werkstück nicht von dem Knickarmroboter positioniert werden, sodass die fehlerausgleichende Parallelkinematik zwangsweise das Bearbeitungswerkzeug positionieren muss und selbst auf dem Knickarmroboter angebracht ist. Damit ist darüber hinaus eine interpolierende Bahnplanung denkbar (z.B. „scharfe“ Ecken) und es ergeben sich Potentiale bezüglich der Optimierung der Bauteil- Aufspannung/-Eintaktung/-Einmessung. Die in [Sch16] beschriebenen Limitationen bezüglich der Vermessung der bei der Bearbeitung entstehenden Fehler kann durch einen mitgeführten Laserprofilsensor, angebracht an der Deckplatte der Parallelkinematik, der Abweichungen zu im Bauteil vorhandenen Referenzmarken misst, überwunden werden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt ADMAS wurde im engen Austausch mit allen Projektpartnern durchgeführt. Darüber hinaus fand keine Zusammenarbeit mit Dritten statt.

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

2 Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

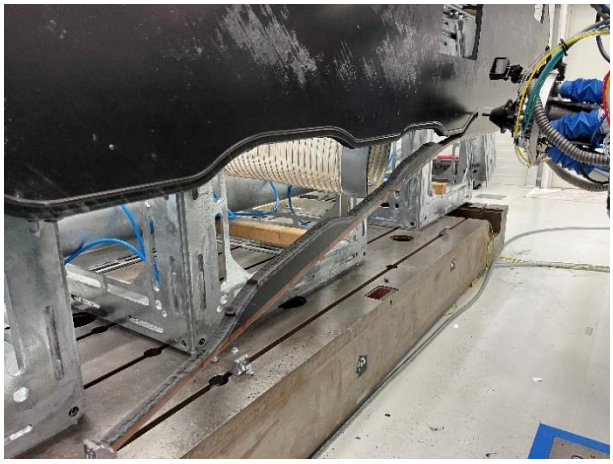
2.1 Anforderungen- und Schnittstellendefinition

Die Sammlung der wichtigsten Anforderungen an das Parallelkinematik-Ausgleich-System, Anbaulasten und Kräfte, sowie deren Lastangriffspunkte, benötigte Verfahrgeschwindigkeiten sowie Beschleunigungen, Arbeitsraumgröße und die Positionierung von Teilkomponenten (vornehmlich Controller und Treiber) bezüglich der möglichen Anbringungsorte (Treiberbox auf dem Linearschlitten, Controller außerhalb des Prozessbereichs) waren ein zentrales Ergebnis der Anfangsphase des Projekts. Die Ausgleichs-Parallelkinematik benötigt mindestens Freiheitsgrade in X und Y (Verschiebungen in der Plattformebene), um die auftretenden Fehler des Industrieroboters zu kompensieren und um kleine Eckradien zu ermöglichen. Zusätzlich kann ein Freiheitsgrad in Z-Richtung genutzt werden, um sowohl den Abstand des Liniensensors zur Referenzkante konstant zu halten als auch, um zusätzliche Bearbeitungsmöglichkeiten (z.B. Bohren, rückseitiges Entgraten) zu ermöglichen. Ein Freiheitsgrad um die Z-Achse, hier als W bezeichnet, kann genutzt werden, um den Auslass des Versiegelungswerkzeugs normal zur Kante auszurichten. Aufgrund dieser Anforderungen und vor dem Hintergrund, dass die kinematische Beschreibung einer Parallelkinematik abhängig von der jeweiligen Konfiguration und Anzahl aktuierter Freiheitsgrade individuell spezifisch ist, wurde als naheliegender Kompromiss eine 6-Achs Ausgleichs-Parallelkinematik mit längenveränderlichen Beinen konzipiert, obwohl die Drehfreiheitsgrade U (Drehung der Plattform, um die X-Achse) und V (Drehung der Plattform, um die Y-Achse) für das Anlagengesamtkonzept nicht nötig sind. Im weiteren Verlauf der Ergebnispräsentation wird daher von einem Hexapod gesprochen, wenn die Parallel-Ausgleichskinematik gemeint ist. Das Hexapod-System umfasst alle zur Positionierung nötigen Teilsysteme, also neben dem Hexapod auch Treiber- und Controllerelektronik, sowie die Firmware zur Regelung der Position. Das Hexapod-System wird auch mit der PI-internen Bezeichnung H-900K101 genannt.

Die Einteilung der Nutzung des Hexapod-Systems in vier Anwendungsfälle ergab sich aus den hohen Prozesskräften beim Fräsen und der Kartuschenbefüllung, des erhöhten Gewichts der Anbaumassen im Fall Kantenversiegelung (Sealing) und den möglichen hohen Beschleunigungen und Fliehkräften, die im Eilgang des Industrieroboters zwischen den Bearbeitungsfahrten oder im Fehlerfall auf die Hexapod-Mechanik wirken. Die Berechnung der resultierenden Kräfte in den Einzelbeinen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Anwendungsfälle mittels Simulationssoftware sowie die Auslegung und Dimensionierung der Komponenten eines Einzelbeins bauten auf diesen Anforderungsdefinitionen auf. Im Folgenden sollen die Anwendungsfälle in Tabelle 1kurz dargestellt werden:

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

Tabelle 1: Übersicht über vier Lastfälle, die während der Anforderungsdefinition betrachtet wurden

Anwendungsfall 1: Fräsen	Anwendungsfall 2: Kantenversiegelung (Sealing)
• Am Hexapod angebrachte Masse: 27,6kg (IST), 25kg (GEFORDERT) Schwerpunkt dx= 2mm, dy= 2,5mm, dz= -35mm • Hexapod in der Regel 90° angebracht („wandmontiert“) – konstante Orientierung des Hexapoden • Prozesskräfte: ±300N (X/Y-Richtung) Kraftangriffspunkt an Spitze des Fräsers 0/0/250mm Abstand zu Deckplatte 	• Am Hexapod angebrachte Masse: 34,5kg (IST), 45kg (GEFORDERT) Schwerpunkt: dx= -7mm, dy= -13mm, dz= -14mm • Hexapod in der Regel 90° angebracht („wandmontiert“) – veränderliche Orientierung des Hexapoden, sodass Versiegelungswerkzeug Normal auf der Kante steht • Prozesskräfte: ±30N (in X-Richtung) Kraftangriffspunkt 0/0/275mm Abstand zu Deckplatte
Anwendungsfall 3: Kartuschenbefüllung an Sealing-Füllstation	**Anwendungsfall 4: Eilfahrt**
• Am Hexapod angebrachte Masse: 34,5kg (IST), 45kg (GEFORDERT) • Hexapod hängt kopfüber • Prozesskräfte: ±300N (in Z-Richtung) • Hexapod ist während der gesamten Kartuschenbefüllung in die Bremsen zu setzen 	• Am Hexapod angebrachte Masse: 34,5kg (IST), 45kg (GEFORDERT) • Beschleunigungskräfte am Endeffektor bei Eilfahrten 3g wahrscheinlich, maximal 7g äußerst unwahrscheinlich • Hexapod ist während der Eilfahrt in die Bremsen zu setzen

Die Anforderungen aus den Lastfällen sind in einem Pflichtenheft niedergeschrieben, welches als zentrales Arbeitsergebnis aus der Anforderungsdefinition hervorging. Die nachfolgende Tabelle 2, soll einen Einblick in die

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

wichtigsten Anforderungen an das Hexapod-System und den jeweiligen Erfüllungsgrad („Value achieved“) geben.

Tabelle 2: Auswahl an Anforderungen an das Hexapod-System im ADMAS Projekt

Specification	Value confirmed	Unit	Comment	Value achieved
MIM Linear X	1	µm	MIM=Minimum Incremental Motion	0,5
MIM Linear Y	1	µm		0,5
MIM Linear Z	1	µm		0,5
Backlash Linear X	15	µm	Backlash = Umkehrspiel, gemittelter Wert (mean, B_m im Test Report)	2,4245
Backlash Linear Y	15	µm		1,9702
Backlash Linear Z	5	µm		0,2016
Hexapod mass	25	kg		29,4*
Hexapod height	380	mm		338
Hexapod Diameter/Footprint	320 Plattform 420 Base	mm		320 Plattform 420 Base
Center of mass	-	mm		140
Acceleration X,Y	10000	mm/s²	Tested with 40kg payload, without external forces, Z-Up	12000
Acceleration Z	6000	mm/s²	Tested with 40kg payload, without external forces, Z-Up	6000
Linear Travel X (combined) ±	20	mm		20
Linear Travel Y (combined) ±	20	mm		20
Linear Travel Z (combined) ±	5	mm		10
IP Protection Class	54		CFK-Dust and Fluids (Water/ oil)	Einzelbein- und Treiberbox IP54

*Optimierung hinsichtlich „tiefen“ Massenschwerpunkts und kompakter Bauweise (Verglichen mit Referenz-Hexapod)

Klar zu erkennen ist, dass die Anforderungen an das Hexapod-System, ausgenommen des Hexapod-Eigengewichts, durch das gelieferte System erfüllt wurden. Im Vergleich zu einem Referenz-Hexapod konnte sowohl die Gesamthöhe durch die neue Elektronik-Architektur als auch der Schwerpunkt des Systems reduziert werden, trotz größerer Frässpindeleintauchtiefe in den Hexapoden und größerer Leistung der Antriebe. Eine entsprechende Vergleichsdarstellung ist in Abbildung 6 zu sehen.

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

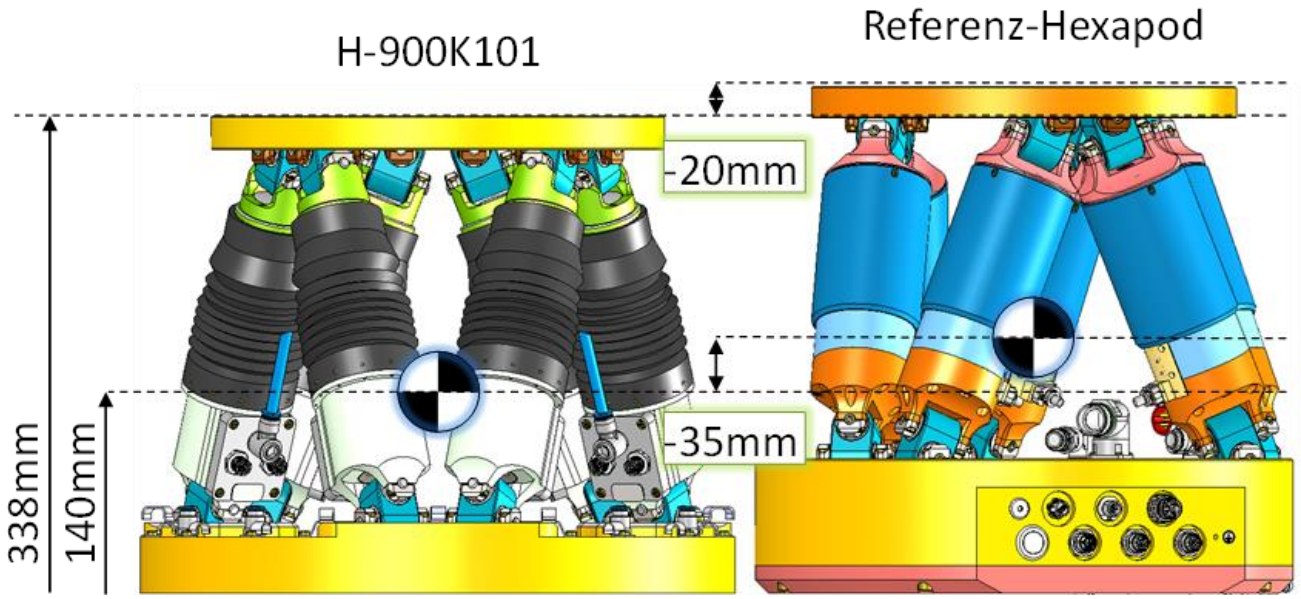


Abbildung 6: Größenvergleich des Hexapoden H-900K101 der im ADMAS LuFo Projekt entwickelt wurde, verglichen mit einem Referenz-Hexapod

2.2 Beschreibung der realisierten Hexapod Ausgleichs-Parallelkinematik

Ausgehend von den Anforderungen an die Hexapod-Ausgleichs-Parallelkinematik wurden Einzelbeine mit folgenden Anforderungen benötigt:

· Minimierung der drehenden und linear bewegten Massen auf der Abtriebsseite des Antriebs ("Gewichtsreduktion")

· Schutz vor CFK-Stäuben, sowie Kühlflüssigkeiten und Schmierstoffen im Falle von Leckagen in der Nähe des Hexapoden ("Weiterentwicklung der Kapselung")

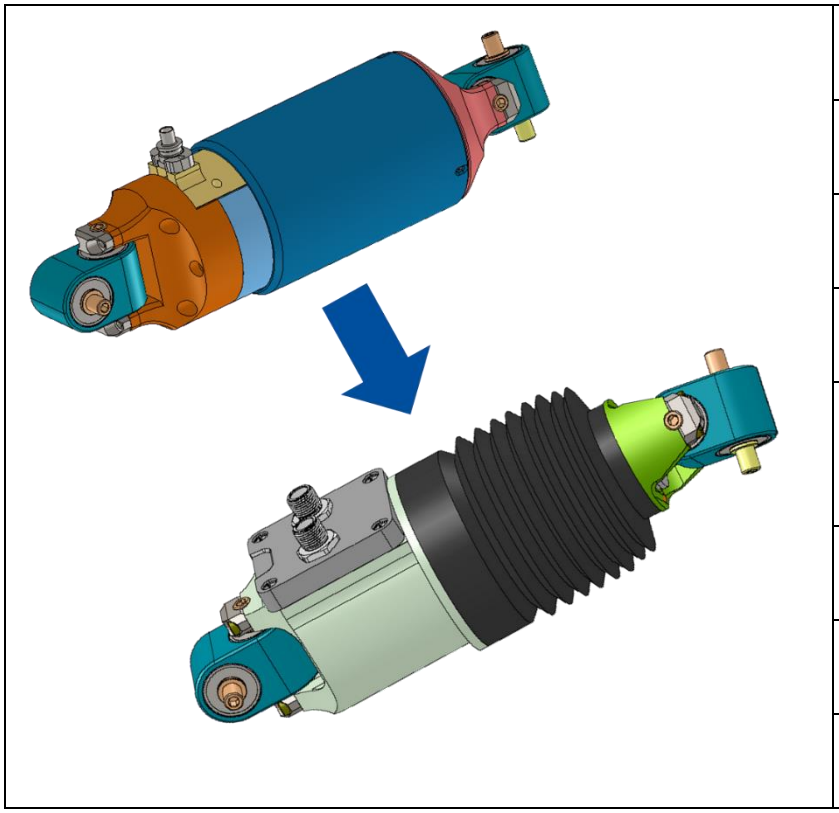
· Integration von Temperatur- und Beschleunigungssensorik, um das Vorhaben "Integration von Diagnosemöglichkeiten zur Erkennung des Systemzustandes" zu realisieren

· Robuste Datenübertragung für die industrielle Umgebung ("Weiterentwicklung der integrierten Elektronik wie Motortreiber, Kinematik-Steuerung und Kommunikationsschnittstellen für den robusten Einsatz in einer Industrieumgebung")

Abbildung 7 liefert einen Überblick über die in der Einzelbeinkonstruktion umgesetzten Neuerungen im Vergleich zu der, in der linken oberen Ecke dargestellten bestehenden Lösung bei PI gleicher Leistungsklasse. Im Folgenden werden die technischen Entwicklungen, bezogen auf die oben genannten Anforderungen, erläutert. Da das Trägheitsmoment drehender Massen von der Massenverteilung in Bezug zur Drehachse abhängt (quadratischer Zusammenhang), wurde zur Reduktion der Drehträgheit ein Antriebskonzept mit bewegter Spindelmutter gewählt. Im Vergleich zu einer Einzelbeinlösung mit tauchender Spindel gleicher Leistungsklasse werden dadurch die Trägheitsmomente der bewegten Komponenten um 40% reduziert und es ergeben sich Vorteile hinsichtlich der Skalierbarkeit des Einzelbeins. Im Allgemeinen bauen Konzepte mit tauchender Spindel kürzer als Konzepte mit tauchender Mutter. Aufgrund der Abmaße der innerhalb der im Hexapod eingesetzten Frässpindel im ADMAS-Projekt, ist die Baulänge des Einzelbeins jedoch kein kritischer Faktor. Auf Komponentenebene wurden in den Einzelbeinen Frameless-BLDC Servomotoren und Bremsen mit bewegten Bremsscheiben eingesetzt, um das Gewicht des Einzelbeins, sowie die drehenden Massen weiter zu reduzieren.

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

Zum Schutz vor CFK-Stäuben stehen zwei grundsätzliche Möglichkeiten offen. Der gesamte Bereich innerhalb des Hexapoden kann zwischen Deck- und Grundplatte mittels einer Roboterschutzhülle abgeschlossen werden oder die Einzelbeine werden jeweils mit passenden Dichtlösungen ausgestattet. Nachteilig an erstgenannter Lösung ist, dass die Kabelführung und Zugänglichkeit innerhalb des Hexapoden erschwert wird und das kein Schutz vor Kühlflüssigkeit und Schmierstoffen ausgehend von der Frässpindel gegeben ist. Im ADMAS-Projekt wurden daher Einzelbeine mittels Faltenbalg zwischen fester Antriebsseite und bewegter Abtriebsseite gedichtet. Aufgrund des parallelkinematischen Aufbaus des Hexapoden, führt ein Ausfahren eines Einzelbeins über den gesamten Stellweg auch zu einer überlagerten Rotation, sodass konventionelle Faltenbälge wie in Abbildung 8 rechts dargestellt, nicht verwendet werden können. Die Abdichtung von Einzelbeinen mittels Faltenbalg gehört deshalb in Produkten von PI nicht zum Standard. Wie in Abbildung 7 erahnt werden kann, sind die Gehäuseteile des Einzelbeins jeweils mit Gummidichtungen verschlossen und das Bein wird über gedichtete M12 Einbaustecker elektrisch mit den Treibern verbunden.



Hochintegrierte Gehäuseteile
Reduktion bewegter Massen
Integration bewegte Dichtung
Reduktion von Dichtstellen
Neukonzeptionierung Endlagenschalter und Übertragung der Beschleunigungssensordaten
Integration von Zustands-Sensorik
Auswahl von gedichteten Anschlüssen
Verbesserte Zugänglichkeit/ Wartung

Abbildung 7: Vergleich zwischen bestehenden Lösungen gleicher Leistungsklasse (oben) und Einzelbein des H-900K101 (unten)

Die Systemzustandserkennung erforderte den Einsatz von zusätzlicher Sensorik im Einzelbein und Verarbeitungselektronik innerhalb von Treiber und Controller. Als wichtiges Kriterium für die Qualität des Einzelbeinantriebs und als Verschleißindikator gilt das Frequenzspektrum der Schwingungen im Schraubgetriebe und der Lagerung, sodass ein passender Beschleunigungssensor ausgewählt und vorab mittels eines Prototypenaufbaus mit hochwertigem Referenz-Beschleunigungssensor verglichen wurde. Zusätzlich wurde eine Temperaturauswertung im Einzelbein realisiert. Um eine robuste Datenübertragung zwischen Einzelbein und Treiberelektronik zu gewährleisten, wurde die Trennung zwischen Daten- und Leistungskabeln im Hexapod-System konsequent eingehalten. Die Daten und Leistungen aus den Einzelbeinen wurden über M12 Kabel auf die Grundplatte übertragen und dort über getrennte Daten- und Leistungssammelkabel mit den Treibern und der zugehörigen Sensorelektronik verbunden.

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

2.2.1 3D-druckbare Faltenbalgdichtung

Die Abdichtung von einzelnen Beinen eines Hexapod-Systems stellt besondere Anforderungen an die Dichtung, da je nach Bewegung der Plattform im kartesischen Koordinatensystem eine Überlagerung der Translationsbewegung mit einer Rotationsbewegung zwischen Antriebs- und Abtriebsseite des Einzelbeins vorliegen kann. Besonders deutlich ist dieser Effekt bei einer Drehung der Plattform um die nach oben gerichtete Z-Achse (siehe Abbildung 8, rechts). Bei einer reinen Translationsbewegung entlang der Z-Achse ist der Effekt vernachlässigbar und es liegt nahezu eine reine Translationsbewegung zwischen Antrieb und Abtrieb des Einzelbeins vor.

Für das ADMAS-Projekt ergab sich frühzeitig der Wunsch, die bisherig verwendete Dichtungslösung für den gesamten Hexapoden (siehe Abbildung 8, links) auf eine Einzelbeinabdichtung weiterzuentwickeln (vgl. SMART-Ziel (3) und (5) in Kapitel 1.1). Sowohl die Apertur (Öffnung der Plattform) wäre anderweitig hinsichtlich der Gestaltung eingeschränkt, als auch die Schnittstellen für die Frässpindel der Firma Carbon-Drive und die Daten- und Leistungsanschlüsse der Einzelbeine. Zusätzlich besteht das generelle Risiko, dass durch Kühlmittel, das innerhalb des Hexapoden aus der Frässpindel austreten kann, Schäden an den Einzelbeinen entstehen können. Konventionelle Faltenbalglösungen wurden zu Beginn des Projektes in Erwägung gezogen, da lediglich eine beschränkte Bewegung des Antriebs vorliegt (= keine unendliche Drehung) und sich der Faltenbalg als robuste Dichtlösung auszeichnet und lediglich zwei statische Anschlussstellen vorliegen. Die bei Zulieferern angefragten konventionellen Faltenbälge (siehe Abbildung 8, rechts) stellten sich als ungeeignet für die Aufnahme von Rotationsbewegungen heraus, da das undefinierte Einknicken ein Risiko zum Verklemmen von Faltenbalg und Komponenten des Einzelbeinantriebs (z.B. Schraubgetriebe) birgt.

Abbildung 8: Abdichtung über den gesamten Hexapod (links) und konventioneller Faltenbalg unter Torsion (rechts)

Aufgrund dieser Unzulänglichkeit wurde im ADMAS Projekt eine Faltenbalgstruktur entwickelt und untersucht, die für die Einzelbeindichtung innerhalb eines Hexapod eingesetzt werden kann (siehe Abbildung 9). Durch die besonders geformten Falten ist im Vergleich zu einem konventionellen Faltenbalg eine Drehbewegung um die Einzelbeinachse, sowie eine Schubbewegung entlang der Einzelbeinachse, als auch eine Überlagerung der beiden zuvor genannten Bewegungen zulässig. Dadurch mussten lediglich die beiden Anschlussstellen des

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

Faltenbalgs statisch dicht sein und es konnte auf eine dynamische Dichtung, wie beispielsweise ein Wellendichtring, verzichtet werden. Um den Anforderungen hinsichtlich Staub- und Wasserdichtheit des Hexapoden gerecht zu werden, mussten einige Entwicklungs- und Fertigungsiterationen bzgl. Gestalt und Fertigungsparameter der im FDM-Verfahren (Fused Deposition Modeling) 3D gedruckten Faltenbalglösung durchlaufen werden. Als Nachweis der Dichtheit wurden die Faltenbälge mit Wasser gefüllt und nach mehreren Stunden auf Leckage hin untersucht und durch ein Prüfinstitut als IP54 tauglich befunden.

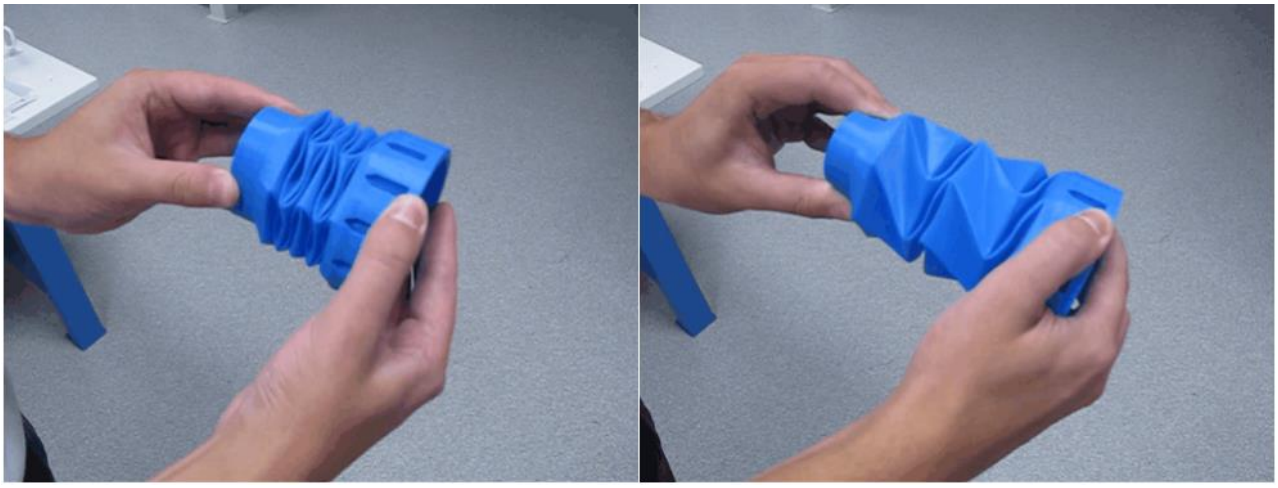


Abbildung 9: Von PI entwickelte Faltenbalglösung für Hexapoden, 3D druckbar

Zwischen 100000 und 200000 Zyklen komplettes Komprimieren und Dekomprimieren des Faltenbalgs zeigte sich bei internen Belastungstests Delamination an den höchstbelasteten Stellen, wie in Abbildung 10 dargestellt. Für Kurzhubbewegungen, ±1mm wie im ADMAS Projekt genutzt, wurde der interne Test nach 700000 Zyklen, ohne Schädigung des Faltenbalges abgebrochen.

Abbildung 10: Höchstbelastete Stellen in der Faltenbalgstruktur zeigen ab 100000 Zyklen von min. bis max. Stellweg Delamination

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

2.3 Beschreibung der realisierten Elektronik-Architektur zur Regelung der Parallelkinematik

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist die Anordnung der Elektronik-Baugruppen des H exapod-Systems innerhalb der ADMAS Demonstrationsanlage dargestellt. Um das Gewicht des Endeffektors am Industrieroboter und den Wärmeeintrag durch Verlustleistung der Treiber-Elektronik zu minimieren, wurde lediglich die Elektronik für Endlagen-, Temperatur- und Beschleunigungssensorik innerhalb des Hexapoden, in den Einzelbeinen, integriert. Treiberbox und Elektronik innerhalb der Einzelbeine sind gegen CFK-Stäube und Kühlwasser IP54 gedichtet, da diese nahe der Bearbeitungszone angebracht werden. Aufgrund der hohen Ströme (bis zu 10A Spitzenströmen) ist der maximale Abstand zwischen Treiberbox und Hexapod begrenzt, sodass die Treiberbox auf dem Schlitten zur Basis des Industrieroboters angebracht wurde. Die Daten sowie Leistungen werden in zwei getrennten tordierbaren Roboterkabeln zwischen Hexapod- und Treiberbox gebündelt übertragen. Auf dem Schlitten ist auch das 230V-Netzteil angebracht. Dieses speist Treiber und damit die Antriebe des Hexapoden mit 48V Gleichspannung, sodass lediglich eine 230V Netzleitung, sowie der 15m Lichtwellenleiter zum Hexapod-Controller über die Schleppkette des Linearschlittens geführt werden müssen. Der Hexapod-Controller selbst befindet sich in großer Entfernung außerhalb der Bearbeitungszelle in einem Schaltschrank.

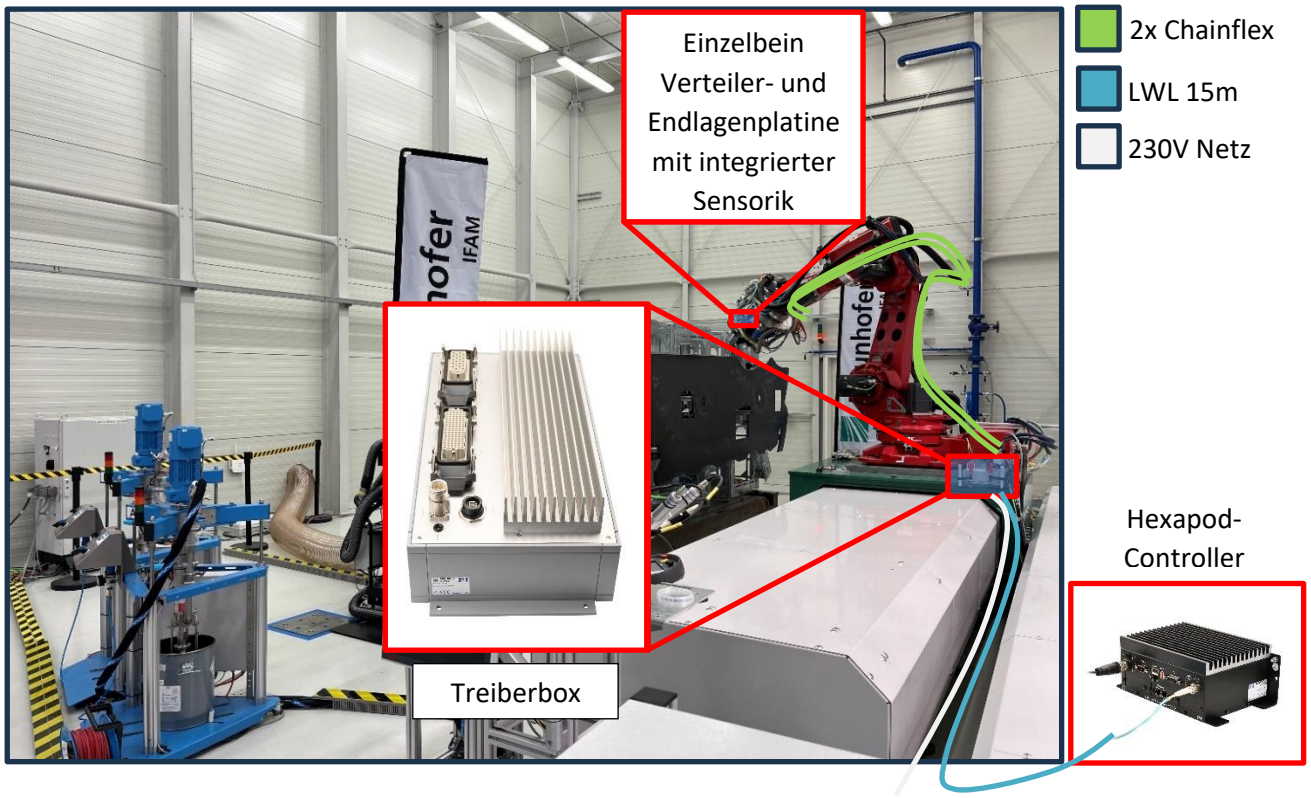


Abbildung 11: Überblick über die Elektronik-Baugruppen und deren Anbringung innerhalb des ADMAS Demonstrators

Im Nachfolgenden Abschnitt sollen die Elektronik-Baugruppen und deren Aufbau beschrieben werden.

Die Treiberbox integriert sechs modulare Antriebsregler (C-410) mit einer Spannung von max. 48V und einem Strom von max. 10A. Zusätzliche Schutzdioden zur Überspannungsbegrenzung wurden eingesetzt. Intern wurden die Antriebsregler über Aufsteck-Trägerboards mit Klemmen mit schraubloser Federkrafttechnik für eine einfache Montage ausgestattet. Durch die digitale Glasfaserschnittstelle zum Hexapod-Controller (neu entwickelter Controller basierend auf PI Hexapodcontroller C-887) konnte die Treiberbox übersichtlich dezentral direkt am Roboterarm platziert werden. Das war notwendig, um den Installationsaufwand, besonders der

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

Verkabelung zu Motoren und Sensoren, zu reduzieren. Der Controller konnte mit reduziertem Platzbedarf und ohne nennenswerte Verlustleistung im Schaltschrank installiert werden und musste somit nicht explizit für die Umgebung innerhalb der Bearbeitungszelle abgedichtet werden.

Die Antriebsregler wurden mit einem intelligenten Leistungsteil ausgestattet und können daher auch die Positions-, Geschwindigkeits- und feldorientierte Stromregelung der Hexapodeinzelbeine digital schließen. So sind Regelbandbreiten von 20kHz direkt am Einzelbeinantrieb möglich, bei gleichzeitiger Erfassung analoger und digitaler Ein- und Ausgangssignale. Hierzu gehören unter anderem Motorstrom, Betriebsspannungen, Position, Beschleunigung, Temperatur aber auch die Überwachung der digitalen Kommunikation zum überlagerten Hexapod-Controller. Ebenfalls bildet ein thermisches I^2T Motormodell das thermische Verhalten der Motorwicklung ab. Der Antriebsregler ist selbst in der Lage den Motor momentenfrei zu schalten, es sind keine weiteren Sicherheitsbeschaltungen notwendig. Wenn auf einem Antriebsregler ein Fehler auftritt, wird über den Hexapod-Controller innerhalb eines Controller Zyklus jeder andere Antriebsregler ebenfalls gestoppt. Mit den hochauflösenden absoluten Multiturngebern ist die aktuelle Position für die Positionsregelung sowie Motorkommutierung immer bekannt. Daher ist nur bei der erstmaligen Inbetriebnahme der Sensor- sowie Motorphasenoffset zu ermitteln.

Der Hexapod-Controller kann über die Glasfaserverbindung mit bis zu 10kHz störsicher und zuverlässig auf die Datenstruktur aller Antriebsregler zugreifen. Über die Glasfaserverbindung kann die Entfernung zwischen dem Hexapod-Controller und der Treiberbox problemlos bis zu 100m betragen. Die Antriebsregler in der Treiberbox werden über die Glasfaserverbindung synchronisiert, sodass die Regelung, die PWM-basierte Motoransteuerung sowie alle Sensorzugriffe taktsynchron zum Hexapod-Controller und damit auch zum EtherCAT Zyklus laufen.

Die Sensorsignale aller 6 Antriebsregler können synchron für die Nachbearbeitung für Condition Monitoring auf dem Hexapod-Controller mit 10kHz aufgezeichnet werden. In den Datenpaketen ermöglicht ein CRC die Überwachung der Datenkonsistenz. Die Antriebsregler sind mit einer Sicherungseinrichtung (Watchdog) ausgestattet, die z.B. bei unterbrochenem Prozessdatenverkehr nach einer voreingestellten Zeit die Motoren momentenfrei schaltet. Zur Diagnose und Fehlerlokalisierung ist eine asynchrone Kommunikation über die Netzwerkschnittstelle des Hexapod-Controllers zum Antriebsregler möglich. Das PI GCS Protokoll ist hierfür die Grundlage.

Zur Einbindung des Hexapod-Controllers an die, vom IFAM eingesetzte SPS, zur Anlagengesamtsteuerung, steht eine EtherCAT Schnittstelle zur Verfügung. Entscheidend für die Qualität der Hexapodbewegung in der Anwendung sind Deterministik und Zeitäquidistanz in der Signalverarbeitung. Die Distributed-Clocks ermöglichen eine präzise Ansteuerung synchron zu den anderen EtherCAT Prozessen.

Der EtherCAT Bus-Zyklus liegt bei 2kHz. In diesem Takt werden aus den kartesischen SOLL-Positionen die Antrieb-SOLL-Positionen bestimmt, als auch die kartesischen IST-Positionen aus den Encoderwerten der Antriebe bestimmt.

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

2.4 Positionierfähigkeit des Hexapod-Systems im Test

Nachdem sowohl der Hexapod als auch die Treiberbox und Controller montiert, programmiert und einzeln getestet wurden, wurde das Gesamtsystem in Betrieb genommen. Hierzu wurde das vom IFAM bereitgestellte Netzteil (Mean Well RSP-1500) verwendet. In diesem Schritt wurden die Funktionsfähigkeit der Endlagenschalter und der integrierten Absolutencoder sowie die korrekte Datenübertragung der integrierten Beschleunigungs- und Temperatursensoren überprüft. Diese Sensoren sind für die Zustandsüberwachung und Selbstdiagnose des Systems entscheidend. Zudem wurden die zulässigen Bewegungsbereiche des Hexapoden aufgrund der möglichen Kollisionen mit der Frässpindel („Softlimits“) festgelegt.

Des Weiteren wurde die Funktion der Sicherheitsbremsen getestet und die Wärmeentwicklung im geöffneten Zustand beobachtet und, soweit möglich, reduziert. Die PID-Regler-Parameter für die Positionsregelung wurden optimiert. Ziel war es, dass der Hexapod bei unterschiedlichen Fehlergrößen zwischen 0,05 und 1,5 mm und bei Frequenzen zwischen 4 und 40 Hz eine möglichst geringe Phasen- und Amplitudenabweichung aufweist und gleichzeitig ein stabiles Regelverhalten ohne Auf- oder Dauerschwingen zeigt.

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Ergebnisse zu der Positionierfähigkeit des Hexapod-Systems H-900K101 im ADMAS Projekt dargestellt. In Kapitel 2.4.1 werden die Vorabuntersuchungen zur Qualifikation von Komponenten innerhalb des neu entwickelten Einzelbeins des Hexapoden vorgestellt. Dabei wird die Frage beantwortet, ob die Komponenten des Einzelbeins unter aufgebrachter Ersatzlast (Federkraft), die hohen Beschleunigungswerte von 6000mm/s² erreichen können.

Kapitel 2.4.2 stellt die Vermessungsergebnisse hinsichtlich klassischer Genauigkeitscharakteristika (Minimale Schrittweite, Linearität, Wiederholgenauigkeit und Umkehrspiel) dar. Hier wird die Positionierfähigkeit des Hexapod-Systems mittels externer Messtechnik (Interferometer) umfassend qualifiziert. Dabei wird zusätzlich der Zusammenhang zwischen dem externen Messmittel und der internen Sensorik geschlossen, sodass diese für die Versuche in Kapitel 2.4.3 als Messinstrumente herangezogen werden können.

Die Untersuchungen in Kapitel 2.4.3 liefern Ergebnisse über das Verhalten des Hexapod-Systems unter einer mittels Gewichtskraft aufgebrachten Last, die vergleichbare Einzelbeinkräfte zur späteren realen Anwendung erzeugt. Die erreichbaren kartesischen Beschleunigungen werden, analog zu den Versuchen in Kapitel 2.4.1, werden dabei unter Verwendung des vollständigen Hexapod-Systems am Einzelbein qualifiziert und die Erreichbarkeit der Anforderungen aus Kapitel 2.1 damit verifiziert.

Kapitel 2.4.4 schließt die Ergebnisdarstellung schließlich mittels Orbitalfräsversuchen ab. Die Bahntreue des Industrieroboters MABI MAX 100 und des Hexapod-Systems H-900K101 wird beim Fräsen in der CFK-Testplatte verglichen.

2.4.1 Ergebnisse Einzelbein-Dynamikuntersuchungen

Die Qualifikation der Leistung (die erreichbare Geschwindigkeit und Beschleunigung) des Einzelbeins stellte einen wichtigen Schritt dar, um frühzeitig Aussagen über die Eignung des künftigen Hexapod-Systems und der Komponenten im Einzelbein für die Anforderungen des ADMAS Projekts zu erhalten. Als Prüfbewegung wurde dabei eine Sinusschwingung herangezogen, wobei die maximal erreichbare Amplitude unter gegebener Frequenz ein wichtiges Gütekriterium darstellte und Rückschlüsse auf die ausgleichbaren Fehler im ADMAS Fräs- und Versiegelungsprozess möglich machte.

Aus bisherigen Versuchen ist bekannt, dass die maximal zulässige Geschwindigkeit (begrenzt durch die maximalen Drehzahlen mechanischer Komponenten) des Einzelbeins im Bereich kleiner Frequenzen

Confidential Information
BEWEGEN | POSITIONIEREN
Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

auszugleichender Fehlersinusschwingungen den begrenzenden Faktor darstellt und erst im Bereich hoher Frequenzen die maximal zulässigen Beschleunigungen (begrenzt durch den zulässigen Strom) Begrenzung für die noch erreichbaren Amplituden der Sinusschwingung darstellen. Der Einfluss der Last auf die Einzelbein-Performance stellte das Hauptaugenmerk des Teststandes dar und wurde bisher bei PI bei der Auslegung von Hexapoden nicht in den entsprechenden Größenordnungen der Kräfte, die im ADMAS Projekt voraussichtlich auftreten, berücksichtigt. Der dazu konstruierte Prüfstand besteht aus zwei beweglichen Linearschlitten, die mit Zugfedern verbunden sind (siehe Abbildung 12). Die Federvorspannung kann durch Verfahren des oberen Schlittens verstellt werden. Zwischen dem festen unteren Teil des Teststandes und der Gelenkaufnahme des Beins wird ein Zug- und Druckkraftsensor integriert, um Kräfte, die aus der Beschleunigung von Massen und der Erdbeschleunigung zusätzlich zu den Federkräften auf das Bein wirken, zu berücksichtigen. Das Einzelbein wurde in den Versuchen mittels C410 Treibern und einem Standard Hexapod-Controller C-887 der Firma Physik Instrumente geregelt.

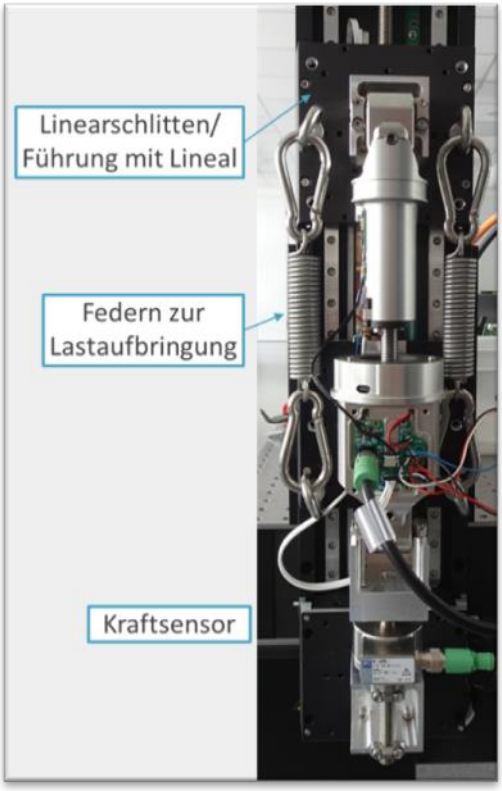


Abbildung 12: Im ADMAS umgesetzte Prüfvorrichtung zur Qualifikation eines Einzelbeins unter Last

Im Folgenden werden die Versuchsparameter, sowie die Ergebnisse, die sich aus dem Teststand für das Einzelbein ergeben haben, vorgestellt. Die Ergebnisse ermöglichen eine Einschätzung der erwartbaren dynamischen Performance des Hexapod-Systems. Die Anforderungen für die Ausgleichsbewegung sind im Besonderen in den geforderten Beschleunigungen von 6000 mm/s² in der kartesischen Z-Bewegung sowie 10000 mm/s² in einer kartesischen X-Y Bewegung anspruchsvoll und sollten im Vorfeld abgesichert werden. Die äußere Kraft zur Simulation der Last im System wurde manuell zu 0N, 300N und 500N eingestellt. Der Kraft-Verlauf wurde durch einen externen Kraftsensor aufgezeichnet. Zusätzlich wurde die Real-Position (IST-Position) durch den internen Drehgeber aufgezeichnet und aus dem Vergleich zwischen IST- und SOLL-Trajektorie der Amplitudenfehler in [dB] und der Phasenfehler in [°] bestimmt. Außerdem wurden die erreichten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen als Ableitung der Real-Position und der maximale Positionsfehler

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

aufgezeichnet (Abbildung 13). Die Amplituden und Frequenzen der untersuchten Sinustrajektorien wurden dabei in einem Bereich zwischen 0,05 mm und 1,5 mm mit 4 Hz bis 40 Hz variiert. Amplituden- und Phasenfehler wurden mittels Goertzel-Algorithmus berechnet.

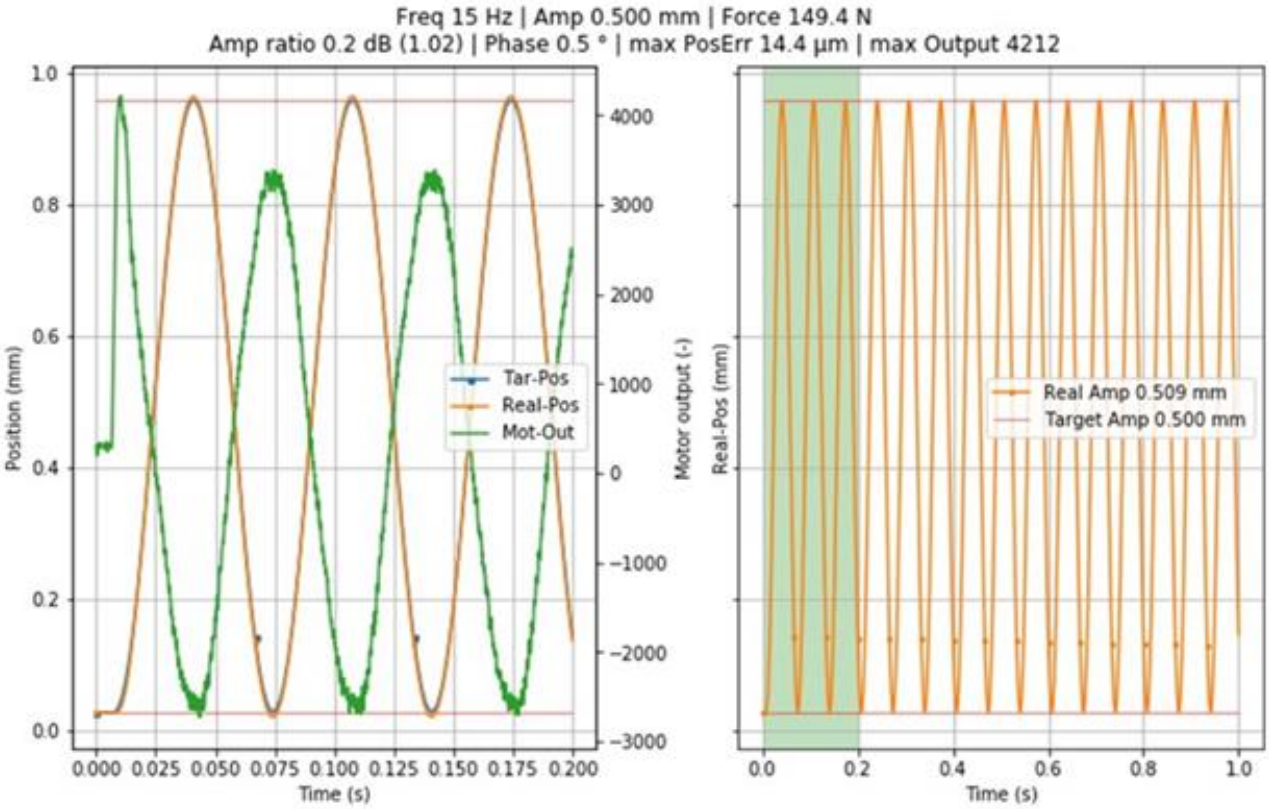


Abbildung 13: Beispielhaftes Einzelergebnis der Einzelbein-Prüfvorrichtung; links vergrößerte Darstellung des grünen Bereichs rechts

Abbildung 14 links zeigt die Übersicht über die Lastfälle der Einzelbeinuntersuchung innerhalb der Spezifikation. Dabei waren für das Einzelbein Beschleunigungen bis zu 6000 mm/s² erreichbar, diese traten jedoch primär bei kleinen Amplituden und hohen Frequenzen der Sinustrajektorie auf. Diese Einzelbeinbewegung entsprach dabei nahezu einer Bewegung entlang der Z-Achse im kartesischen Koordinatensystem der Plattform, sodass diese Anforderung erfüllt werden konnte. Für die niedrigeren Frequenzen stellte die Geschwindigkeit die begrenzende Größe der Performance des Einzelbeins dar. Der Amplituden- und Phasenfehler in den grün markierten Feldern war vernachlässigbar klein (Amplitudenfehler <1dB, Phasenfehler <5°). Der Anstieg ist jedoch abrupt und im Falle der gelb markierten Felder nur lastfrei noch akzeptierbar und für 500 N pro Einzelbein nicht mehr tolerabel. Abbildung 14 rechts zeigt den Zusammenhang zwischen der Einzelbeinbewegung des Beins, das den längsten Stellweg zurücklegen musste für eine radiale Bewegung der Plattform innerhalb der X-Y Ebene. Mit zunehmendem Abstand zum Ursprung wird das Übersetzungsverhältnis kleiner, das heißt, dass für dieselbe absolute Bewegung ein größerer Stellweg eines Beins, als in der Nähe des Ursprungs, zurückgelegt werden muss. Für den ungünstigsten Fall lag unter den geforderten Randbedingungen für den Arbeitsraum jedoch noch eine Übersetzung von i_{min} = 2,29 vor, sodass mit einer erreichbaren Beschleunigung in der X-Y Ebene von mindestens 12000 mm/s² gerechnet werden konnte und somit die Anforderung von einer Beschleunigung in der X-Y Ebene von 10000 mm/s² erreichbar war.

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

500N Frequenz in Hz / Amplitude in mm	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	20	25	30	35	40
0.05															
0.1															
0.2															
0.3															
0.4															
0.5															
0.6															
0.7															
0.8															
0.9															
1															
1.1															
1.2															
1.3															
1.4															
1.5															

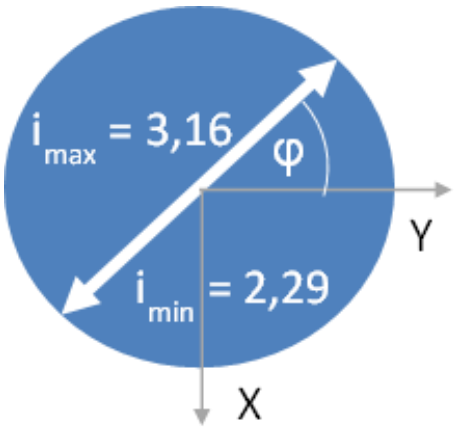


Abbildung 14: Übersicht über die Lastfälle der Einzelbeinuntersuchung innerhalb der Spezifikation (links) und Übersetzungsverhältnis zwischen Einzelbeinbewegung und X-Y-Bewegung der Plattform (rechts)

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

2.4.2 Minimale Schrittweite, Linearität, Wiederholgenauigkeit und Umkehrspiel

Durch eine präzise Vermessung mittels Interferometer wurde sichergestellt, dass der Hexapod die hohen Anforderungen an die Präzision erfüllt. Der Messaufbau ist in Abbildung 15 dargestellt. Diese Vermessung war entscheidend, um die Genauigkeit und Leistungsfähigkeit des Hexapod-Systems zu bestätigen. Die Qualifikation von Produkten von Physik Instrumente orientiert sich an der DIN ISO 230-2 (Prüfregeln für Werkzeugmaschinen Teil 2: Bestimmung der Positioniergenauigkeit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen vgl. [Phy24]).

Besonders wichtige Kennwerte für die statische Vermessung eines Hexapod-Systems sind in Tabelle 3 erklärt.

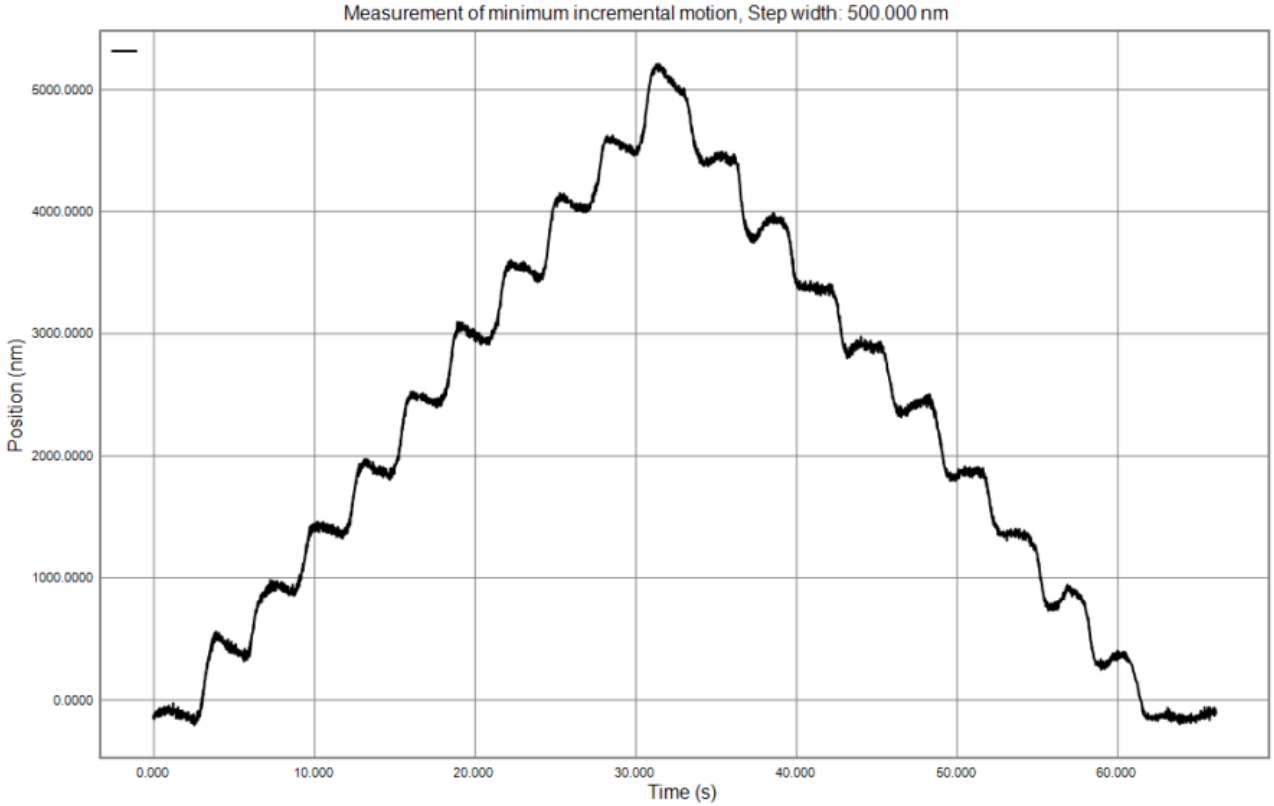
Tabelle 3: Übersicht über typische Qualitätskriterien für die Bewertung der Genauigkeit eines Positioniersystems

Kennwert	Bedeutung
MIM (Minimum Incremental Motion)	MIM bezeichnet die kleinste Bewegung, die ein System ausführen kann, die noch eindeutig und reproduzierbar detektiert werden kann. Es ist ein Maß für die feinste Abstufung der Bewegung, die das System erreichen kann.
Linearität (Linearity)	Linearität beschreibt, wie genau die tatsächliche Bewegung eines Systems einer idealen, geraden Linie folgt, wenn es sich entlang einer Achse bewegt.
Wiederholgenauigkeit (Repeatability)	Wiederholgenauigkeit ist die Fähigkeit eines Systems, dieselbe Position bei wiederholten Bewegungen unter denselben Bedingungen genau zu erreichen. Dabei wird unterschieden, ob das System immer von der gleichen Richtung (unidirektional) oder von zwei entgegengesetzten Richtungen (bidirektional) die Zielposition anfährt.
Umkehrspiel (Backlash)	Umkehrspiel bezeichnet die Bewegungsabweichung, die auftritt, wenn die Bewegungsrichtung eines Systems umgekehrt wird.

Die Vermessung wurde mit einem Interferometer ZMI2000 der Firma Zygo durchgeführt. Die Vermessung mit dem Interferometer erfolgte in einem statischen Zustand. Das bedeutet, dass der Hexapod zu vordefinierten Positionen gefahren und dort in Regelung vermessen wurde, anstatt während der Verfahr-Bewegung vermessen zu werden. Dabei hatte das Hexapod-System, je nach Messskript, mehrere Sekunden Zeit, um die Zielposition zu erreichen. Diese Zeiten sind in Messprotokollen dokumentiert und wurden dem Prototypen beigefügt. Die dynamischen Fähigkeiten des Systems, also seine Präzision während der Bewegung, wird in Kapitel 2.4.4 ausführlich behandelt. In Abbildung 16 sind die Vermessungsergebnisse des Hexapod-Systems für die Schrittweite 500nm in der kartesischen Z-Achse für einen Bereich von 0 bis 5µm dargestellt. Dabei zeigt sich, dass das System erst nach einer kurzen Einschwingzeit mit kleiner Standardabweichung seine Position erreichte.

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

Abbildung 15: Der Hexapod in der Vermessung auf einem luftgedämpften Tisch. Abgebildet ist auch das Interferometer.



Step size: 500.000 nm - OK			
Mean step size	519.018 nm	Standard deviation of step size	41.942 nm
Step size deviation	3.804 %	Maximum jitter	66.962 nm

Abbildung 16: Vermessungsergebnisse der minimalen Schrittweite (MIM) des H-900K101, hier dargestellt 500nm Schritte von 0 bis 5µm

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

Die wichtigsten Anforderungen an die Präzision sowie die Ergebnisse der Vermessung („Value achieved“) sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4: Übersicht über Präzisionsanforderungen

Specification	Value confirmed	Unit	Comment	Value achieved
MIM Linear X	1	µm	MIM=Minimum Incremental Motion	0,5
MIM Linear Y	1	µm		0,5
MIM Linear Z	1	µm		0,5
Backlash Linear X	15	µm	Backlash = Umkehrspiel, gemittelter Wert (mean, B_m im Test Report)	2,4245
Backlash Linear Y	15	µm		1,9702
Backlash Linear Z	5	µm		0,2016

Zusätzlich zu dieser Präzisionsvermessung wurde, wie es für die CE-Kennzeichnung erforderlich ist, eine Überprüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) durch Fachpersonal durchgeführt. Diese EMV-Prüfung gewährleistet, dass der Hexapod, die zugehörigen Kabel und die zugehörige Elektronik keine elektromagnetischen Störungen verursacht und selbst unempfindlich gegenüber solchen Störungen ist. Dies ist für den sicheren und zuverlässigen Betrieb in verschiedenen Umgebungen unerlässlich.

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

2.4.3 Ergebnisse Dynamikuntersuchungen mit dem Hexapod-System

Die im ADMAS-Projekt umgesetzte Controller- und Treiberarchitektur erlaubt es, neben der Positionsregelung auch eine Geschwindigkeitsregelung zu implementieren, um die dynamische Positionierungsfähigkeit des Systems weiter zu verbessern. Die Einstellung und Überprüfung dieser Regler-Parameter hängen jedoch von der Orientierung des Hexapoden und der angelegten Last ab. Daher waren mehrere Iterationen unter verschiedenen Belastungsszenarien notwendig, um ausgewogene Parameter zu finden. Da die Prozesskräfte, die bei der Bearbeitung von Bauteilen mit der Frässpindel entstehen, nur mit erheblichem Aufwand nachgestellt werden können, wurde in 10 kg Schritten eine Ersatzmasse von maximal 40 kg auf der Deckplatte des Hexapoden montiert. Diese Masse führte unter den gegebenen Bearbeitungsbedingungen (90° Orientierung und Beschleunigungen in X-Y-Richtung ≤ 12000 mm/s²) zu sehr ähnlichen Kräften in den am stärksten belasteten Einzelbeinen, wie im realen Anwendungsfall. Analog zu den Dynamikuntersuchungen am prototypischen Einzelbein wurden diese Untersuchungen auch für das Hexapod-System durchgeführt.

In Abbildung 17 ist der Hexapod in einer 90°-Orientierung auf einer Schwenkvorrichtung zu sehen. Die Untersuchungen wurden sowohl in der 0°-Orientierung (Z-Achse zeigt entgegen der Gravitationsrichtung) als auch um 90° gedreht durchgeführt.

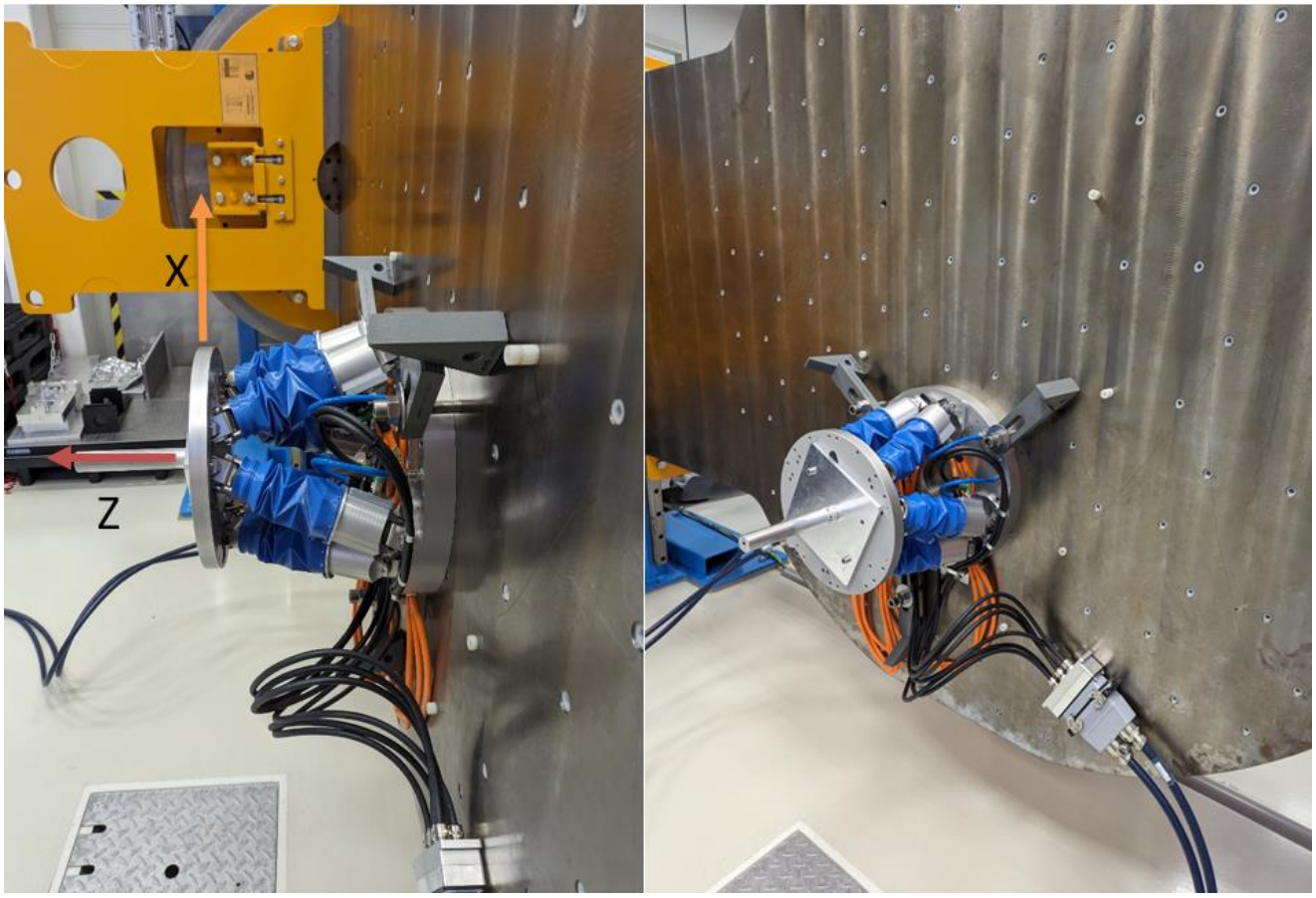


Abbildung 17: Hexapod während der Dynamikuntersuchung um 90° gedreht

In der unteren Grafik in Abbildung 18 wird eine strom- oder geschwindigkeitsabhängige Beschränkung für Kombinationen aus Amplituden und Frequenzen der SOLL-Sinus-Testtrajektorien deutlich, ähnlich wie bei der Einzelbeinuntersuchung. Die orange Kurve in der Abbildung zeigt dies. Eine stromabhängige Abschaltung wirkte

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

hier als begrenzendes Sicherheitsfeature der Treiberelektronik, um Schäden durch große Stromspitzen zu verhindern. Ein zweiter Sicherheitsmechanismus, der bei zu hohem Dauerstrom abschaltet, war wegen der kurzen Dauer der Einzeltests nicht relevant.

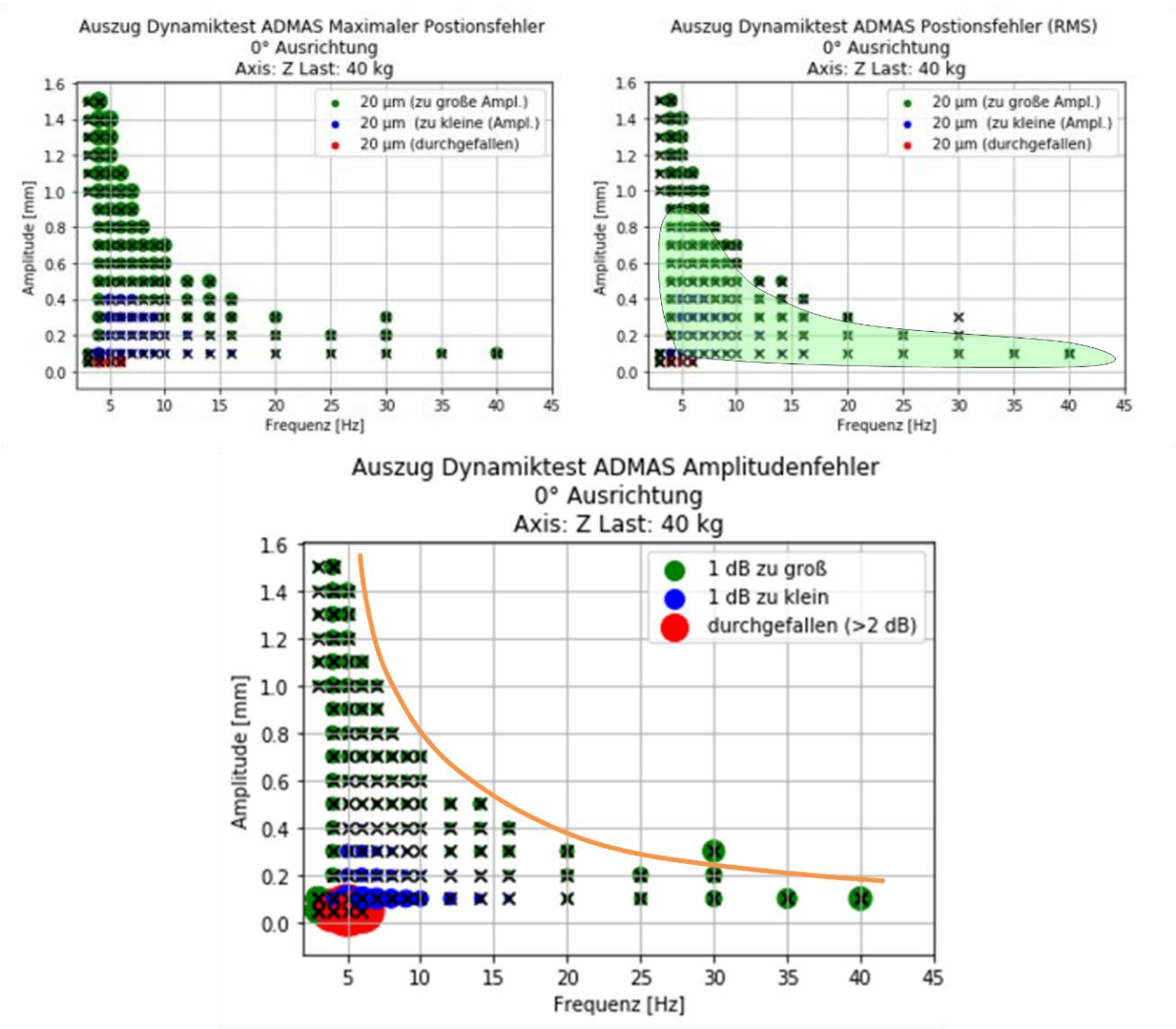


Abbildung 18: Beispielhafter Übersichts-Ergebnisplot für die Dynamikuntersuchung des Hexapoden; Amplitudenfehler in dB bei unterschiedlichen Frequenzen- und Amplituden von SOLL-Sinusschwingungen. Die Größe der Kreise repräsentiert die Größe des Amplitudenfehlers; die orangene Kurve repräsentiert eine Geschwindigkeit- und Stromabhängige Grenze zum Schutz der Mechanik/ Elektronik

Der Ergebnisplot in Abbildung 20 zeigt, dass die Regler nicht aggressiv genug eingestellt waren, um bei sehr kleinen Frequenzen und Amplituden mit Amplitudenfehlern von weniger als 1dB zu reagieren. Der Amplitudenfehler wird allgemein in dB als Verhältnis zwischen der absoluten Abweichung und dem Amplitudensollwert berechnet, wofür der Goertzel-Algorithmus verwendet wird. Um die Ergebnisse besser zu bewerten, sollte auch der maximale Positionsfehler bzw. das quadratische Mittel dieser Fehler (RMS-Fehler) betrachtet werden, da dies sowohl Phasen- als auch Amplitudenfehler umfasst. Diese sind in Abbildung 18 in den oberen beiden Grafiken zu sehen. Diese Betrachtungsweise ist sinnvoll, da sie den Echtzeit-Positionsfehler hinsichtlich der Ausgleichsbewegung anschaulich darstellt. Aus der Betrachtung der RMS-Positionsfehler wird ersichtlich, dass im gesamten grün schattierten Bereich ein maximaler RMS-Positionsfehler von weniger als 20

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

µm vorliegt. Das bedeutet, dass selbst unter Last Fehler dynamisch mit hoher Genauigkeit ausgeglichen werden können.

Aus den Untersuchungen zur dynamischen Positionierfähigkeit des Systems hat sich gezeigt, dass die PID-Parameter des an das IFAM ausgelieferten Hexapod-Systems, insbesondere bei kleinen Amplituden und Frequenzen der auszugleichenden Fehler, noch weiter optimiert werden können. In Abbildung 20 sind die Verbesserungen für auszugleichende Fehler mit einer Amplitude von 0.1 mm und unterschiedlichen Frequenzen dargestellt. Dabei wird deutlich, dass durch die Erhöhung des P-Terms des Positionsreglers die Amplitudenfehler im Bereich zwischen 5 und 10 Hz verringert werden könnten. Allerdings zeigte sich bei höheren Frequenzen (40 Hz), dass eine weitere Erhöhung des P-Terms zu instabilem Verhalten des Systems führen kann, was sich durch ein Aufschwingen äußert.

In Absprache mit dem IFAM wurde daher beschlossen, auf eine weitere Optimierung der PID-Parameter, zugunsten maximaler Performance, zu verzichten. Dieser Entschluss beruhte auf der Unsicherheit hinsichtlich der realen Prozessfehler sowie der Gefahr, dass Änderungen kurz vor Projektabschluss zu unerwarteten Auswirkungen im Gesamtregelverhalten der ADMAS LuFo Anlage führen könnten, da dann die Regelreserve entsprechend gering gewesen wäre.

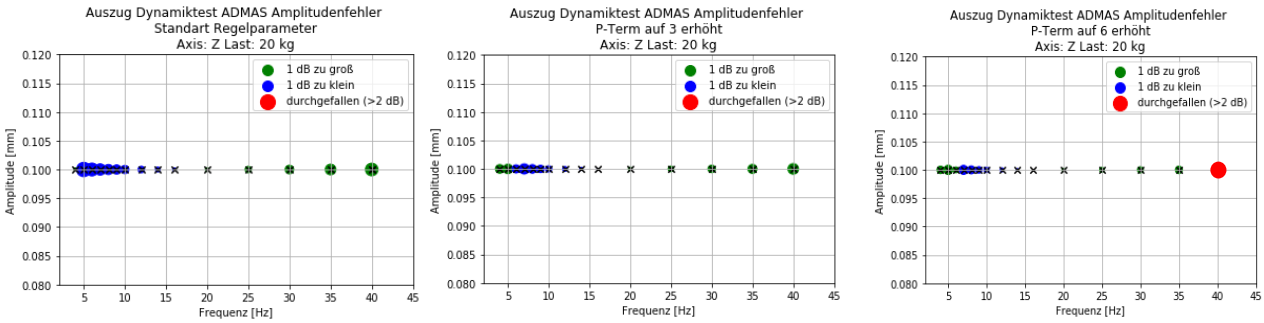


Abbildung 19: Verringerung des Amplitudenfehlers für Soll-Sinustrajektorien mit Amplitude 0,1mm und unterschiedlichen Frequenzen durch Optimierung der PID-Reglerparameter

Für die in diesem Abschnitt durchgeführten Versuche wurde das Hexapod-System nicht mittels übergeordneter SPS per EtherCAT angesteuert, sondern direkt über die integrierte TCP/IP Schnittstelle des Hexapodcontrollers. Deshalb wurde zusätzlich untersucht, inwieweit die Verwendung der EtherCAT-Schnittstelle zu Zeitverzögerungen in der Regelung der ADMAS-Gesamtanlage führt.

Gegenüber einem serienmäßigen C-887 Hexapod Controller von Physik Instrumente sind die Zeitverzögerungen konstant und kurz. In Abbildung 20 ist eine kartesische Z-Bewegung der Plattform des Hexapoden zwischen 0 und 1mm dargestellt. Der Aufnahmeort der Daten war die per EtherCAT verbundene SPS, sodass die SOLL-Werte ohne Verzug erfasst wurden, die IST-Werte jedoch aufgrund Datenanfrage, Datenabruf und Verarbeitungszeit verzögert erfasst wurden. Die neongrüne Kurve stellt die SOLL-Position dar, die olivgrüne Kurve die IST-Position. In Abbildung 21 ist eine Detailaufnahme dieser beiden Kurven vergrößert dargestellt. Der Fokuspunkt der Detailaufnahme ist beabsichtigt bei 0.5mm, also mittig zwischen Startposition 0 und Endposition 1mm gewählt. An dieser Stelle ist die maximale Geschwindigkeit für die Bewegung erreicht und es ist nicht mit hohen Beschleunigungswerten zu rechnen, sodass die vorhandene Diskrepanz zwischen SOLL- und IST-Position auf die Totzeit der EtherCAT Schnittstelle zurückgeführt werden kann. Hierbei zeigt sich, dass die Totzeit, die sich aus der Verwendung der neu entwickelten EtherCAT Schnittstelle ergibt, erheblich reduziert werden konnte, verglichen mit einem serienmäßigen Hexapodcontroller (14-18ms). Sie beträgt 1,5ms, also 3 Taktzyklen. Dies ist entscheidend für den Ausgleich von sinusförmigen Fehlern geringer Amplitude und hoher Frequenz, bei der

hohe Beschleunigungswerte (z.B. 6000mm/s²) nötig sind, um der geforderten Trajektorie zu folgen. Bei einer Verzögerung von 15ms ist eine Positionsabweichung von $s = \frac{1}{2} a \times t^2 = 675 \mu m$ bei Annahme einer ruckartigen Beschleunigung zu erwarten. Bei einer Reduktion der Totzeit auf 1,5ms liegt die unter gleichen Bedingungen induzierte Abweichung bei 6,75µm.

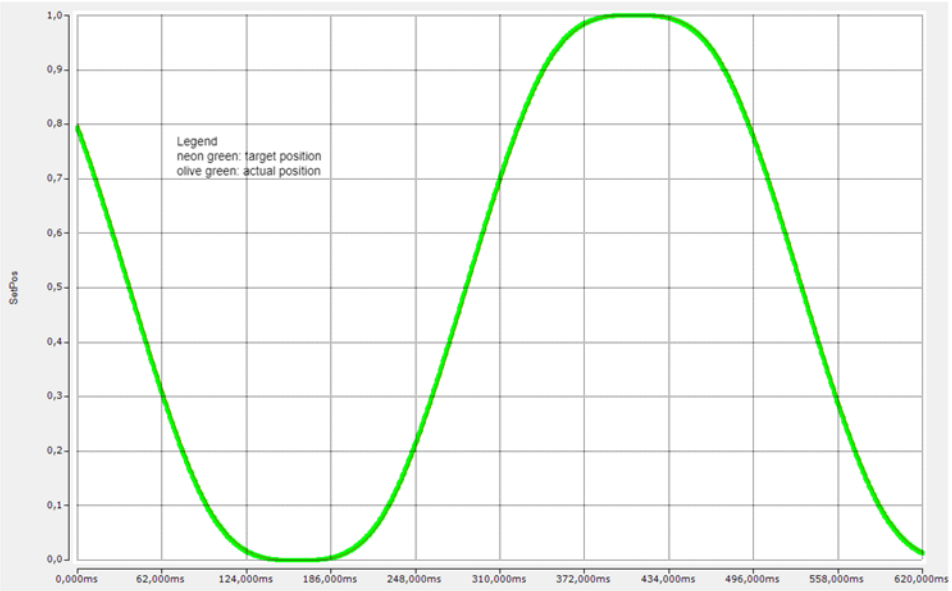


Abbildung 20: Bewegungsprofil (SOLL- und IST-position) des ADMAS Hexapoden in Z-Richtung zwischen 0 und 1mm

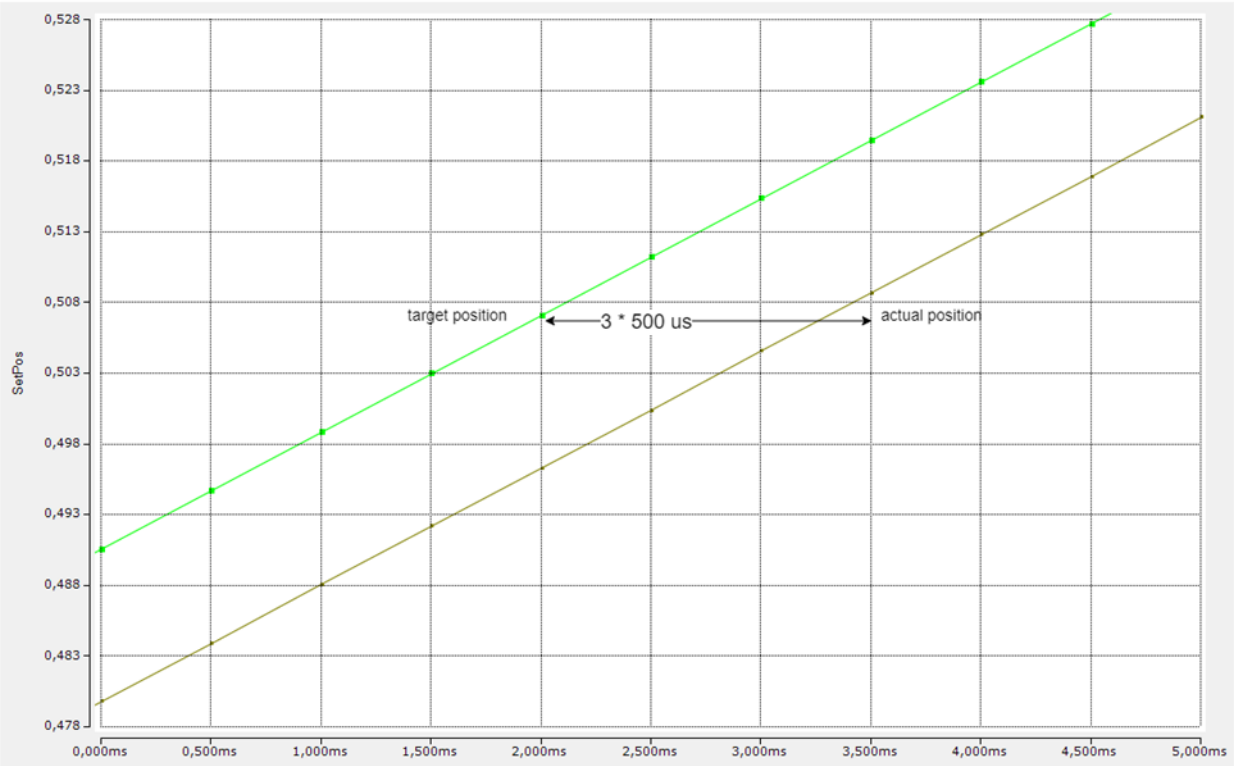


Abbildung 21: Detailaufnahme des Bewegungsprofils (SOLL- und IST-Position) aus Abbildung 20 an der Stelle 0,5mm

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

2.4.4 Erreichbare Genauigkeiten im Anwendungsfall Fräsen

Die Genauigkeit des Hexapoden unter realen Anwendungsbedingungen im Anwendungsfall Fräsen wurde beim Fraunhofer IFAM in Stade unter Zusammenarbeit mit dem Werkzeughersteller Gühring KG untersucht. Die dabei verwendete CFK-Testplatte ist in Abbildung 22 zu sehen und wurde mittels RTM-Verfahren (engl. „Resin Transfer Moulding“) von BCT für das ADMAS-Projekt hergestellt und wies eine Dicke von 5,3mm auf. Die blau und gelb markierten Bereiche auf der Testplatte wurden per Orbitalfräsen durch den Industrieroboter (MABI MAX 100)

Abbildung 22: Fräsversuche an der Testplatte (gefertigt mittels RTM-Verfahren), Orbitalfräsen nur Industrieroboter (blau), Orbitalfräsen nur Hexapod-System (gelb)

bei in den Bremsen gehaltenem, unbewegtem Hexapod (blau-markiert) und durch das Hexapod-System (H-900K101) bei in den in Bremsen gehaltenem, unbewegtem Industrieroboter (gelb-markiert) durchgeführt. Das Hexapod-System wurde dabei über die EtherCAT-Schnittstelle angesteuert. Der Nenndurchmesser der Bohrungen betrug 18mm. Die Versuche 55 bis 63 wurden mit dem Werkzeug „WZA4, Multitool 8 Schneiden“ mit einem Werkzeugdurchmesser von 12mm durchgeführt. Die Versuche 64 bis 66 wurden mit dem Werkzeug „WZA5, Multitool Raspel fein“ mit einem Werkzeugdurchmesser von 12mm durchgeführt. Für alle Versuche wurden Frässpindeldrehzahl, Fräsvorschub sowie Vorschub in Tiefenzustellung konstant gehalten. In Tabelle 5 werden die Ergebnisse aus den Versuchen gegenübergestellt. Die Vermessung der Orbital-Fräsungen wurde mittels ZEISS ScanMax-IPX Tast-Koordinatenmessgerät durch die Firma Gühring KG durchgeführt. Der Pferchkreis entspricht dabei einem Kreis mit maximalem Durchmesser, sodass alle Messpunkte außerhalb des Kreises liegen, wie in Abbildung 22 dargestellt. Die Rundheit nach Anwendung des Gaußfilters nach DIN EN ISO 12181-1 auf die Roh-Messdaten wird in der Tabelle 5 als „Rundheit“ angegeben, die Abweichung entspricht der halben Rundheit, da diese sich gleichverteilt um den mittleren Durchmesser herum ergibt. Während Versuch V63 brach der Fräser „WZA4, Multitool 8 Schneiden“, sodass hier keine Vermessungsdaten ermittelt werden konnten und anschließende Versuche mit einem anderen Werkzeug „WZA5, Multitool Raspel fein“ fortgeführt wurden.

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

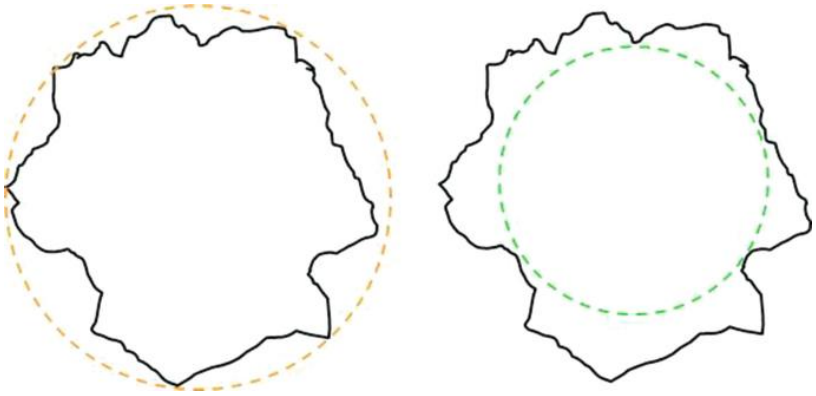


Abbildung 23: Hüllkreis (gelb) und Pferchkreis (grün) eines Profils (schwarz) [Hen17]

Tabelle 5: Vermessungsergebnisse Orbitalfräsen mit MABI MAX 100 (blau) und Hexapod H-900K101 (gelb)

Versuchs-nummer	Nenn-durchmesser [mm]	Pferchkreis-durchmesser [mm]	Rundheit [µm]	Abweichung ± [µm]	Verwendetes Werkzeug
V55	18	18,134	169	85	WZA4, Multitool 8 Schneiden
V56	18	18,046	137	69	WZA4, Multitool 8 Schneiden
V57	18	18,131	157	79	WZA4, Multitool 8 Schneiden
V58	18	18,028	107	54	WZA4, Multitool 8 Schneiden
V59	18	18,105	152	76	WZA4, Multitool 8 Schneiden
V60	18	18,040	126	63	WZA4, Multitool 8 Schneiden
V61	18	18,029	175	88	WZA4, Multitool 8 Schneiden
V62	18	18,110	26	13	WZA4, Multitool 8 Schneiden
V63	18	-	-	-	WZA4, Multitool 8 Schneiden
V64	18	18,009	30	15	WZA5, Multitool Raspel fein
V65	18	17,989	40	20	WZA5, Multitool Raspel fein
V66	18	18,103	30	15	WZA5, Multitool Raspel fein

Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei der Fräsbearbeitung mittels Hexapod H-900K101 eine signifikante Verbesserung der Bahntreue verglichen mit dem MABI MAX 100 ergibt, die sich in einer ca. fünffach geringeren Rundheitsabweichung widerspiegelt:

$$Mittelwert\ Rundheit_{V62-V66} \div Mittelwert_{V55-V61} = 0{,}2155$$

Aufgrund der geringen Stichprobengröße ist hier eine statistische Auswertung nicht zielführend, dennoch zeigen die Ergebnisse eine klare Verbesserung der Bearbeitungsqualität bei der Verwendung des Hexapod-Systems für

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

die Orbital-Fräsbearbeitung. Das Hexapod-System ist in der Lage mit hoher Bahntreue (Abweichungen ±13µm bis ±20µm) im realen Bearbeitungsfall zu positionieren. Bezogen auf die im Kapitel 1.4 aufzeigten Referenz-Systeme werden vergleichbar gute bis bessere Bearbeitungsergebnisse mit dem Hexapod-System H-900K101 in der Bearbeitung von CFK-Bauteilen erreicht.

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

2.5 Condition Monitoring

2.5.1 Allgemeine Beschreibung

Um die beiden SMART-Ziele (1) „Verbesserung der Wartbarkeit unter Berücksichtigung zu ermittelnder Wartungsintervalle“ und (2) „Integration von Diagnosemöglichkeiten zur Erkennung des Systemzustandes“ aus Kapitel 1.1 zu erreichen, wurde jedes Einzelbein des Hexapod-Positioniersystems umfassend mit Sensorik ausgestattet. Neben den Motorstellgrößen sowie den IST- und SOLL-Positionen wurden in jedem Bein Temperatur- und 1D-Beschleunigungssensoren integriert.

Diese Sensoren spielten eine zentrale Rolle im Rahmen des ADMAS-Projekts, um die Forschung von PI im Bereich Condition Monitoring (Zustandsüberwachung) voranzutreiben. Das übergeordnete Ziel war es, den Zustand jedes Einzelbeins kontinuierlich zu überwachen und frühzeitig Anomalien im Verhalten zu erkennen. Durch diese proaktive Überwachung sollten ungeplante Ausfälle vermieden werden, die in einem industriellen Umfeld zu langen Stillstandzeiten und folglich zu sehr hohen Kosten führen könnten.

Besonders hervorzuheben ist der Beschleunigungssensor. Er ermöglicht es, Veränderungen im Frequenzspektrum einzelner Komponenten des Einzelbeins zu erkennen. Diese detaillierte Analyse des Frequenzverhaltens erlaubt es, Anomalien präzise zu identifizieren und sie spezifischen Komponenten zuzuordnen. Wichtige Bauteile, die dabei überwacht werden, sind die Lagerung des Schraubgetriebes und der Motor des Einzelbeinantriebs.

Durch die Integration dieser Sensorik und die kontinuierliche Überwachung der relevanten Parameter kann der Zustand des Hexapoden allgemein genau analysiert werden. Dies ermöglicht es, Wartungsintervalle optimal zu bestimmen und so die Wartbarkeit des Systems erheblich zu verbessern. Ungeplante Ausfälle können dadurch auf ein Minimum reduziert werden, was die Betriebseffizienz erhöht und die Betriebskosten senkt.

2.5.2 Voruntersuchung an einem Einzelbeinprüfstand

In einem ersten Schritt wurde der Beschleunigungssensor mit einem Referenzsensor abgeglichen, um sicherzustellen, dass die Messungen präzise und zuverlässig sind. Es wurde auch der Einfluss der Anbringung des Sensors untersucht, wobei sowohl die Verschraubung als auch die Befestigung mit Wachs getestet wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Sensoren und Anbringungsmethoden vergleichbare Ergebnisse liefern. Die einzige signifikante Abweichung besteht in der Amplitude der Peaks, nicht jedoch im Frequenzbereich, in dem diese Peaks gemessen wurden.

Zusätzlich wurden Vergleichsmessungen zwischen Bewegungen ohne Last und solchen mit Last durchgeführt. Diese Messungen zeigen, dass die zusätzliche Masse zu einer Dämpfung der Amplituden ab einer Frequenz von etwa 120 Hz führt.

Die Beschleunigungssensordaten wurden sowohl im Einzelbeinprüfstand als auch im Einbau des Einzelbeins in einen Ersatzhexapoden gemessen. Es stellte sich heraus, dass im Einzelbeinprüfstand zusätzliche Peaks im Frequenzspektrum auftraten, die im eingebauten Zustand im Ersatzhexapoden nicht vorhanden waren. Dies deutete darauf hin, dass die Messungen in der Linearführung nur eingeschränkt aussagekräftig für den tatsächlichen Betrieb innerhalb des Hexapoden sind.

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

Ein weiterer Untersuchungsaspekt war die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Frequenzspektrums. Ziel war es, die geschwindigkeitsunabhängigen Frequenzanteile von den geschwindigkeitsabhängigen Anteilen zu unterscheiden. In Abbildung 24 ist das gemessene Frequenzspektrum des Einzelbeins im konstanten Geschwindigkeitsbereich eines Schritts mit 30 mm/s dargestellt. Dabei wurden die Anfahr- und Abbremsbereiche nicht in die Frequenzmessung einbezogen. Das Spektrum zeigte Peaks bei Frequenzen von 0 Hz, 20 Hz, 40 Hz, 90 Hz, 120 Hz, 240 Hz, 260 Hz, 300 Hz und im Bereich zwischen 350 Hz und 390 Hz.

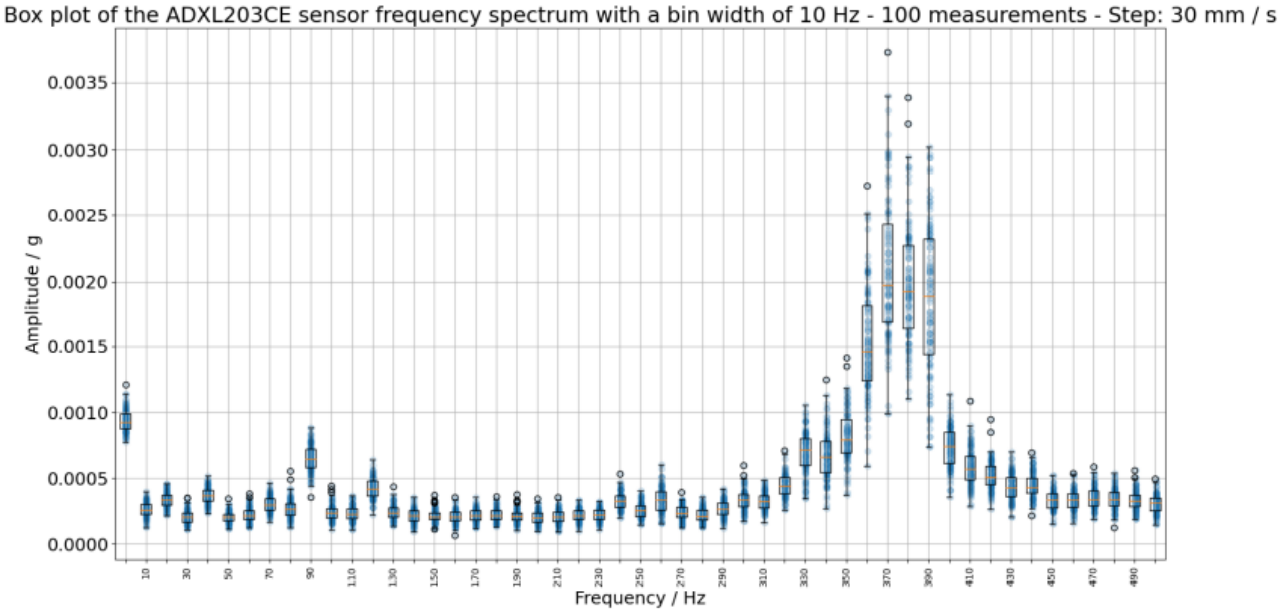


Abbildung 24: Frequenzspektrum über 100 Messungen mit einer Frequenzbandbreite von 10Hz

Für die DC-Komponente (Offset-Fehler in der FFT – 0-Frequenz) wurde die Verdrehung des Beins im Versuchsaufbau des Ersatzhexapoden als mögliche Ursache vermutet. Diese Verdrehung resultierte aus den langsamen Änderungen der Ausrichtung des Einzelbeins zur Gewichtskraft während der Bewegung im Hexapod. Die Frequenz um 40 Hz stimmte mit der theoretischen Eigenfrequenz des Schraubgetriebe überein. Für die Frequenzen um 90 Hz könnten die Kugeln verantwortlich gewesen sein, die am äußeren Wälzlagerring der Lagerung rollen. Die 120-Hz-Frequenz könnte durch das Umrollen der Kugeln am inneren Wälzlagerring verursacht worden sein. Die Frequenz bei 240 Hz könnte eine Oberschwingung der umrollenden Kugeln darstellen. Für den großen Peak im Bereich von 350-390 Hz konnte kein Zusammenhang zu einer Komponente im Antriebsstrang des Einzelbeins ermittelt werden.

2.5.3 Erstellen einer Testroutine für den Kundeneinsatz

Zur Erfassung der notwendigen Daten wurde ein Aufnahmeskript in der Programmiersprache Python entwickelt. Dieses Skript wird manuell gestartet und führt danach vollautomatisierte Testroutinen durch.

Nachdem der Controller mit einem PC verbunden wurde, initiiert der PC die Ausführung des bereitgestellten Skripts. Während dieser Phase erfolgt die Konfiguration des Controllers und die Regelung des Hexapod-Systems. Anschließend werden die vordefinierten Trajektorien abgefahren, wobei die erfassten Daten mittels einer TCP/IP-Verbindung übertragen werden.

Im Rahmen dieses Projekts entschied das Fraunhofer IFAM, die Daten in seiner eigenen Cloud zu speichern, auf die Mitarbeiter von PI Zugriff erhielten. PI hatte jedoch ebenfalls eine eigene Cloud-Lösung vorbereitet, die es

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

ermöglichte, die Daten automatisiert in der Cloud abzulegen. Diese doppelte Vorbereitung gewährleistete eine flexible und zuverlässige Datenspeicherung, die sowohl den Kundenanforderungen entsprach als auch eine sichere und strukturierte Datenverwaltung durch PI ermöglichte.

Zusammengefasst wurde ein hochautomatisiertes und sicheres System zur Datenerfassung und -übertragung implementiert, dass die Grundlage für effektives Condition Monitoring und optimierte Wartungsprozesse bildete.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden nicht nur die Sensordaten des Beschleunigungssensors, sondern auch der Stromfluss des Motors sowie die SOLL- und IST- Positionen des Hexapod-Systems erfasst. Abbildung 24 illustriert exemplarisch die Trajektorie eines "Rangetests" mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/s. Ein solcher Test beinhaltete die synchronisierte Bewegung aller Einzelbeine des Hexapoden von der untersten zur obersten Position. Die Geschwindigkeit von 10 mm/s bezieht sich auf die Bewegung entlang der Z-Achse des Hexapoden. Für die Bewegung von der Position Z = -20mm auf Z = +20mm wurden daher knapp über 4 Sekunden benötigt. Diese Tests wurden in verschiedenen Geschwindigkeitsstufen durchgeführt, um mögliche Unregelmäßigkeiten und Geschwindigkeitsabhängigkeiten aufzudecken. Viele relevante Frequenzen sind Vielfache von der Drehzahl und somit auch von der Geschwindigkeit. Durch das Variieren der Geschwindigkeit konnten diese Zusammenhänge klar bestimmt werden.

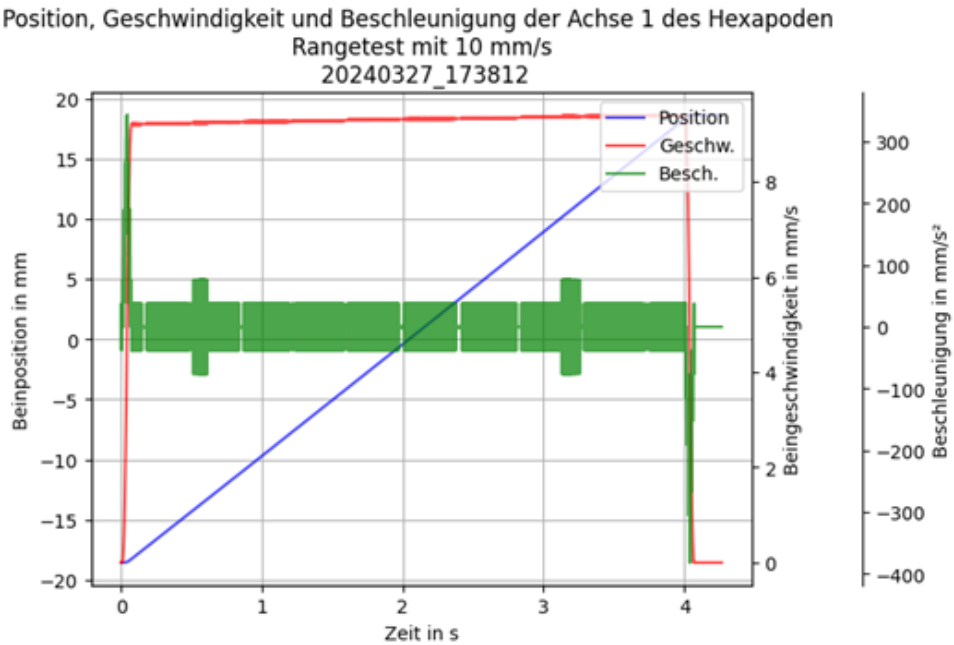


Abbildung 25: Aufgenommene Position und die daraus berechnete Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Rangetest mit 10 mm/s

Das System ist stromgeregelt und sinus-kommutiert, weshalb der Stromverlauf ebenfalls erfasst und protokolliert wurde. Abbildung 26 visualisiert den gemessenen Strom während des Rangetests. Es wurde festgestellt, dass einige Einzelbeine positiven und andere negativen Strom aufweisen. Diese Unterschiede weisen darauf hin, dass Achsen 2 und 5 Zugkräften ausgesetzt waren, während die übrigen Achsen Druckkräften unterlagen. Diese Beobachtung ist auf eine um 90° gedrehte Ausrichtung des Gesamtsystems im Raum zurückzuführen. Dies wird auch durch die Analyse der Beschleunigungsdaten deutlich, wie in Abbildung 27 rechts dargestellt. Die Sensoren messen die Beschleunigung entlang der Beinachsen und erfassen auch die durch die Erdanziehung verursachte Erdbeschleunigung. Zwei Achsen zeigen keine Gravitation, während die anderen vier Achsen je eine positive oder negative Beschleunigung anzeigen. Somit lässt sich die exakte Position des

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

Hexapoden im Raum ableiten, was mit den gemessenen Motorströmen übereinstimmt.

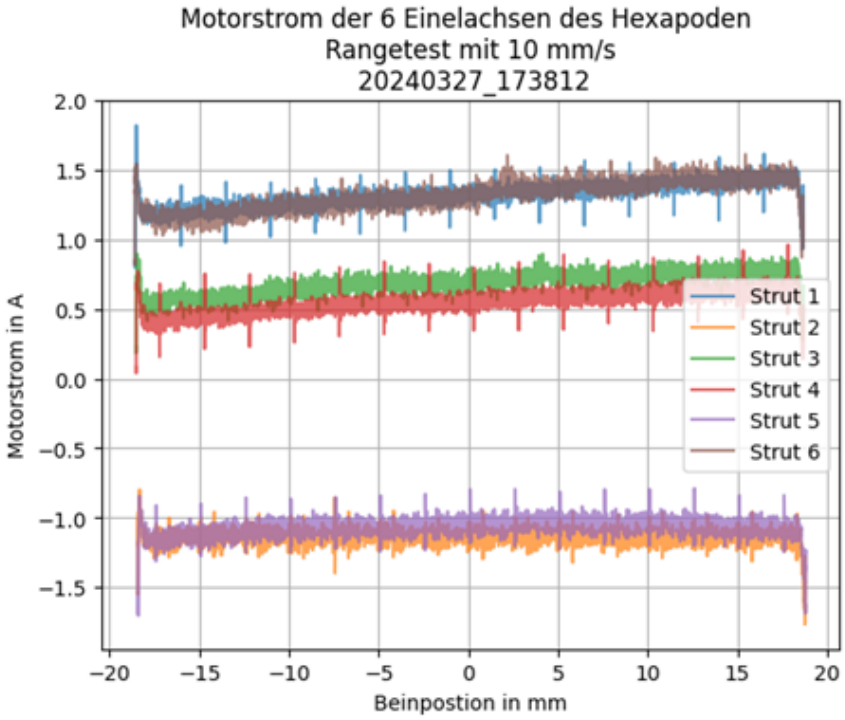


Abbildung 26: Aufgenommener Motorstrom des Rangetest mit 10 mm/s

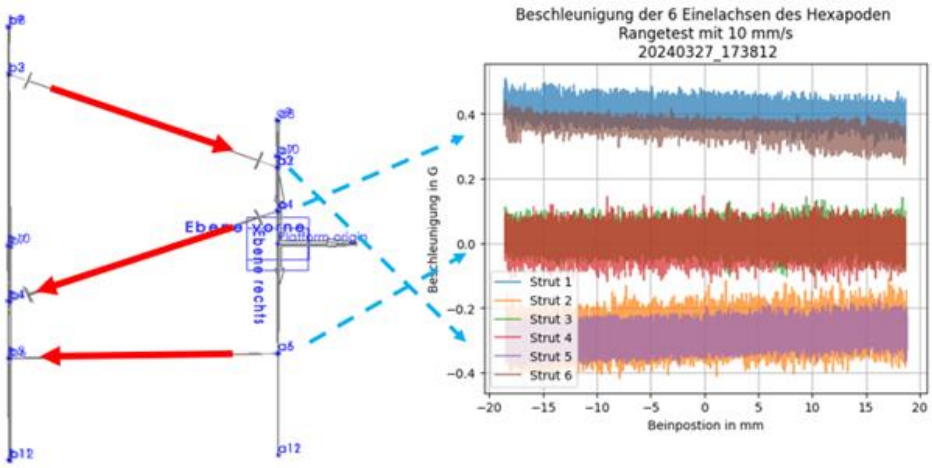


Abbildung 27: Links: Kinematik-Modell eines Hexapoden, welches um 90° gedreht wurde. Die roten Pfeile deuten die Richtung der statischen Kraft an, welche auf die Achsen wirken. Rechts: Beschleunigungs-Rohdaten des Rangetest mit 10 mm/s

Im weiteren Einsatz des Hexapoden wurden die Daten der Motorströme und der Beschleunigungen sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich analysiert.

Plötzlich auftretende Fehler manifestieren sich häufig als Anomalien. Durch das umfassende Verständnis des Systems kann qualifiziertes Personal die Ursache dieser Anomalien eingrenzen. Zusätzlich können Methoden wie ein Autoencoder eingesetzt werden, um Anomalien zu detektieren.

Ein Autoencoder ermöglicht das automatisierte Prüfen von Datenreihen. Dabei komprimiert er Daten und

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

dekomprimiert diese. Während dieses Prozesses lernt das Modell, die wesentlichen Merkmale der Daten zu erfassen. Wenn jedoch eine Anomalie vorliegt, weicht die rekonstruktionsbedingte Ausgabe deutlich vom Original ab, da die Anomalie nicht den gelernten Mustern entspricht. Dies macht den Autoencoder zu einem wertvollen Werkzeug für die Erkennung von Abweichungen, die auf potenzielle Fehler hinweisen.

Darüber hinaus werden Trends betrachtet, die durch Verschleißerscheinungen hervorgerufen werden. Allerdings erfordert die Beobachtung von Verschleißerscheinungen, dass der Hexapod entsprechend beansprucht wird. Daher bleibt dies eine Aufgabe, deren Lösung erst durch zukünftige Datenerhebungen möglich sein wird.

2.6 Schlussfolgerung

Das im Projekt ADMAS LuFo V-1 umgesetzte Hexapod-System H-900K101 ist in der Lage sinusförmige Positionsabweichungen mit Amplituden/ Frequenzen von bis zu 1,5mm/ 4Hz und 0,1mm/ 40Hz unter Einwirkung einer zur realen Anwendung äquivalenten Last auszugleichen. Die dabei vorliegenden Amplitudenfehler (<2dB) und Phasenfehler (<5°) sind äußerst gering. Ausgedrückt im Positionsfehler (RMS) entspricht dies Abweichungen kleiner als ±20µm. Diese Ergebnisse konnten auch mittels Fräsergebnissen des Hexapod-Systems im realen Anwendungsfall reproduziert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei der Fräsbearbeitung mittels Hexapod H-900K101 eine signifikante Verbesserung der Bahntreue verglichen mit dem MABI MAX 100 ergibt, die sich in einer ca. fünffach geringeren Rundheitsabweichung der Orbitalbohrungen in der RTM-Testplatte widerspiegelt. Die PID-Regelparameter des Hexapod-Systems können für den Ausgleich von Schwingungen mit kleinen Amplituden- und Frequenzen zukünftig optimiert werden. Die Grenzen bezüglich einer möglichen Dauerschwingung wurden ermittelt. Das Hexapod-System erfüllt damit die Anforderungen hinsichtlich der geforderten Beschleunigungen bei gleichzeitiger, hoher Positioniergüte in den kartesischen Bewegungsrichtungen (X/Y=10000mm/s² und Z=6000mm/s²), sodass das Kernziel aus HAP2 im Projekt ADMAS LuFo V-1 erreicht wird. Entscheidend für das Erreichen dieses Ziels ist die reduzierte Totzeit, die sich aus der Verwendung der neu entwickelten EtherCAT Schnittstelle ergibt. Verglichen mit einem serienmäßigen Hexapodcontroller von Physik Instrumente konnte diese um den Faktor 10 reduziert werden. Der Einfluss der Totzeit auf den Positionsfehler verringert sich dadurch um einen Faktor von bis zu 100. Das interne Ziel: „Weiterentwicklung der integrierten Elektronik wie Motortreiber, Kinematik-Steuerung und Kommunikationsschnittstellen für den robusten Einsatz in einer Industrieumgebung“ konnte somit durch die erfolgreiche Implementierung einer Glasfaserdatenübertragung zwischen Controller- und Treibern des Hexapod-Systems vollständig erreicht werden.

Das Ziel der Verbesserung der Anbindung der Kabel innerhalb des Hexapoden konnte nicht zufriedenstellend erfüllt werden, da durch die hohen benötigten Ströme und den Anforderungen hinsichtlich der Störsicherheit zwei unflexible Kabel pro Einzelbein im stark begrenzten Bauraum innerhalb des Hexapoden untergebracht werden mussten. Zudem war zu Beginn des Projekts unklar, ob eine Kapselung der Einzelbeine des Hexapoden realisiert werden kann. Die Art der Kapselung beeinflusst im Wesentlichen die möglichen Lösungen der Kabelführung. Dieses Ziel konnte durch die entwickelte Faltenbalglösung zufriedenstellend erfüllt werden, sodass eine Definition tauglicher und für die Industrieumgebung typischer Schnittstellen im weiteren Projektverlauf entfiel, da keine Schnittstellen durch ein gekapseltes Hexapod-System geführt werden mussten. Durch die Integration von Beschleunigungs- und Temperatursensorik innerhalb der Einzelbeine sowie der nachgelagerten Signalverarbeitung in dem neu entwickelten Controller konnten die Grundlagen für weitere Untersuchungen zur Erkennung des Systemzustandes gelegt werden. Die durchgeführten Versuche mittels Beschleunigungssensorik lieferten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich Messstelle, Störgrößen und

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

systematischen Zusammenhängen mit den im Einzelbein verbauten Komponenten. Zusätzlich konnte die routinemäßige Datenabfrage durch Unterstützung des Fraunhofer IFAM und der Bereitstellung von Testroutinen und Auswerteskripten erprobt und weitestgehend automatisiert durchgeführt werden. Veränderungen im Frequenzspektrum, die auf einen möglichen Verschleiß von Komponenten in Einzelbeinen des Hexapoden hinweisen, konnten aufgrund der kurzen Betriebszeit des Hexapod-Systems nicht beobachtet werden.

2.7 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die beschriebenen Ergebnisse und die damit verbundenen Arbeiten waren notwendig, um die im Vorhaben gesetzten Ziele zu erreichen. Der entwickelte Hexapod konnte die an ihn, hinsichtlich Dynamik und Integration der Bearbeitungswerkzeuge, gestellten Anforderungen erfüllen und so einen wesentlichen Beitrag zum Erfolg des Vorhabens leisten. Dadurch konnten die Voraussetzungen in ADMAS geschaffen werden, um eine Reduktion der Bearbeitungszeiten von Flügelschalen bezüglich der Konturenbearbeitung bei gleichzeitiger Erhöhung der Präzision zu erreichen. Dadurch können Ressourcen im Sinne der Nachhaltigkeit geschont und Produktionskapazitäten im Leichtbau gesteigert werden. Die für die erfolgten Neu- bzw. Weiterentwicklungen verwendeten Mittel wurden angemessen und zielführend eingesetzt.

2.8 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Teilvorhaben realisierten Entwicklungen und die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen eine Verwertung von Ergebnissen im Portfolio von PI. Direkt können die neuen Aspekte in der Controllerarchitektur sowie die Realisierung der optischen Datenübertragung zwischen Treiberbox und Controller verwendet werden. Darüber hinaus können die aus dem Antriebsaufbau hervorgegangenen Konzepte für die Bremse und die Absolutencoder sowie die Entwicklungen zur Realisierung der hochdynamischen Feinpositionierung in naher Zukunft in die Produkteentwicklung integriert werden. Beim Condition Monitoring konnten zwar keine Langzeittests realisiert werden, aber dafür konnten wichtige Voraussetzungen und Grundlagen sowie Diagnosemöglichkeiten für eine Verwertung in darauf aufbauenden Forschungsprojekten generiert werden.

2.9 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Teilvorhaben ist kein Fortschritt anderer Stellen bekannt geworden.

2.10 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Im Rahmen der Tagung „Feinwerktechnische Konstruktion“ der Deutschen Gesellschaft für Feinwerktechnik e.V. (dgft) wurde der im Projekt entwickelte Hexapod 2023 gezeigt. Darüber hinaus wurde das ADMAS-Gesamtsystem 2024 auf der Internationalen Luft- und Raumfahrtausstellung (ILA) in Berlin präsentiert. Diese Vorstellung wurde mit einer Pressemitteilung eingeleitet, welche unter https://www.physikinstrumente.de/de/ueber-pi/news-presse/news-detailseite/admas abgerufen werden kann. Dieser Sachverhalt von verschiedenen Plattformen aufgenommen und ebenfalls veröffentlicht:

- Wirtschaftskraft: https://wirtschaftskraft.de/artikel/ila-berlin-2024-pi-praesentiert-hochdynamische-ausgleichskinematik-fuer-den-flugzeugbau
- Ingenieur.de: https://www.ingenieur.de/fachmedien/konstruktion/antriebstechnik/hexapod-system-fuer-die-cfk-bearbeitung/

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

2.11 Wissenschaftliche Referenzen und Patente

[Bar16] Barnfather, J.D.; Goodfellow, M.J.; Abram, T.: „Positional capability of a hexapod robot for machining applications.“ Int J Adv Manuf Technol 89, 1103–1111 (2017).

[Xie22] Xie Z.; Xie F.; Zhu L.; Liu XJ.: Robotic mobile and mirror milling of large-scale complex structures.“ Natl Sci Rev. 2022

[Hen17] Hennes M.: „Messverfahren im Maschinenbau.” In: Schwarz, W. (eds) Ingenieurgeodäsie. Springer Reference Naturwissenschaften. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. pp 319–345

[Sul10] Sulzer, J. Kovač, I.: „Enhancement of positioning accuracy of industrial robots with a reconfigurable fine-positioning module“, Precision Engineering, Volume 34, Issue 2, 2010.

[Puz11] Puzik; Arnold: „Genauigkeitssteigerung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern durch Fehlerkompensation mit 3D-Piezo-Ausgleichsaktorik.“ Dissertation, Stuttgart, 2011

[Rus24] Russo, M.; Zhang D.; Liu XJ.; Xie Z.: „A review of parallel kinematic machine tools: Design, modeling, and applications“, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 196, 2024

[Sch16] Schneider, U.J.: „Untersuchung von modellbasierter Fehlerkompensation und erweiterter Positionsregelung zur Genauigkeitssteigerung von roboterbasierten Zerspanungsprozessen.“ Dissertation, Stuttgart, 2016

[Bos04] Bossoni, S.: „Simulation und Kalibration von Parallelkinematiken – IWF Hexaglide“; https://www.icvr.ethz.ch/iwf/research/machine/concluded_projects/machine_concepts/projektblatt_hexa_neu_deutsch.pdf

[Heb00] Hebsacker, M.: „Entwurf und Bewertung Paralleler Werkzeugmaschinen - das Hexaglide.“, Dissertation ETH Zürich Nr. 13467

[Ola07] Olazagoitia, JL; Wyatt, S.: „New PKM Tricept T9000 and Its Application to Flexible Manufacturing at Aerospace Industry.“ SAE Technical Papers. 2142. 37-48 2007

[Axi11] Axinte, D.A.; Allen, J.M.; Anderson, R.; Dane, I.; Uriarte, L.; Olara, A: „Free-leg Hexapod: A novel approach of using parallel kinematic platforms for developing miniature machine tools for special purpose operations.“ Cirp Annals-manufacturing Technology - CIRP ANN-MANUF TECHNOL. 60, 2011

[Ola14] Olarra A.; Allena J.M.; Axinte D.A. „Experimental evaluation of a special purpose miniature machine tool with parallel kinematics architecture: Free leg hexapod.“ Precision Engineering, Volume 38, Issue 3, 2014

[Liu19] Liu, XJ.; Xie, Z.; Xie, F.; Wang, J.: „Design and Development of a Portable Machining Robot with Parallel Kinematics.“, 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR) 2019

[Gloe04] Gloess, R.: “Design of Parallel Kinematics with Extremly Small Hysteresis Effects for High Repeatability”, Proc. PKS 2004 – Parallel Kinematic Machines in Research and Practice, the 4th Parallel Kinematics Seminar, 2004.

[Gloe05] Gloess, R.: “Positioniertisch”, Patentschrift, DE 102 28 818B4 2005.08.18

[Gloe09] Gloess, R.: “Cardan joints with axis offset in singularity free hexapod structures for nanometer resolution”, Proc. ASPE Monterey, (2009)

[Rud10] Rudolf, C.; Manik, E.; Gloess, R.; Ebert, M.: “Cardanic Joints with Aces Offset in 6D Positioning Systems with Micron Precision for Vacuum Applications” , Proc. 12th International Conference on New Actuators, 2010.

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

[Rud15] Rudolf, C; Haase, T.; Gloess, R.; Klein, S.; Huber, S.: “Directly Driven Hexapods for Highly Dynamic 6 DoF Applications” , Proc. Euspen´s 15th International Conference & Exhibition, 2015.

[Ste65] Stewart, D.: “A Platform with Six Degrees of Freedom”, Proc. Euspen´s 15th International Conference& Exhibition, 2015.

[Mer91] Merlet, J.-P.: “Articulated device, for use in particular in robotics “, Patentschrift US 5,053,687 1991.10.01

[San18] Sander, C.; Rudolf, C.; Bogner, A.: “Development of high precision parallel kinematics for Industrial Automation and Silicon Photonics” , PRc. Euspen´s 18th International Conference& Exhibition, 2018. [Muth23] Muth M., Carstensen P., Hintze W., Gnadt S., Brillinger C., Möller C., and Böhlmann C.: "Sensor-guided machining of large-scale CFRP components based on resin transfer molded features", Proc. SPIE 12618, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XIII.

[Phy24] https://www.physikinstrumente.de/de/ueber-pi/fertigungsfaehigkeiten-ausstattung/messtechnik

https://www.physikinstrumente.de/de/ueber-pi/fertigungsfaehigkeiten-ausstattung/messtechnik

Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Auf der Römerstrasse 1, 76228 Karlsruhe
Tel +49 721 4846-0, Fax +49 721 4846-1019, E-Mail info@pi.de, www.pi.de

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages