

Entwicklung eines roboterbasierten Prüfstandes für die mechanische Prüfung von Komponenten

Julia Reichmann

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Reichmann, Julia. 2026. "Entwicklung eines roboterbasierten Prüfstandes für die mechanische Prüfung von Komponenten." Augsburg: Universität Augsburg.

Nutzungsbedingungen / Terms of use:

licgercopyright

Dieses Dokument wird unter folgenden Bedingungen zur Verfügung gestellt: / This document is made available under these conditions:

Deutsches Urheberrecht

Weitere Informationen finden Sie unter: / For more information see:

<https://www.uni-augsburg.de/de/organisation/bibliothek/publizieren-zitieren-archivieren/publiz/>



Entwicklung eines roboterbasierten Prüfstandes für die mechanische Prüfung von Komponenten

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Dr.-Ing.

eingereicht an der

Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

der Universität Augsburg

von

Julia Reichmann

Augsburg, Mai 2025



Erstgutachter: Prof. Dr. Markus Sause

Zweitgutachterin: Prof. Dr.-Ing. Anna Trauth

Tag der mündlichen Prüfung: 15.10.2025

„Wir sollten nichts im Leben fürchten, aber alles verstehen.“

Marie Curie

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	2
1.2. Forschungsfragen	3
1.3. Zielsetzung	3
1.4. Struktur der Arbeit	4
2. Grundlagen	7
2.1. Werkstoff- und Bauteilprüfung	8
2.2. Prüfstandstechnik	15
2.3. Robotik	18
2.4. Verwandte Arbeiten	25
3. Aufbau und Methodik des roboterbasierten Prüfstandes	29
3.1. Anforderungen, Herausforderungen und Einsatzbereiche	30
3.2. Aufbau des roboterbasierten Prüfstandes	32
3.2.1. Überblick	32
3.2.2. Aktorik	34
3.2.3. Sensorik	35
3.2.4. Regelungsarten	38
3.2.5. Datenfluss	39
3.3. Standardisierter roboterbasierter Prüfprozess	40
3.4. Prüfablauf	42
3.5. Validierung Kraftmodell KukaForceISO	43
3.6. Flexible Prüfvorrichtung	46
3.6.1. Anforderungen	47
3.6.2. Konzepte und Herausforderungen	47
3.6.3. Ausblick	49
3.7. Versuchsaufbau der Anwendungsfälle	49
3.7.1. Zugversuch: Uniaxiale Spannungszustände ohne Querkräfte	50
3.7.2. Prüfung Fahrradrahmen: Variation der Lastvektor Position	52

3.7.3. Prüfung Snowboard: Überlagerung von Lastfällen	53
3.7.4. Prüfung Automobilkomponente: Multi-Roboter Prüfung	55
4. Ergebnisse und Diskussion	59
4.1. Anwendungsfälle	60
4.1.1. Uniaxiale Spannungszustände ohne Querkräfte	60
4.1.2. Variation der Lastvektor Position	65
4.1.3. Überlagerung von Lastfällen	74
4.1.4. Multi-Roboter Prüfung	78
4.2. Übergreifende Diskussion des roboterbasierten Prüfstandes	82
4.2.1. Universalität und Flexibilität	83
4.2.2. Zuverlässigkeit und Stabilität	83
4.2.3. Vergleich der Regelungsarten	85
5. Zusammenfassung und Ausblick	87
5.1. Zusammenfassung	88
5.2. Ausblick	90
A. Anhang	95
A.1. Technische Zeichnung Roboteranlage	96
A.2. Technische Zeichnung Adapterplatte	97
A.3. Technische Zeichnung Zugprobe	98
A.4. Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Zugversuche	99
Literaturverzeichnis	101
Abbildungsverzeichnis	107
Tabellenverzeichnis	109

Abkürzungsverzeichnis

6DOF	Six Degrees of Freedom
CAD	Computer-aided design
CASP	Computer Aided Specimen Placement
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DIC	Digital Image Correlation
E-Modul	Elastizitätsmodul
EtherCAT	Ethernet for Control Automation Technology
F/T Sensor	Kraft-/Drehmomentsensor
FDM	Fused Deposition Modeling
IPC	Industrie Personal Computer
KRL	KUKA Robot Language
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
PTP	Point-To-Point
ROI	Region of Interest
RPY	Roll-Pitch-Yaw
RSI	Robot Sensor Interface
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments
STL	Standard Transformation Language
TCP	Tool Center Point
Telnet	Teletype Network Protocol

1. Einleitung

In dieser Dissertation wird ein Prüfkonzept für einen roboterbasierten Prüfstand entwickelt und erfolgreich umgesetzt. Zunächst werden Methoden erarbeitet, die eine effiziente und präzise mechanische Prüfung komplexer Bauteile mithilfe von Industrierobotern ermöglichen. Um das Potenzial der roboterbasierten Prüfung zu erschließen, werden im nächsten Schritt Prüfungen an verschiedenen Bauteilen durchgeführt. Dabei werden neben der Bauteilgeometrie und dem -material auch die Lastfälle variiert, um die Chancen und Herausforderungen dieser innovativen Prüfmethode zu bewerten.

In Abschnitt 1.1 wird die Motivation für den Einsatz eines roboterbasierten Prüfstandes dargestellt, und es werden die Ziele erläutert, die mit dem in dieser Arbeit beschriebenen Ansatz verfolgt werden. Die zentralen Forschungsfragen, die dieser Arbeit zugrunde liegen, werden in Abschnitt 1.2 behandelt. Abschnitt 1.3 beschreibt die Zielsetzung der Arbeit im Detail, während Abschnitt 1.4 eine Übersicht über den Aufbau der gesamten Arbeit gibt.

1.1. Motivation	2
1.2. Forschungsfragen	3
1.3. Zielsetzung	3
1.4. Struktur der Arbeit	4

1.1. Motivation

Die roboterbasierte Bauteilprüfung stellt ein innovatives Konzept dar und gewinnt als Forschungsgebiet zunehmend an Bedeutung. Der Einsatz von Industrierobotern ermöglicht hierbei neue Freiheitsgrade bei der Aufbringung von Lasten sowie eine erweiterte Flexibilität für eine Vielzahl an Prüfanforderungen. Im Gegensatz zu konventionellen Universalprüfmaschinen, die üblicherweise auf einfache Lastfälle wie Zug- oder Druckbelastungen beschränkt sind, eröffnet der roboterbasierte Ansatz eine Möglichkeit, komplexe und realitätsnahe Belastungen auf Bauteile aufzubringen.

Obwohl es Prüfsysteme gibt, die überlagerte Lasten wie Zug- und Torsionsbelastungen oder biaxiale Lastfälle darstellen können, bleibt die Variabilität der darstellbaren, mehrachsigen Lastpfade stark eingeschränkt. Besonders bei der Prüfung komplexer Komponenten sind häufig anspruchsvolle, meist mehrachsige Lastszenarien erforderlich, die mit konventionellen Universalprüfmaschinen nur schwer oder gar nicht abbildbar sind. Hinzu kommt, dass Universalprüfmaschinen für die Komponentenprüfung oft mit speziellen Vorrichtungen und Zusatzelementen zur Krafteinbringung ergänzt werden müssen, was diese Ansätze kosten- und zeitintensiv gestaltet. Der damit verbundene Aufwand steht häufig in keinem Verhältnis zu den Entwicklungskosten der getesteten Komponenten. Dies führt dazu, dass Komponentenprüfungen nur begrenzt durchgeführt werden.

Der roboterbasierte Prüfstand bietet hingegen ein neues Maß an Freiheit in der (mehrdimensionalen) Lasteinbringung. Durch die Integration zweier 6-Achs-Robotersysteme können beliebig komplexe Lastpfade abgebildet werden, was eine modular und flexibel gestaltbare Prüfung unterschiedlichster Komponenten ermöglicht. Ein zusätzliches Messsystem, wie beispielsweise die digitale Bildkorrelation oder Kraft-/Drehmomentensensoren, erlaubt die in-situ Anpassung der aufgebrachten Last und unterstützt somit eine hohe Präzision und Anpassbarkeit während der Prüfung. Dank der Flexibilität dieses Systems kann der Prüfstand sowohl standardisierte Lastfälle wie Zug, Druck, Biegung und Torsion in beliebigen Richtungen als auch überlagerte Lastfälle abbilden. Die Größe und Geometrie des Prüflings stellt eine geringe Einschränkung dar, sodass sich der roboterbasierte Prüfstand als universelle Plattform für die Prüfung einer breiten Palette an Bauteilen eignet.

Durch den neuartigen roboterbasierten Prüfstand hat sich die Prüfstandstechnologie von einem spezialisierten zu einem universellen Konzept weiterentwickelt, das sowohl hochspezialisierte Komponententests als auch allgemeine Testszenarien umfassend abdecken kann. Die Flexibilität und Modularität des Systems erhöhen die Effizienz und Effektivität der Bauteilprüfung erheblich und ermöglichen eine kosteneffiziente Prüfung auch komplexer Bauteile. Dadurch etabliert sich dieser Ansatz als zukunftsweisend für zukünftige Entwicklungen in der mechanischen Prüfstandstechnologie.

1.2. Forschungsfragen

Im Folgenden werden die relevanten Forschungsfragen für die vorliegende Arbeit erläutert:

- Wie kann eine flexible roboterbasierte Komponentenprüfung entwickelt werden, die eine Anpassung an veränderte Bauteilgeometrien und erforderlichen Lastfällen bzw. Lastvektoren ermöglicht?
 - Welche Anforderungen und Herausforderungen müssen dabei berücksichtigt werden?
 - Wie können Prüfaufgaben für Komponenten klassifiziert werden? Für welche Prüfaufgaben und Einsatzbereiche eignet sich die roboterbasierte Komponentenprüfung (betreffend Kräfte, Wege und Geschwindigkeiten)?
 - Wie sieht ein standardisierter roboterbasierter Prüfprozess (erforderliche Schritte der Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung einer Prüfung) aus und wie ist ein typischer Prüfablauf (bestehend aus Anfahrbewegung, Prüfbewegung und Abfahrbewegung) gestaltet?
- Kann eine klassische Werkstoffprüfung zielführend und mit ausreichender Genauigkeit roboterbasiert durchgeführt werden?
- Ist eine roboterbasierte Prüfung verschiedener Komponenten mit einem vorab definierten Lastvektor möglich?
 - Kann eine uniaxiale Belastung ohne Querkräfte gezielt aufgebracht werden?
 - Können die Lastvektoren in ihrer Position variiert werden? Ist das Abprüfen eines Lastenheftes möglich?
 - Inwiefern können überlagerte Lasten geregelt und realisiert werden?
 - Ist eine Lasteinleitung durch kollaborative Roboter und zusätzlicher Aktorik technisch umsetzbar?
- Kann der Lastvektor während der Prüfung in Echtzeit dynamisch angepasst werden und wie kann dies technisch realisiert werden?
- Können sensorgeführte Bewegungen zur Bewältigung der Anforderungen an eine Prüfung genutzt werden?

1.3. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Umsetzung eines Prüfkonzeptes für den roboterbasierten Prüfstand, das eine präzise, flexible und realitätsnahe Prüfung komplexer Bauteile

unter mehrachsigen Lasten ermöglicht. Das Prüfkonzept zielt darauf ab, herkömmliche Prüfmethoden durch zusätzliche Freiheitsgrade bei der Lasteinbringung zu erweitern, um mehr Flexibilität bei der Auswahl der Lastfälle und Prüfscenarien zu generieren und so eine genauere Abbildung realer Belastungszustände zu schaffen. Hierbei soll der Prüfstand durch den Einsatz zweier sechachsiger Industrieroboter beliebig komplexe Lastpfade umsetzen, um Bauteile unter realitätsnahen Bedingungen zu testen. Dabei werden folgende spezifische Ziele verfolgt:

1. Erreichen einer höheren Flexibilität und Universalität: Der Prüfstand soll in der Lage sein, Bauteile unterschiedlicher Geometrien und Materialien unter variablen Lastbedingungen zu prüfen, ohne dass komplexe Vorrichtungen notwendig sind.
2. Integration und Nutzen sekundärer Messsysteme: Ein Ziel ist der Nachweis, dass die Integration sekundärer Messsysteme, wie beispielsweise der Kombination aus Kraft-/Drehmomentsensor und digitaler Bildkorrelation, eine in-situ Anpassung der Positionen und Lasten erlaubt und die Qualität bzw. Präzision der Prüfung erhöht.
3. Effizienzsteigerung der Prüfverfahren: Der Prüfstand soll gegenüber konventionellen Prüfansätzen eine effizientere und schnellere Durchführung von Prüfungen ermöglichen, ohne Kompromisse bei der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit einzugehen.

Die zentrale Hypothese lautet: Der roboterbasierte Prüfstand ermöglicht durch die hohe Bewegungsfreiheit der Industrieroboter und die Integration sekundärer Messsysteme eine realitätsnahe und flexible Prüfung komplexer Bauteile unter mehrachsigen Lasten, die mit herkömmlichen Prüfmaschinen nicht realisierbar ist.

1.4. Struktur der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in insgesamt fünf Kapitel, die den Aufbau, die Umsetzung und die Ergebnisse des entwickelten roboterbasierten Prüfstandes systematisch darstellen.

- Kapitel 1 führt in die Arbeit ein und gibt eine Übersicht über die Motivation, die zentralen Forschungsfragen und die Zielsetzung.
- Kapitel 2 behandelt Grundlagen der Werkstoff- und Bauteilprüfung, Prüftechnik und Robotik. Zudem wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik im Bereich der Prüfung spezifischer Bauteile sowie der Anwendung von Robotersystemen für zerstörungsfreie und zerstörende Prüfzwecke gegeben. Hier werden bestehende Ansätze, Einschränkungen und Optimierungspotenziale aufgezeigt, um die Einordnung der vorliegenden Arbeit im Forschungskontext zu verdeutlichen.

- Kapitel 3 beschreibt die Anforderungen, Herausforderungen sowie den Aufbau des roboterbasierten Prüfstandes und erläutert die einzelnen Systemkomponenten, insbesondere die verwendete Aktorik und Sensorik. Des Weiteren werden theoretische Konzepte der roboterbasierten Prüfung dargestellt, wie der standardisierte Prüfprozess und Prüfablauf. Abschließend werden die Versuchsaufbauten der einzelnen Experimente vorgestellt und erläutert.
- Kapitel 4 widmet sich der praktischen Anwendung des Prüfstandes. Hier werden die durchgeführten Prüfungen und Versuche vorgestellt, bei denen unterschiedliche Bauteile unter variablen Lastbedingungen geprüft wurden. Die Ergebnisse werden analysiert und für jeden Anwendungsfall diskutiert. In der nachfolgenden übergreifende Diskussion werden die Ergebnisse versuchsübergreifend diskutiert. Es wird insbesondere auf die Flexibilität, Zuverlässigkeit und Stabilität des roboterbasierten Prüfstandes eingegangen. Zudem werden die Regelungsarten der roboterbasierten Prüfung miteinander verglichen und bewertet. In diesem Kapitel werden die Hypothesen dieser Arbeit überprüft.
- Kapitel 5 bietet eine zusammenfassende Darstellung der wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten, einschließlich potenzieller Anwendungsbereiche und Weiterentwicklungen des roboterbasierten Prüfstandes.

2. Grundlagen

Dieses Kapitel vermittelt die theoretischen Grundlagen der roboterbasierten Prüfung. Zunächst werden die Prinzipien der Werkstoff- und Bauteilprüfung erläutert. Es wird dabei besonders auf den Zugversuch eingegangen, gefolgt von einer Einführung in die Prüfstandstechnik, in der die Herausforderungen und eine generelle Struktur vorgestellt werden. Da die Robotik und insbesondere die Industrierobotik einen wichtigen Anteil an dieser Arbeit hat, werden die Grundprinzipien wie Koordinatensysteme, Eulerwinkel, Trajektorieplanung, externe Sensorik und sensorgeführte Positionsregelung in einem eigenen Kapitel behandelt. Anschließend wird der aktuelle Stand roboterbasierter und robotergestützter Prüfsysteme betrachtet und voneinander abgegrenzt. Anhand aktueller Beispiele und Anwendungen werden Unterschiede zu konventionellen Prüfständen und Prüfmaschinen herausgearbeitet. Darüber hinaus werden verwandte Themengebiete diskutiert, um die Motivation des hier verfolgten Ansatzes zu verdeutlichen.

2.1. Werkstoff- und Bauteilprüfung	8
2.2. Prüfstandstechnik	15
2.3. Robotik	18
2.4. Verwandte Arbeiten	25

2.1. Werkstoff- und Bauteilprüfung

Die Werkstoffprüfung dient dazu, die Eigenschaften eines Materials sowohl qualitativ als auch quantitativ zu erfassen. Dies ist entscheidend für die konstruktive Auslegung von Bauteilen, die Verarbeitung des Werkstoffs, die Qualitätssicherung sowie die Analyse von Schadensfällen. Prüfverfahren lassen sich nach verschiedenen Kriterien klassifizieren. In der klassischen Werkstoffprüfung wird zwischen der zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfung unterschieden. Bei der zerstörungsfreien Prüfung bleibt das Prüfobjekt intakt und kann auch nach der Prüfung noch weiter verwendet werden. Es wird die Qualität des Prüfobjektes beurteilt (Inspektion), wobei der Fokus nicht auf der Ermittlung von Materialkennwerten liegt. Besonders in der Qualitätskontrolle und bei Sicherheitsbauteilen, die eine 100 % Prüfung erfordern, spielt diese Art der Prüfung eine wichtige Rolle [1]. Zu den wichtigsten Prüfmethoden zählen das Eindringverfahren, die magnetische Prüfung, die Wirbelstromprüfung, die Ultraschallprüfung und die Durchstrahlungsprüfung [1]. Bei der zerstörenden Prüfung weist das Prüfobjekt nach der Prüfung irreversible Schäden auf durch Belastung bis zum Versagen oder oberflächliche Veränderungen. Dabei liegt das Hauptziel dieser Prüfmethoden in der Ermittlung von Materialkennwerten, wobei sowohl chemische als auch physikalische Eigenschaften analysiert werden. Mechanische Prüfverfahren konzentrieren sich darauf, das Kraft-Verformungsverhalten von Werkstoffen anhand messbarer Werkstoffkennwerte zu charakterisieren. Ein typisches Beispiel ist der Zugversuch, bei dem unter anderem die Streckgrenze oder der Elastizitätsmodul ermittelt wird. Bei mechanischen Prüfverfahren ist es entscheidend, die Art des zeitlichen Verlaufs der Beanspruchung realitätsnah nachzubilden. Dabei lassen sie sich in drei zeitliche Beanspruchungsabläufe unterteilen (siehe Abbildung 2.1): Statisch, dynamisch und zyklisch. (Quasi-) Statische Prüfungen zeichnen sich durch eine geringe sowie konstante Belastungsgeschwindigkeit aus, sodass deren Einfluss auf das Prüfergebnis vernachlässigbar ist. Bei dynamischen Prüfverfahren wird die Belastung hingegen schlagartig aufgebracht. Dabei können Eigenschaften wie Bruchzähigkeit und Schlagfestigkeit gemessen werden. Bei der zyklischen Prüfung ändert sich die Belastung periodisch zwischen zwei Grenzwerten. Damit lässt sich die Widerstandsfähigkeit von Werkstoffen gegenüber zeitlich wechselnden Belastungen bewerten, wie sie beispielsweise durch Schwingungen im Maschinen- und Fahrzeugbau auftreten. So lassen sich das Ermüdungsverhalten und die Lebensdauer von Werkstoffen ermitteln. [2]

Eine Übersicht der relevanten Einteilung der durchgeführten Prüfungen am roboterbasierten Prüfstand ist in Abbildung 2.1 dargestellt. In den folgenden Kapiteln werden ausschließlich zerstörende Werkstoffprüfungen bzw. Bauteilprüfungen behandelt, wobei der Fokus auf mechanischer Beanspruchung unter quasistatischer Belastung liegt.

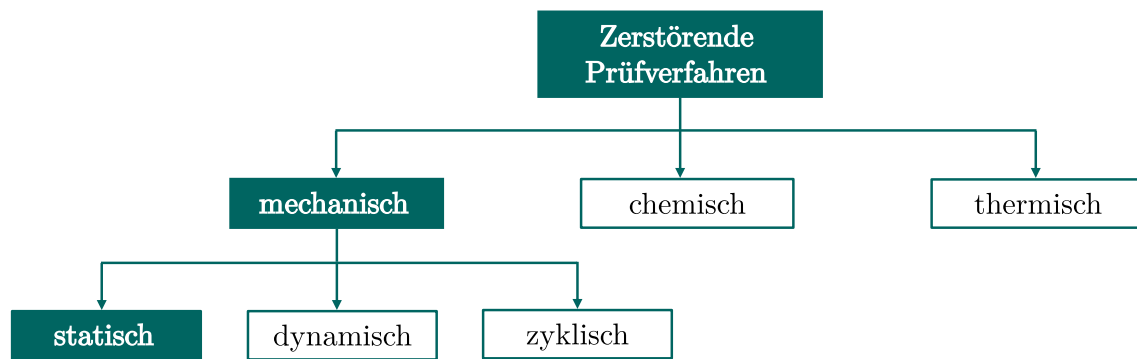


Abbildung 2.1.: Einteilung der zerstörenden Prüfverfahren und der mechanischen Prüfverfahren nach dem zeitlichen Belastungsablauf, eigene Darstellung nach [2].

Beanspruchungsarten

Bei den mechanischen Prüfverfahren werden die Prüfkörper überwiegend auf Zug, Druck und Biegung, aber auch auf Torsion (Verdrehung), Scherung (Verschiebung) und Knickung beansprucht. Die verschiedenen Belastungsarten werden in Abbildung 2.2 anschaulich dargestellt, wobei die auf den Prüfkörper wirkenden Kräfte durch rote Pfeile dargestellt sind. Für die Prüfungen am roboterbasierten Prüfstand wurden die Belastungsarten passend für den jeweiligen Anwendungsfall ausgewählt, um eine möglichst realitätsnahe Prüfung zu ermöglichen.

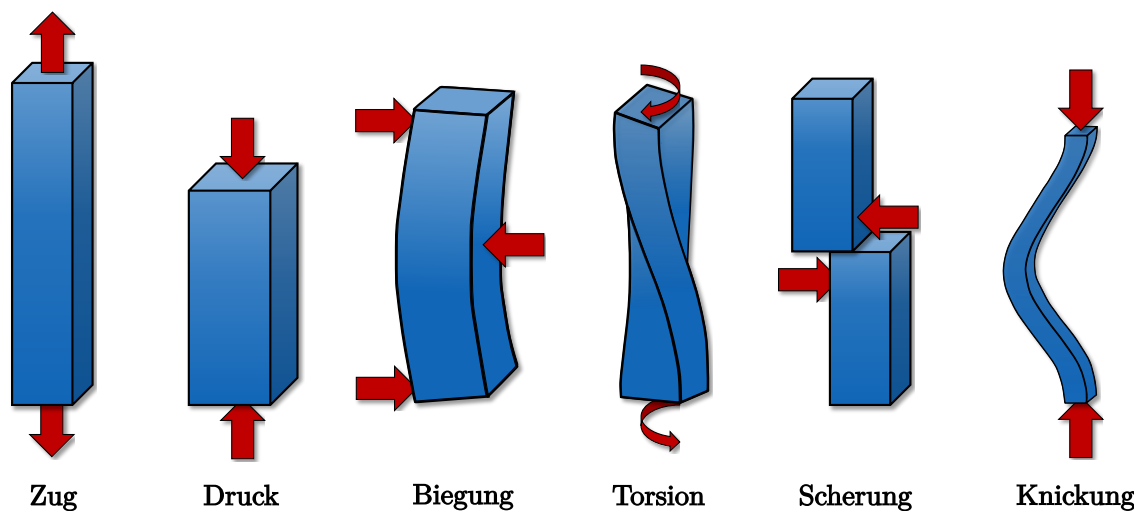


Abbildung 2.2.: Die sechs wesentlichen Beanspruchungsarten bei mechanischen Prüfverfahren, eigene Darstellung nach [3].

Spannung-Verformung-Zusammenhang

Die Inhalte des folgenden Unterkapitels sind dem Buch „Werkstoffkunde“ von H. J. Bargel und G. Schulze entnommen [4].

Wird ein Bauteil mechanisch beansprucht, führt dies zwangsläufig zu einer Verformung. Handelt es sich um eine elastische Verformung, kehrt das Bauteil nach der Entlastung wieder vollständig in seine ursprüngliche Form zurück. Bleiben dagegen irreversible Formänderungen zurück, spricht man von plastischer Verformung. Die relative Längenänderung eines Bauteils wird als Dehnung bezeichnet und berechnet sich aus dem Verhältnis der Längenänderung ΔL zur ursprünglichen Ausgangslänge L_0 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (2.1)$$

Bleibende Verlängerungen werden auch als Reckung bezeichnet, während für Verkürzungen der Begriff Stauchung gebräuchlich ist.

Der zur Verformung erforderliche Kraftanteil, bezogen auf die Querschnittsfläche, wird als Spannung definiert. Dabei wird zwischen der technischen Spannung (oder Nennspannung) und der wahren Spannung unterschieden. Die technische Spannung bezieht sich auf den Ausgangsquerschnitt S_0 , während die wahre Spannung den sich während der Verformung ändernden kleinsten Querschnitt berücksichtigt. Für die technische Spannung σ gilt also folgender Zusammenhang:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}. \quad (2.2)$$

Im Allgemeinen führt eine Erhöhung der Belastung zu einer Zunahme der Verformung. Unter bestimmten Bedingungen, z. B. bei hohen Spannungen oder erhöhten Temperaturen, treten jedoch zeitabhängige Effekte auf. So wird die fortschreitende Verformung bei konstanter Belastung als Kriechen bezeichnet. Umgekehrt kann es bei konstanter Verformung zu einem Spannungsabfall kommen, der als Relaxation bezeichnet wird.

Die Kurve des typischen Spannung-Verformung Verlaufs für metallische Werkstoffe zeigt zunächst einen linearen Anstieg, der dem Bereich der elastischen Verformung entspricht. Mit zunehmender Belastung geht dieser in einen gekrümmten Bereich über, der durch einen zunehmenden Anteil plastischer Verformungen gekennzeichnet ist.

Elastische Kennwerte

Im Folgenden werden die wesentlichen elastischen Materialkennwerte nach [4] beschrieben. Der lineare Bereich der Spannung-Verformung-Kurve zeigt eine Proportionalität zwischen der aufgebrachten Spannung und der elastischen Verformung. Der Proportionalitätsfaktor, der das Verhältnis von Spannung σ zu Dehnung ε beschreibt, wird als Elastizitätsmodul (E-Modul) E bezeichnet:

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}. \quad (2.3)$$

Wird dieses Verhältnis nicht für Differenzen, sondern für absolute Werte von Spannung und Verformung betrachtet, ergibt sich das sogenannte Hookesche Gesetz:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (2.4)$$

Für metallische Werkstoffe führt eine Verformung in Längsrichtung typischerweise zu einer gleichzeitigen Verringerung des Querschnitts, ein Effekt, der als Querkontraktion bekannt ist. Dieses Verhalten wird durch die Poisson-Zahl μ charakterisiert, die das Verhältnis der Querdehnung zur Längsdehnung angibt:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_{quer}}{\varepsilon_{längs}}. \quad (2.5)$$

Kennwerte des Zugversuchs

Im Folgenden werden die Grundlagen des Zugversuchs näher erläutert, da dieser als Referenzmethode zur Validierung des roboterbasierten Prüfstandes dient und einen Vergleich mit einem standardisierten Prüfverfahren ermöglicht. Die dabei dargestellten Inhalte dieses Unterkapitels basieren auf dem Buch „Werkstoffkunde“ von H. J. Bargel und G. Schulze [4].

Im Zugversuch werden die mechanischen Eigenschaften von Werkstoffen durch das gleichmäßige und stoßfreie Dehnen einer genormten Probe bis zum Bruch untersucht. Um eine Verfälschung der Ergebnisse zu vermeiden, ist eine niedrige Dehngeschwindigkeit erforderlich, typischerweise weniger als 10 % pro Minute oder eine Spannungszunahme von weniger als 10 N/mm² pro Sekunde. Während des Versuchs werden sowohl die aufgebrachte Kraft als auch die Verlängerung der Probe gemessen oder mithilfe von Messgeräten aufgezeichnet. Dabei gelten folgende Annahmen:

- Die Spannung ist gleichmäßig über den Querschnitt der Probe verteilt.
- Die Beanspruchung erfolgt ausschließlich uniaxial, entlang einer Achse (Stabachse).

Zur Durchführung des Zugversuchs wird die Probe biegungsfrei in die Einspannvorrichtungen der Zugprüfmaschine eingespannt und einer zunehmenden Zugkraft ausgesetzt, bis der Bruch eintritt. Zu Beginn erfolgt die Verlängerung elastisch, sodass die Messmarken nach einer Entlastung wieder den ursprünglichen Abstand L_0 anzeigen würden. Diese elastische Längenänderung ist gering. Bei höheren Kräften tritt eine plastische (bleibende) Verlängerung ein. Nach der Entlastung verkürzt sich der Abstand der Messmarken zwar um den elastischen Anteil, bleibt jedoch größer als L_0 .

Der Zugversuch liefert sowohl Verformungs- als auch Festigkeitskennwerte von Werkstoffen. Verformungskennwerte wie Bruchdehnung, Dehnung bei Höchstkraft und Brucheinschnürung bieten wertvolle Informationen zur Beurteilung des Werkstoffverhaltens. Für die Dimensionierung von Bauteilen sind hingegen Festigkeitskennwerte wie Dehngrenze, Streckgrenze

und Zugfestigkeit von besonderer Bedeutung, da sie die Berechnung der Belastbarkeit von Konstruktionen ermöglichen. Die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Kennwerte sind folgende:

- **Bruchdehnung A :** Differenz zwischen der Messlänge nach dem Bruch L_u und der Anfangsmesslänge L_0 , bezogen auf L_0 , angegeben in Prozent (Dehnung nach dem Bruch):

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100\%. \quad (2.6)$$

- **Dehngrenze R_p :** Der Wert der vorgegebenen Dehnung wird in Prozent dem Index des Symbols für die Dehngrenze zugeordnet, z. B. $R_{p0,01}$ (Technische Elastizitätsgrenze) und $R_{p0,2}$ (0,2 %-Dehngrenze). Dabei setzt sich $R_{p0,2}$, bestehend aus der Zugkraft an der Dehngrenze $F_{p0,2}$ und dem ursprünglichen Querschnitt S_0 , folgendermaßen zusammen:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}. \quad (2.7)$$

- **Zugfestigkeit R_m :** Die maximale Spannung, berechnet aus der Höchstkraft F_m und dem ursprünglichen Querschnitt S_0 :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}. \quad (2.8)$$

Im Gegensatz zum Kraft-Verlängerungs-Diagramm weist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm den Vorteil auf, dass es durch die Verwendung normierter Größen, Spannung und Dehnung, unabhängig von der Probengeometrie ist und somit materialtypische Eigenschaften darstellt [1]. Im Folgenden wird der charakteristische Verlauf des Spannungs-Dehnungs-Diagramms (siehe Abbildung 2.3) für Metalle nach „Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung“ von W. Weißbach detailliert beschrieben [1]:

- **Geradliniger Teil (Hookesche Gerade):** In diesem Abschnitt besteht eine proportionale Beziehung zwischen Spannung und Dehnung, sodass eine Verdopplung der Spannung auch zu einer Verdopplung der Dehnung führt. Bis zum Ende des linear elastischen Bereichs gilt das Hookesche Gesetz. Bauteile werden im Betrieb üblicherweise innerhalb dieses Spannungsbereichs belastet. [5]
- **Schwach gekrümmter Teil:** In diesem Bereich sind Spannung und Dehnung nicht mehr proportional. Das erste Maximum der Kurve markiert die obere Streckgrenze R_{eH} . Bei Überschreiten dieser beginnt die plastische Formänderung.
- **Abfallender Teil:** Nach Überschreiten der oberen Streckgrenze beginnt der Fließvorgang, der durch sichtbare plastische Verformungen gekennzeichnet ist. In diesem Bereich kann die Spannung trotz fortschreitender Dehnung sinken. Das relative Minimum der Kurve entspricht der unteren Streckgrenze R_{eL} .

- **Ansteigender Teil:** Mit fortschreitender plastischer Deformation tritt eine Kaltverfestigung des Werkstoffs auf, wodurch höhere Kräfte erforderlich sind, um weitere Dehnungen zu erzeugen. Dies führt zu einem erneuten Anstieg der Kurve bis zum Erreichen der maximalen Spannung, die als Zugfestigkeit R_m bezeichnet wird.
- **Absteigender Teil:** Nach Erreichen der maximalen Spannung kommt es bei duktilen Werkstoffen zu einer lokalen Querschnittsverringerung, der sogenannten Einschnürung. Die weitere Längenänderung der Probe konzentriert sich auf diesen Bereich, während die Spannung bis zum Bruch kontinuierlich abnimmt.

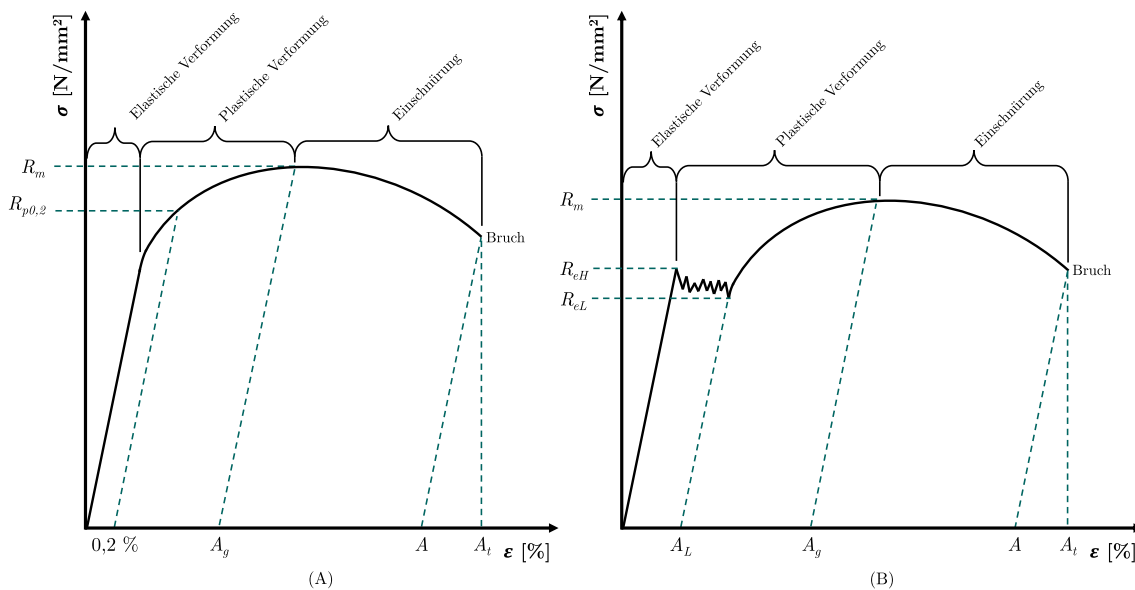


Abbildung 2.3.: Spannungs-Dehnungs-Kurve eines Werkstoffes mit ausgeprägter Streckgrenze (A) und ohne ausgeprägte Streckgrenze mit kontinuierlichem Fließbereich (B), in Anlehnung an [6].

Aufgrund der hohen Anforderungen an eine präzise Prüfbewegung, insbesondere hinsichtlich der geringen, kontinuierlichen Prüfgeschwindigkeit sowie der uniaxialen Belastung, erweist sich dieser Versuch als besonders geeignet für die Validierung der roboterbasierten Prüfmethode.

Prüfpyramide

Die durch Zugversuche ermittelten Werkstoffkennwerte sind essenziell für die Beschreibung der mechanischen Eigenschaften eines Materials und dienen als Grundlage für die Auslegung und Dimensionierung von Bauteilen. Während Materialprüfungen die Eigenschaften einzelner Werkstoffe unter idealisierten Bedingungen bestimmen, ist für eine realitätsnahe Bewertung der Bauteilfestigkeit eine weiterführende Prüfung auf höheren Strukturebenen erforderlich. Hier setzt das Konzept der Prüfpyramide nach U. P. Breuer [5] an. In Abbildung 2.4

sind die einzelnen Stufen der Prüfpyramide dargestellt, die den Prüfprozess strukturiert und schrittweise von der Material- zur Komponentenebene führt. Diese Struktur dient dazu, den Prüfprozess effizient zu gestalten, indem der Zeit- und Kostenaufwand minimiert wird und gleichzeitig sichergestellt ist, dass alle benötigten Testresultate während der Entwicklungs- und Zertifizierungsphase rechtzeitig sowie in der erforderlichen Quantität und Qualität vorliegen. Die Größe der Prüfobjekte, ihre Komplexität, Herstellungszeit und Kosten nehmen von unten nach oben in der Pyramide zu. Die unterste Ebene umfasst die Material- und Werkstoffprüfung, bei der kleine Materialproben zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften wie Zug-, Druck- oder Biegefestigkeit, sogenannte Werkstoffkennwerte, eingesetzt werden. Es folgen Elemente, die spezifische Strukturbereiche nachbilden, etwa versteifte Platten oder einfache Paneele. Auf der nächsten Ebene werden Strukturdetails untersucht, die komplexere Verbindungen wie Nietverbindungen oder gekrümmte Bauteile untersuchen. Teilkomponentenprüfungen beschäftigen sich mit größeren Baugruppen, beispielsweise Segmente von Rumpf- oder Tragflächenstrukturen. Auf der vorletzten Stufe werden vollständige Komponenten eines Gesamtsystems, wie etwa ein kompletter Rumpf oder Flügel, geprüft. An der Spitze der Prüfpyramide stehen Großversuche, bei denen vollständige Flugzeugstrukturen in Originalgröße umfangreichen Tests unterzogen werden. Diese beinhalten dynamische Belastungstests, Schadenssimulationen und abschließende Festigkeitsprüfungen, die für die Typenzertifizierung erforderlich sind. Das Konzept der Prüfpyramide wurde exemplarisch anhand eines Flugzeugs erläutert, lässt sich jedoch grundsätzlich auf weitere Anwendungsgebiete übertragen. [5]



Abbildung 2.4.: Die Prüfpyramide veranschaulicht die einzelnen Stufen des Prüfprozesses, der systematisch von der Material- zur Komponentenebene führt. Mit jeder höheren Stufe nehmen die Größe und Komplexität der Prüfobjekte sowie deren Herstellungszeit und Kosten zu, eigene Darstellung nach [5].

Der in dieser Arbeit vorgestellte roboterbasierte Prüfstand wurde entwickelt, um sämtliche Ebenen der Prüfpypiramide abzudecken. Die Einsatzmöglichkeiten des Prüfstandes sind primär durch die Größe des Spannungsfelds ($7\text{ m} \times 2,5\text{ m}$) sowie den Arbeitsraum der beiden Industrieroboter begrenzt. In den vier Anwendungsfällen wurden die unteren Stufen der Prüfpypiramide, einschließlich der Material- und Werkstoffprüfung sowie der Teilkomponentenprüfung, erfolgreich validiert. Die Ergebnisse dieser Versuche werden in Kapitel 4 dargestellt und zeigen das Potenzial für zukünftige Großversuche auf.

2.2. Prüfstandstechnik

Die Entwicklung von Prüfsystemkonzepten stellt innerhalb der universitären Forschung ein vergleichsweise kleines und spezialisiertes Forschungsfeld dar. Dies liegt unter anderem daran, dass Prüfstandssysteme nicht primär auf Basis grundlagenwissenschaftlicher Methoden, sondern vor allem durch die langjährige industrielle Praxis und Erfahrungswerte entwickelt werden. Ein Großteil des Fachwissens in diesem Bereich befindet sich in Unternehmen, die entweder eigene Prüfstände für ihre Produkte betreiben oder als spezialisierte Dienstleister für Prüfaufgaben tätig sind. Da detaillierte technische Informationen oft als unternehmensinternes Wissen betrachtet werden, unterliegen sie strengen Geheimhaltungsrichtlinien und sind in der wissenschaftlichen Literatur nur begrenzt verfügbar. Trotz dieser Herausforderungen wird im folgenden Kapitel ein Überblick über die Prüfstandstechnik gegeben, um zentrale Konzepte, Anwendungsbereiche und technologische Entwicklungen darzustellen.

Mechanische Prüfstände dienen der experimentellen Untersuchung einzelner Komponenten oder ganzer Baugruppen unter definierten mechanischen Belastungen. Eine zentrale Rolle spielen Universalprüfmaschinen, die für die klassischen Beanspruchungsarten (vergleiche Abbildung 2.2) eingesetzt werden und damit eine Vielzahl von Materialprüfungen ermöglichen. Neben diesen universellen Systemen existieren spezialisierte Prüfstände, die auf spezifische Anwendungen, wie beispielsweise die Prüfung von Automobilkomponenten und Flugzeugbauteilen, ausgelegt sind. Prüfstände können, neben der Unterscheidung nach dem Prüfobjekt, auch nach ihrer Anwendung in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: Produktentwicklung bzw. Forschung & Entwicklung sowie Produktion bzw. Qualitätssicherung. In der Produktentwicklung kommen insbesondere Entwicklungsprüfstände zum Einsatz, um die Funktionalität von Prototypen oder neu entwickelten Komponenten zu evaluieren. Darüber hinaus dienen Dauerprüfstände der Untersuchung des Langzeitverhaltens von Bauteilen unter realen Belastungen bis zum Erreichen der Materialermüdung oder eines Versagenskriteriums. Innerhalb der Fertigungskette sind Zwischenprüfstände verbreitet, die in den Produktionsprozess integriert werden und eine frühzeitige Erkennung von Fertigungsfehlern ermöglichen. Am Ende der Produktionslinie übernehmen End-of-Line-Prüfstände die finale Qualitätskontrolle, bevor das Produkt an den Endkunden ausgeliefert wird. [7]

Ein Prüfstandssystem ist funktional in mehrere Ebenen gegliedert (siehe Abbildung 2.5). Diese Architektur ermöglicht eine klare Trennung der einzelnen Systemkomponenten und sorgt für eine effiziente Integration verschiedener Module.

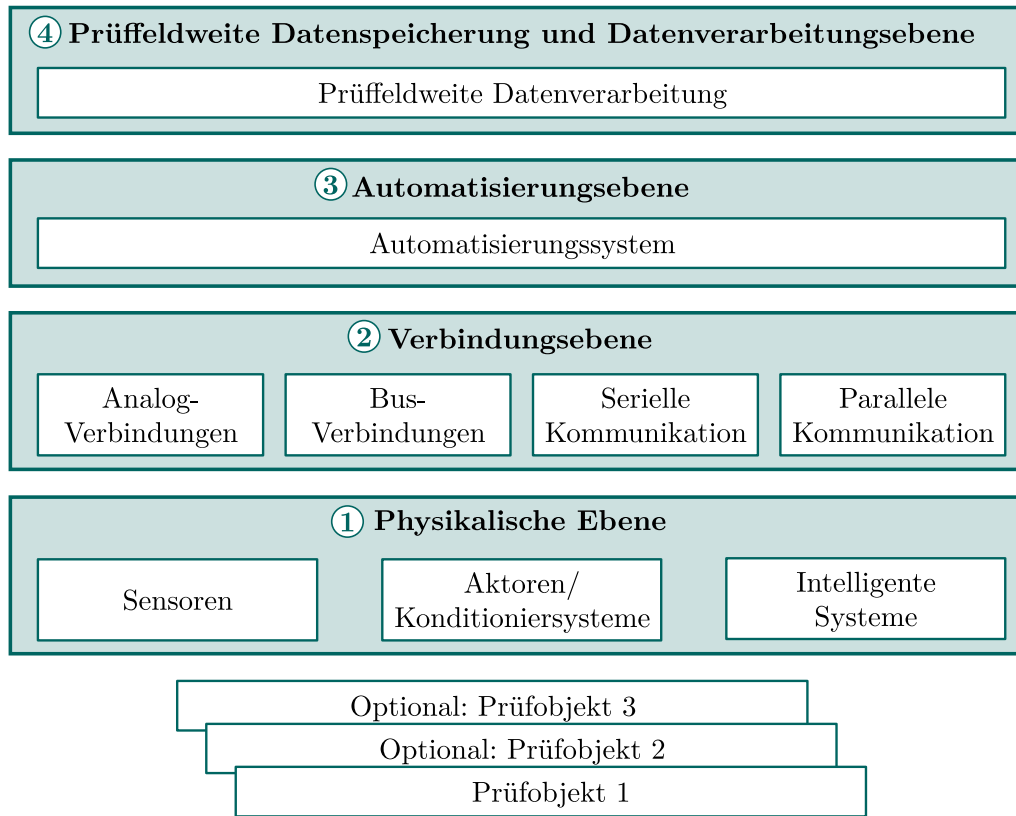


Abbildung 2.5.: Generelle Struktur eines Prüfstandes, eigene Darstellung nach [7].

Grundsätzlich lassen sich nach [7] vier Ebenen unterscheiden:

1. **Physikalische Ebene:** Diese unterste Ebene umfasst Sensoren, Aktoren, Konditioniersysteme sowie intelligente Systeme wie Steuergeräte oder komplexe Messsysteme. Sie bildet die Grundlage für die Erfassung und Bereitstellung physikalischer Messwerte.
2. **Verbindungsebene:** Diese Schicht stellt die Schnittstelle zwischen den Elementen der physikalischen Ebene und dem Automatisierungssystem dar und stellt sicher, dass die Mess- und Steuerdaten über Bussysteme oder PC-Schnittstellen mit der Automatisierungsebene kommunizieren können. Sie beinhaltet Analogverbindungen, Busverbindungen (wie beispielsweise Profibus, EtherCat, ProfiNet), serielle Kommunikation (wie beispielsweise RS 232) sowie parallele Kommunikation.
3. **Automatisierungsebene:** In dieser Ebene werden die erfassten Messdaten verarbeitet, gespeichert und für automatisierte Prüfabläufe genutzt. Dazu gehören Messdatenerfas-

sung, Signalverarbeitung, Datenmanagement sowie Regelungs- und Simulationsfunktionen. Außerdem enthält sie eine Vielzahl von Softwarelösungen, zum Beispiel für die Ausführung von Prüfbewegungen oder die Absicherung des Prüfstandes durch Lichtschranken.

4. **Prüffeldweite Datenspeicherung und Datenverarbeitungsebene:** In großen Entwicklungszentren werden mehrere Prüfstände vernetzt, wodurch eine zentrale Datenspeicherung und -verarbeitung erforderlich ist. Diese Ebene ermöglicht eine übergreifende Integration der Prüfstände.

Da Prüfstände mit unterschiedlichsten Prüfaufgaben konfrontiert sind, müssen die Automatisierungssysteme flexibel auf wechselnde Anforderungen reagieren. Neue Komponenten, wie Sensoren, Aktoren, Steuergeräte oder Messgeräte, müssen auch nachträglich problemlos in bestehende Prüfstände integriert werden können. Zudem erfordert der hohe Investitionsaufwand für Prüfstände einen effizienten Betrieb. Viele Entwicklungszentren setzen daher auf einen Schichtbetrieb, um eine nahezu durchgehende Nutzung zu gewährleisten und die Kosten für Auftraggeber möglichst gering zu halten. Diese Anforderungen bedingen einen modularen Aufbau der Prüfstandssysteme. Standardisierte Module bieten den Vorteil, dass sie kosteneffizienter als maßgeschneiderte Prüfsysteme sind und sich flexibel erweitern lassen. [7]

Ein zentrales Konzept zur Bewältigung der steigenden Anforderungen an moderne Prüfstände ist die prozessorientierte und modulare Systemarchitektur, wie sie im Beitrag der FEV Motorentechnik GmbH „Prüfstandstechnik: Von der Anforderung zur Lösung – Innovative Produkte und Prozesse“ beschrieben wird [8]. Ein modularer Aufbau ermöglicht nicht nur die einfache Integration neuer Komponenten, sondern trägt auch zur Flexibilität und Effizienz im Prüfbetrieb bei. Insbesondere in Entwicklungszentren, die Prüfstände im Schichtbetrieb nutzen, sind standardisierte und skalierbare Module entscheidend, um eine hohe Auslastung und einen wirtschaftlichen Betrieb sicherzustellen. Allerdings stehen viele Prüfstandsanwendungen vor der Herausforderung, dass unterschiedliche Prüfstandstypen oft nicht kompatibel sind. Klassische Prüfstände wurden meist für spezifische Aufgaben entwickelt, beispielsweise für Motor- oder Fahrzeugtests, was den Übergang zwischen verschiedenen Prüfumgebungen erschwert. Eine ganzheitliche Prüfstandslösung, die verschiedene Prüfmethoden integriert, ist daher essenziell, um Synergieeffekte zu nutzen und den Prüfprozess effizienter zu gestalten. Ein vielversprechender Ansatz ist die Entwicklung flexibler und skalierbarer Prüfsysteme, die sich an verschiedene Testanforderungen anpassen lassen. Ein Beispiel hierfür ist der von FEV Motorentechnik GmbH entwickelte Test-Cell-Manager, der eine offene und anpassbare Prüfarchitektur bietet. Solche Systeme erlauben eine prozessorientierte Steuerung, die nicht nur die Automatisierung vereinfacht, sondern auch den Übergang zwischen Simulationen und physischen Prüfbetriebläufen

erleichtert. Durch diese Weiterentwicklung der Prüfstandstechnik können Unternehmen nicht nur die Effizienz steigern und Kosten senken, sondern auch künftige Anforderungen an vernetzte und digitalisierte Prüfprozesse besser bewältigen. [8]

2.3. Robotik

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Robotik hat die Klassifikation von Robotersystemen zunehmend komplexer gemacht. Während in den frühen 1990er-Jahren eine klare Unterscheidung zwischen seriellen und parallelen Robotern vorherrschte, hat die rasante Entwicklung neuer Technologien sowie die Vielfalt an Forschungs- und Anwendungsfeldern die Kategorisierung erheblich erschwert. Heute werden Roboter in einer Vielzahl von Bereichen eingesetzt, darunter industrielle Fertigung, Medizintechnik, Rehabilitation sowie häusliche Assistenzsysteme. Die folgende Einteilung bietet eine erste Orientierung über die Vielfalt der Robotersysteme, die heute entwickelt und eingesetzt werden. Die fortschreitende Forschung und technologische Innovation wird jedoch kontinuierlich neue Robotertypen hervorbringen, die bestehende Kategorien erweitern oder neue definieren.

Grundsätzlich lassen sich Robotersysteme zunächst in stationäre und mobile Systeme unterteilen. Stationäre Robotersysteme sind dadurch gekennzeichnet, dass ihre Basis fest mit der Umgebung verbunden ist, wodurch sie einen definierten Arbeitsraum besitzen. Typischerweise handelt es sich um Roboter, die aus einer kinematischen Kette starrer Teilkörper bestehen, die über Gelenke miteinander verbunden sind. Durch unterschiedliche Gelenkkonfigurationen verändert sich die Position des Endeffektors, beispielsweise eines Greifers, innerhalb dieses Arbeitsraums. Für die beliebige Positionierung und Ausrichtung eines Objekts im dreidimensionalen Raum sind sechs Freiheitsgrade (6DOF: Six Degrees of Freedom) erforderlich: Drei zur Festlegung seiner genauen Position und drei zur Bestimmung seiner Orientierung relativ zu einem Referenzkoordinatensystem [9]. Mobile Robotersysteme können ihren Standort eigenständig verändern, da sie mit entsprechenden Antriebssystemen ausgestattet sind. Ihr Einsatz reicht von der industriellen Logistik über autonome Fahrzeuge bis hin zu explorativen Systemen in unstrukturierten Umgebungen. [10]

Ein besonders umfassendes Kriterium zur Einteilung von Robotern ist nach „Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms“ von J. Angeles ihre funktionale Bestimmung [11]. Basierend auf diesem Ansatz lassen sich folgende Kategorien unterscheiden:

- **Manipulatoren:** Hierzu zählen Roboterarme und -hände, die für präzise Handhabungs- und Montageaufgaben eingesetzt werden.

- **Bewegungsgeneratoren:** Darunter fallen unter anderem Flugsimulatoren, SCARA-Roboter (Selective Compliance Assembly Robot Arm), sowie bewegliche Plattformen zur flexiblen Manipulation von Objekten.
- **Lokomotionssysteme:** Diese umfassen mobile Roboter mit Rädern oder Beinen, einschließlich Rover und explorativer Systeme.
- **Schwimmende Roboter:** Systeme, die für den Einsatz unter Wasser entwickelt wurden, beispielsweise autonome Unterwasserfahrzeuge.
- **Flugroboter:** Dazu gehören Drohnen und andere autonome Luftfahrzeuge, die für Überwachungs-, Transport- oder Erkundungsaufgaben genutzt werden.

Industrierobotik und ihre Anwendungen

Industrieroboter gehören zur Klasse der Manipulatoren und stehen im Fokus dieses Kapitels, da der in dieser Arbeit vorgestellte roboterbasierte Prüfstand auf Industrierobotern basiert. Die Industrierobotik befasst sich mit der Entwicklung, Steuerung und Anwendung von Robotern in industriellen Prozessen und hat sich inzwischen zu einer ausgereiften Technologie entwickelt. Charakteristisch für Industrieroboter sind ihre Vielseitigkeit und Flexibilität. Nach der Norm ISO 8373:2021(en) ist ein Industrieroboter ein „automatisch gesteuerter, frei programmierbarer und vielseitig einsetzbarer Manipulator mit mindestens drei Achsen. Er kann stationär oder mobil in der industriellen Automatisierung eingesetzt werden. Ein Roboter umfasst den Manipulator mit seinen Antrieben, die durch eine Steuerung geregelt werden, sowie die Schnittstellen zur Programmierung und Kommunikation [12]. Manipulatoren lassen sich hauptsächlich anhand der Art und Anordnung ihrer mechanischen Gelenke klassifizieren, die unterschiedliche Bewegungsachsen realisieren. Dabei wird zwischen Drehgelenken, die Rotationsbewegungen ermöglichen, und Lineargelenken, die für geradlinige Bewegungen ausgelegt sind, unterschieden. In der Robotik hat sich die Denavit-Hartenberg-Konvention etabliert, die pro Gelenk eine einzige Bewegungsachse vorsieht. Die Anzahl der Gelenke bestimmt somit die Anzahl der Freiheitsgrade des Systems. Zur Charakterisierung von Robotertypen dienen daher sowohl die Anzahl der Freiheitsgrade als auch die geometrische Anordnung der Bewegungsachsen. Grundsätzlich lassen sich Industrieroboter gemäß „Grundlagen der Roboter-Manipulatoren - Band 1: Modellbildung von Kinematik und Dynamik“ von J. Mareczek in folgende Hauptkategorien unterteilen [13]:

- **Knickarm-Manipulatoren** verfügen über sechs hintereinander angeordnete Drehachsen (Seriell-Kinematik) und einen kugelförmigen Arbeitsraum mit Aussparungen. Die ersten drei Achsen bestimmen in erster Näherung die Position des Endeffektors, die restlichen drei näherungsweise seine Orientierung. Während sie eine hohe Flexibilität bieten, sind sie energieintensiv und weisen relativ geringe Geschwindigkeiten, Be-

schleunigungen sowie Steifigkeiten auf. Zudem sind die Anschaffungs- und Inbetriebnahmekosten hoch.

- **SCARA-Manipulatoren** besitzen drei vertikal, hintereinander angeordnete, parallele Drehachsen (Seriell-Kinematik), sowie eine vertikale Linearachse. Ihr zylinderförmiger Arbeitsraum mit zentraler Aussparung macht sie besonders geeignet für schnelle und präzise Bewegungen. Durch ihre stabile Bauweise bieten sie eine hohe Steifigkeit und Traglast.
- **Kartesische Manipulatoren** weisen drei rechtwinklige hintereinander angeordnete Linearachsen auf, wodurch jede Bewegungsachse eine kartesische Koordinate des Endeffektors darstellt. Ihre hohe Steifigkeit ermöglicht große Wiederholgenauigkeiten auch bei schweren Lasten und hohen Geschwindigkeiten. Typische Einsatzbereiche sind CNC-Maschinen, 3D-Drucker oder Pick-and-Place-Systeme.
- **Delta-Manipulatoren** (bei drei Linearachsen: Tripod, bei sechs Linearachsen: Hexapod) nutzen eine Parallel-Kinematik mit drei bis sechs Linearachsen, die über Kugelgelenke mit der Endeffektor-Plattform verbunden sind. Dank der verteilten Kräfte und der außerhalb der bewegten Armsegmente verbauten Antriebe erreichen sie eine hohe Steifigkeit, geringe bewegte Masse und schnelle Bewegungen. Nachteile sind der begrenzte Arbeitsraum, der hohe Steuerungsaufwand und die eingeschränkte Flexibilität.

Das Aufgabengebiet der Industrieroboter ist vielfältig und umfasst nach „Robotics - Modeling, Planning and Control“ von B. Siciliano et al. insbesondere die Materialhandhabung, Manipulation und Messung auf die im Folgenden näher eingegangen wird [9].

- **Materialhandhabung:** In industriellen Prozessen müssen Werkstücke transportiert, gelagert, montiert oder verpackt werden, ohne dass sich ihre physikalischen Eigenschaften ändern. Die Fähigkeit eines Roboters, Objekte gezielt zu greifen, entlang vordefinierter Bahnen zu bewegen und wieder abzulegen, macht ihn ideal für Aufgaben wie Palettieren, Verpacken, Sortieren oder das Be- und Entladen von Maschinen und Lagern.
- **Manipulation:** Bei der Fertigung werden Rohmaterialien durch Bearbeitung in Endprodukte umgewandelt oder zu größeren Baugruppen zusammengefügt. Die Fähigkeit eines Roboters, sowohl Objekte als auch Werkzeuge präzise zu führen, ermöglicht den Einsatz in Verfahren wie Schweißen, Lackieren, Kleben, Fräsen, Bohren, Gießen, Verschrauben oder Verdrahten.
- **Messung:** Die Qualitätssicherung erfordert präzise Messungen während des Produktionsprozesses. Der Roboter kann dabei als Messgerät eingesetzt werden, was ihn un-

ter anderem für Inspektionsaufgaben, Konturmessungen und die Erkennung von Fertigungsfehlern qualifiziert.

Koordinatensysteme und Eulerwinkel

Die Robotersteuerung übernimmt sowohl die Bewegungsplanung als auch die präzise Ausführung der geplanten Trajektorien. Die Position und Orientierung des Endeffektors – also des werkzeugführenden Teils des Roboters – wird in Bezug auf ein übergeordnetes Referenzkoordinatensystem festgelegt. Dabei kommen verschiedene Koordinatensysteme zum Einsatz:

- Das **Weltkoordinatensystem** ist ortsfest und dient als globale Referenz für viele Anwendungen. Sein Ursprung liegt in der Regel im Roboterfuß.
- Das **Roboterbasis-Koordinatensystem** ist ortsveränderlich und beschreibt seine Position und Orientierung durch die Translation und Rotation relativ zum Weltkoordinatensystem. Es hat seinen Ursprung z.B. am zu bearbeitenden Werkstück oder Werkstück.
- Das **Werkzeug-Koordinatensystem** beschreibt die exakte Position und Ausrichtung des Werkzeugs oder Greifers in Relation zur Roboterbasis. Sein Ursprung ist am Endeffektor bzw. ausgewählten Werkzeug (TCP: Tool Center Point) definiert.

Die Orientierung des Endeffektors kann mithilfe unterschiedlicher mathematischer Darstellungen beschrieben werden. Eine verbreitete Methode ist die Verwendung von Rotationsmatrizen, die eine Transformation des Koordinatensystems durch Matrixmultiplikation ermöglichen. Alternativ und in der Robotik üblich können Euler-Winkel genutzt werden, die die Orientierung des Werkzeugs durch drei hintereinander ausgeführte Drehungen um jeweils eine der drei Achsen eines Bezugskordinatensystems beschreiben. Es gibt zwei gängige Methoden zur Bestimmung der Rotationsfolge: Bei der körperfesten Rotation (current frame rotation) erfolgen die Drehungen nacheinander relativ zum lokalen Koordinatensystem des Objekts. Im Gegensatz dazu werden bei der raumfesten Rotation (fixed frame rotation) die Drehungen relativ zu einem globalen Koordinatensystem durchgeführt. In beiden Fällen beeinflusst die Reihenfolge der Drehungen maßgeblich die endgültige Orientierung bzw. die finale Ausrichtung. KUKA nutzt beispielsweise die Sequenz X-Y-Z für raumfeste Rotationen, die äquivalent als Z-Y'-X'' in körperfesten Rotationen ausgedrückt werden kann. Auch die Reihenfolge, in der diese Drehungen durchgeführt werden, führt zu unterschiedlichen Ergebnissen, weswegen einheitliche Konventionen nötig sind. Eine dieser Konventionen ist die Verwendung der Roll-Pitch-Yaw-Winkel (RPY), die insbesondere in der Luftfahrt und Fahrzeugtechnik etabliert sind. Auch in der Robotik werden sie häufig genutzt, um die Orientierung von Werkzeugen oder anderen Objekten relativ zu einer raumfesten (fixed frame), orthogonalen Basis zu beschreiben. Dabei folgt die Definition der Drehwinkel der „Rechten-Hand-Regel“, sodass positive Winkel entgegen dem Uhrzeigersinn verlaufen. In dieser Arbeit

wird diese Darstellungsweise der RPY-Winkel genutzt und entspricht der bereits erwähnten Sequenz X-Y-Z von KUKA:

- Rotation um die x-Achse (roll = rollen, C bzw. γ)
- Rotation um die y-Achse (pitch = neigen, B bzw. β)
- Rotation um die z-Achse (yaw = gieren, A bzw. α)

Dieses Prinzip erlaubt es, Bewegungen nicht nur im Roboterkoordinatensystem, sondern auch in anderen Bezugssystemen, wie etwa dem Endeffektor-, Werkzeug- oder Kamerakoordinatensystem, zu beschreiben. In diesen Fällen müssen lediglich die Translationen und Rotationen in das jeweilige Koordinatensystem des Roboters umgerechnet werden. [9]

Trajektorie

Die Möglichkeit, den Endeffektor des Roboters am Flansch flexibel zu positionieren, ist eine zentrale Anforderung in den meisten Roboteranwendungen. Beim Wechsel von einer Position zur nächsten muss eine geeignete Trajektorie geplant werden, um die Bewegung präzise auszuführen. Dies ist essenziell, da der Roboter aufgrund der Trägheit physikalischer Objekte nicht mit konstanter Geschwindigkeit bewegt werden kann. Stattdessen sind Phasen der Beschleunigung und Verzögerung erforderlich, bevor der Roboter zum Stillstand kommt. Durch den Einsatz von sechs Achsen lassen sich identische Zielpositionen im Arbeitsraum auf unterschiedlichen Bahnen erreichen, wodurch eine flexible Kollisionsvermeidung sowie eine optimierte Bahnplanung ermöglicht werden. Allerdings ergibt sich hierbei eine Herausforderung bei der Berechnung der inversen Kinematik: Die Bestimmung der einzelnen Achswinkel kann überbestimmt sein, was zu Singularitäten führt. Solche Singularitäten treten insbesondere dann auf, wenn zwei Rotationsachsen entlang einer Trajektorie parallel ausgerichtet sind. In einer solchen Konfiguration lassen sich die wirkenden Kräfte und Momente nicht korrekt berechnen. Eine sorgfältige Bahnplanung kann jedoch helfen, Singularitäten zu vermeiden. [9] Industrierobotersteuerungen bieten in der Regel nur eine begrenzte Auswahl vordefinierter Bewegungstypen. Die Steuerung von KUKA beispielsweise unterscheidet drei Hauptbewegungen: Point-To-Point (PTP), lineare (LIN) und zirkuläre (CIRC) Bewegungen. PTP-Bewegungen sind durch einen definierten Anfangs- und Endpunkt charakterisiert, während der exakte Pfad zwischen diesen Punkten nicht vorgegeben ist. Stattdessen wird stets die schnellste Verbindung gewählt, die aufgrund der rotatorischen Achsbewegungen nicht zwangsläufig der kürzeste Weg ist, wodurch die Bahnplanung weniger vorhersehbar wird. Deswegen ist die PTP-Bewegung begrenzt für sehr präzise Aufgaben geeignet. Im Gegensatz dazu erfolgt bei LIN-Bewegungen eine geradlinige Verbindung zwischen Start- und Zielposition, was insbesondere dann relevant ist, wenn die exakte Trajektorie des Endeffektors eine Rolle spielt, etwa bei Klebe- oder Schneidvorgängen. CIRC-Bewegungen folgen

einer kreisförmigen Bahn, die zusätzlich zum Start- und Endpunkt über einen definierten Hilfspunkt (Zwischenpunkt auf der Kreisbahn) verläuft, bevor das Ziel erreicht wird. Sie werden hauptsächlich angewendet wenn eine Kreisbahn Bestandteil eines Programms ist und in Kombination mit anderen Bewegungsarten. [9]

Externe Sensorik

Aktoren und Sensoren sind essenzielle Bestandteile der Robotik. Aktoren übernehmen die Bewegungsausführung, indem sie Achsen und Getriebe antreiben. Sie umfassen typischerweise eine Stromversorgung, Leistungsverstärker, Servomotoren sowie entsprechende Getriebe. Die Sensorik lässt sich in zwei Kategorien unterteilen: Interne (propriozeptive) und externe (exterozeptive) Sensoren. Interne Sensoren erfassen Zustandsgrößen des Manipulators, beispielsweise Encoder und Resolver zur Bestimmung der Achsposition oder Tachometer zur Messung der Achsgeschwindigkeit. Externe Sensoren hingegen erfassen Umgebungsgrößen und ermöglichen eine Interaktion mit der Außenwelt. Dazu zählen Kraftsensoren zur Messung der Endeffektorkraft, Abstandssensoren zur Objekterkennung sowie Kamerasysteme zur Erfassung relevanter Parameter bei der Umgebungserfassung und -interaktion. Im Folgenden wird die externe Sensorik, insbesondere Kraftsensoren und Bildsensoren, näher betrachtet, da sie die für eine Prüfung relevanten Umgebungsdaten wie Verschiebungen erfassen und somit einen essenziellen Bestandteil des roboterbasierten Prüfstandes bilden. [9]

Die Messung einer Kraft oder eines Drehmoments erfolgt in der Regel indirekt durch die Messung der Dehnung eines verformbaren Elements, sodass die einwirkende Last über die Erfassung kleiner Verschiebungen bestimmt wird. Die Grundkomponente eines Kraft- oder Drehmomentsensors ist der Dehnungsmessstreifen, der die Widerstandsänderung eines unter Belastung stehenden Drahtes nutzt. Diese Widerstandsänderung wird in ein elektrisches Signal umgewandelt. Der Dehnungsmessstreifen wird so gewählt, dass sich der Widerstand im Bereich der zulässigen Dehnung des dehnbaren Elements linear ändert. [9]

Die Aufgabe einer Kamera als Bildsensor besteht darin, die Intensität des von einem Objekt reflektierten Lichts zu messen. Zu diesem Zweck wird ein lichtempfindliches Element, ein sogenannter Pixel verwendet, das Lichtenergie in elektrische Energie umwandeln kann. Abhängig vom genutzten physikalischen Umwandlungsprinzip kommen verschiedene Sensortypen zum Einsatz, wobei CCD (Charge Coupled Device) und CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) Sensoren, die den photoelektrischen Effekt von Halbleitern nutzen, am häufigsten verwendet werden. [9]

Der Fokus in dieser Arbeit wird auf Stereokamerasysteme gelegt. Zur Berechnung beliebiger 3D-Koordinaten aus Bildaufnahmen können entweder mehrere Aufnahmen eines Objekts aus unterschiedlichen, überlappenden Blickwinkeln mit einer einzelnen Kamera erfolgen oder mindestens zwei Kameras mit überlappenden Sichtfeldern eingesetzt werden. Eine Anordnung mit konvergierenden Kameras erweitert das gemeinsame Bildfeld, ohne die

rechnerische Komplexität zu erhöhen. In dieser Arbeit kommt ein optisches 3D-Messsystem zum Einsatz, das auf der Stereokameratechnologie basiert. Das in dieser Arbeit verwendete optische Messsystem ATOS 5 der Carl Zeiss GOM Metrology GmbH erfasst simultan zwei stereoskopische Halbbilder und ermöglicht so die präzise dreidimensionale Vermessung von Objekten. Das System analysiert, berechnet und dokumentiert Verformungen, Starrkörperbewegungen sowie das dynamische Verhalten von Messobjekten. Die Koordinaten diskreter Punkte werden über einen definierten Zeitraum hinweg bestimmt, wobei die zeitliche Auflösung von der Bildfrequenz und den eingesetzten Sensoren abhängt. Die Software ermittelt die 3D-Koordinaten von Objekten, indem sie die erfassten Bildpunkte eindeutig zuordnet. Dies wird durch das Anbringen von Referenzpunktmarker auf der Bauteiloberfläche oder durch das Auftragen eines stochastischen Musters, eines sogenannten Specklemusters, ermöglicht. Die zeitaufgelöste Erfassung der 3D-Koordinaten erlaubt die Berechnung von Verschiebungen, Dehnungen sowie abgeleiteten Größen wie Geschwindigkeit und Beschleunigung. Die erste Aufnahme dient dabei als Referenzzustand. Um Veränderungen im Verlauf der Messung zu bestimmen, vergleicht die Software die erfassten Koordinaten und analysiert die Verschiebung der Mustermerkmale. [14]

Sensorgeführte Positionsregelung

Einige Bewegungssteuerungen ermöglichen eine externe Steuerung, sodass die Bahnplanung nicht durch die herstellerseitige Hard- und Software, sondern durch ein kundenspezifisches System erfolgt. Dies kann auf verschiedenen Ebenen geschehen: Durch direkte Steuerung der Antriebsleistung, Vorgabe der gewünschten Geschwindigkeit oder Bereitstellung von Positions- bzw. Korrekturwerten. Dabei muss der externe Bewegungsregler in definierten Zeitintervallen neue Positionspunkte oder Korrekturen bereitstellen, die das System innerhalb eines Intervalls erreichen kann. Andernfalls kann die Systemträgheit zu Abweichungen führen.

Positionskorrekturen können sensorgeführt mit Hilfe externer Sensorik erfolgen, wobei zwei etablierte Ansätze für diese Arbeit relevant sind: die kraftgeregelte Steuerung, die Kontaktkräfte auf einen gewünschten Wert regelt, und die visuelle Steuerung, die visuelle Messungen zur Korrektur von Positionsfehlern nutzt. KUKA bietet zwei Methoden für kraftbasierte sensorgeführte Bewegungen (KUKA.ForceTorqueControl [15]) an. In der ersten Methode bewegt sich der Roboter basierend auf Sensordaten, bis eine festgelegte Kraft oder ein bestimmtes Drehmoment erreicht ist. In der zweiten Methode folgt er einer programmierten Bahn und stellt gleichzeitig sicher, dass vorgegebene Kraft- und Drehmomentwerte eingehalten werden (überlagerte Kraft-Momenten-Regelung). Durch eine geschlossene Rückkopplungsschleife der Sensordaten, wie sie auch beim roboterbasierten Prüfstand verwendet wurde, können kontinuierlich variierende Sensorwerte gezielt auf einen gewünschten Sollwert geregelt werden.

2.4. Verwandte Arbeiten

Aus den in Kapitel 2.3 genannten Anwendungsfeldern wird ersichtlich, dass zerstörende Prüfverfahren bislang kein etabliertes Einsatzgebiet für Industrieroboter darstellen. Im folgenden werden robotergestützte und roboterbasierte Anwendungen gegeneinander abgegrenzt sowie der Stand der Technik vorgestellt.

Im Gegensatz zu robotergestützten Verfahren, bei denen Roboter den Prüfvorgang nur durch das Einlegen der Probe unterstützen, führen bei roboterbasierten Verfahren die Industrieroboter den gesamten Prüfprozess durch. Robotergestützte Verfahren sind in der Medizintechnik bereits weit verbreitet, z. B. bei der Untersuchung der Stabilität und der thermischen Alterung von Dentalklebstoffen [16]. Der Thermocycling-Prozess wird hier von einem Industrieroboter durchgeführt, der den Probenkorb (mit den zu prüfenden Zähnen) zyklisch in verschiedene Temperaturumgebungen eintaucht [16].

In der (industriellen) Fertigung spielen beide Ansätze, roboterbasiert oder robotergestützt, eine wichtige Rolle in der Automatisierung und Prozesskontrolle. Sie werden z. B. zur Verbesserung der Oberflächenqualität beim Fräsen durch Kompensation der auftretenden Schnittkräfte (roboterbasiert) [17] oder zur Überprüfung der Toleranz und Qualität von Widerstandspunktschweißungen (robotergestützt) [18] eingesetzt. Eine weitere Anwendung der roboterbasierten oder robotergestützten Prüfung ist der Bereich der zerstörungsfreien Prüfung. Die völlig autonome, zerstörungsfreie Ultraschallprüfung komplexer, gekrümmter Werkstücke wird durch eine robotergestützte Bahnplanung ermöglicht [19]. Anspruchsvolle Aufgaben wie 3D-Szenenrekonstruktion, Zielerkennung und Bahnplanung können mit Hilfe von Bildverarbeitung und Robotik erfolgreich gelöst werden. Dies erhöht die Flexibilität, Zuverlässigkeit und Anpassungsfähigkeit von Robotern im Vergleich zu herkömmlichen manuellen Verfahren [20].

Im Rahmen der roboterbasierten zerstörungsfreien Prüfung fassen Mineo et al. [21] weitere Ansätze für die prozessbegleitende Prüfung in Fertigungsanwendungen (Roboter-Drahtschweißen und additive Fertigung), echtzeit- und datengesteuerte roboterbasierte Sensorik sowie mobile Roboterplattformen zusammen.

Auch Ansätze zur robotergestützten mechanischen Bauteilprüfung sind kommerziell verfügbar. Ein Beispiel ist das automatisierte Testsystem roboTest R der ZwickRoell GmbH & Co. KG [22]. Die Probenmontage und -demontage, die Prüfung und der Abtransport der Probenreste erfolgen vollautomatisch durch Industrieroboter. Der roboTest R ist allerdings nur für die klassischen Prüfungen wie Zug-, Druck-, Biege- und Kerbschlagbiegeversuche und für die typischen genormten Proben ausgelegt. Für komplexere Bauteile und überlagerte Lasten ist dieser Prüfaufbau nicht vorgesehen.

Der Nachteil der robotergestützten mechanischen Prüfung ist in der Regel die Notwendigkeit einer zusätzlichen Ausrüstung, wie z. B. einer Universalprüfmaschine oder eines Prüf-

standes. Beispielsweise wird bei der Probenhandhabung das Potenzial des Industrieroboters nicht ausgeschöpft, es sei denn, es handelt sich um eine Schlüsselaufgabe, die wiederholt durchgeführt wird und somit zu einem höheren Probendurchsatz führt. Um den wirtschaftlichen Einsatz von Robotern in der mechanischen Prüfung zu optimieren, sollte eine größere Flexibilität sowohl bei der Lastaufbringung als auch bei Form und Größe der Prüflinge oder Bauteile erreicht werden.

Für relativ komplexe Belastungsfälle wurden spezielle Prüfstände entwickelt. Ein System (OccuBot) der KUKA AG setzt Industrieroboter für roboterbasierte Tests von Fahrzeug- und Flugzeugsitzen ein [23]. Das von Beeh et al. untersuchte Testsystem verwendet OccuBots für Sitztests und kompensiert die statischen Kräfte, die durch das Gewicht des Dummys entstehen [24, 25]. Ein alternativer Ansatz für roboterbasierte zerstörende Prüfungen wurde unter Verwendung eines Hexapods (Stewart-Plattform) anstelle eines sechsachsigen Industrieroboters vorgeschlagen. Die Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH) erforscht beispielsweise die dynamische Prüfung von Flugzeugküchen unter realistischen Bedingungen [26]. Eine weitere Anwendung der Stewart-Plattform als Prüfmaschine ist ein Zug-Scher-Versuch an einer gekerbten Betonprobe (Nooru-Mohamed-Versuch) [27]. Auch in der Medizintechnik spielt die Abbildung realistischer Belastungsfälle eine wichtige Rolle. Bei roboterbasierten Versuchen werden menschliche Bewegungen, wie z. B. Kauen [28], mit Hilfe einer Stewart-Plattform oder die Bewegungen des Kniegelenks [29] mit einem Industrieroboter simuliert. Alle genannten Anwendungen sind jedoch auf einen bestimmten Lastfall und einen bestimmten Prüflingstyp ausgelegt.

Die bisherige Forschung zeigt, dass die roboterbasierte zerstörende Prüfung nach wie vor ein weitgehend unerforschtes Gebiet darstellt. Bestehende Anwendungen sind entweder auf spezifische Prüfverfahren mit vordefinierten Prüfobjekten beschränkt oder basieren auf Hexapod-Systemen, die für ganz bestimmte multiaxiale oder dynamische Belastungsfälle eingesetzt werden. Die Nutzung eines sechsachsigen Knickarmroboters für die Materialcharakterisierung und mechanische Prüfung von Komponenten stellt hingegen eine innovative Entwicklung in der Forschung dar.

Eine weitere Besonderheit der vorliegenden Arbeit ist die Integration einer Closed-Loop-Regelung mit externer Sensorik, die eine adaptive Anpassung der Roboterbewegung an das Materialverhalten ermöglicht. In der Arbeit M. Poncelet [30] wurde ein Hexapod für die multiaxiale Materialprüfung eingesetzt, insbesondere für den Nooru-Mohamed-Test, bei dem Betonproben unter kombiniertem Schub- und Zugversagen getestet wurden. Die Steuerung des Hexapods erfolgte dabei ausschließlich positionsgeregt über seine interne Aktuator-Sensorik, während Digital Image Correlation (DIC) zur nachträglichen Validierung der Prüfergebnisse verwendet wurde. Es wurde jedoch kein geschlossener Regelkreis mit DIC implementiert, sodass die eventuell auftretenden Bewegungsabweichungen des Hexapods nicht aktiv während des Experiments korrigiert werden konnten. [30]

J. Le Flohic et al. entwickelten eine ähnliche 6DOF-Testmaschine, bei der DIC ebenfalls zur Erfassung der tatsächlichen Bewegungen und Deformationen eingesetzt wurde. Die Validierung der Hexapod-Bewegungen erfolgte durch den Vergleich von DIC-Messwerten mit LVDT- (Linear Variable Differential Transformer) und Extensometer-Daten, wobei eine Genauigkeit im Mikrometerbereich erzielt wurde [31]. Während DIC hier als präzises Messmittel diente, wurde es auch in dieser Arbeit nicht zur aktiven Regelung des Prüfstandes verwendet. Die erzielten Ergebnisse bestätigten jedoch, dass ein Hexapod mechanische Prüfungen mit hoher Präzision durchführen kann, wobei jedoch mechanisches Spiel in den Gelenken zu Hystereeffekten von wenigen Mikrometern führte [31].

Im Gegensatz dazu entwickelten X. Fayolle et al. mit CORRELICONTROL eine tatsächlich dehnungsgeregelte Closed-Loop-Steuerung für eine Prüfmaschine, die auf der direkten Rückkopplung von DIC-Messwerten basiert [32]. Aufgrund des umfangreichen Bildverarbeitungsaufwands und der vergleichsweise langen Bildspeicherzeiten lag die Gesamtfrequenz der DIC-basierten Rückkopplung bei etwa 0,15 Hz. Zur Kompensation der dadurch bedingten niedrigen Aktualisierungsrate wurde eine zweistufige Regelung implementiert: Ein schneller innerer Regelkreis für die Wegsteuerung, realisiert über eine kabelgebundene Ansteuerung der Prüfmaschine, sowie ein langsamer äußerer Regelkreis, der die Dehnung basierend auf DIC-Daten nachsteuert. Diese Regelstrategie ermöglichte eine exakte Anpassung der Prüfbewegung an das Dehnungsverhalten der Probe und erwies sich als zuverlässig sowohl im elastischen als auch im plastischen Bereich. Die erreichte Dehnungsunsicherheit der DIC-Methode war dabei lediglich etwa doppelt so groß wie die der Dehnungsmessstreifen, was die hohe Präzision von DIC in dieser Anwendung verdeutlichte. [32]

Die Arbeiten von J. Le Flohic et al. und M. Poncelet et al. zeigten somit, dass DIC ein leistungsfähiges Werkzeug zur Validierung mechanischer Prüfungen ist, jedoch bislang nicht in geschlossene Regelkreise für Hexapod-Steuerungen integriert wurde. Die Forschung von X. Fayolle et al. hingegen demonstrierte, dass eine DIC-gestützte Dehnungsregelung prinzipiell umsetzbar ist, jedoch im Jahr 2007 relativ langen Rechenzeiten von DIC-Systemen vorherrschten und somit Optimierungsbedarf hinsichtlich der Regelgeschwindigkeit bestand. Die in dieser Arbeit entwickelte roboterbasierte zerstörende Komponentenprüfung stellt daher einen neuen Ansatz in der Industrierobotik dar, indem sie die Flexibilität eines Industrieroboters mit einer externen sensorbasierten Echtzeitregelung kombiniert. Durch die direkte Closed-Loop-Regelung eines Knickarmroboters über externe Sensorik wird es möglich, die Prüfbewegung aktiv an das reale Materialverhalten anzupassen, ein Aspekt, der in bisherigen Arbeiten nicht realisiert wurde. Dies eröffnet neue Forschungs- und Anwendungsmöglichkeiten in der mechanischen Prüfung komplexer Bauteile.

3. Aufbau und Methodik des roboterbasierten Prüfstandes

Der neu entwickelte roboterbasierte Prüfstand sowie einige der in dieser Arbeit erzielten Forschungsergebnisse entstanden im Rahmen des Forschungsprojekts WiR Augsburg (Wissenstransfer Region Augsburg), das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Bayerischen Staatsregierung gefördert wurde. In diesem Projekt wurde gemeinsam mit dem Institut für Software & Systems Engineering (ISSE) der Universität Augsburg an der Entwicklung des roboterbasierten Prüfstandes geforscht. Darüber hinaus wurden einige der Versuche in Kooperation mit Dr. Julian Hanke und Dr. Christian Eymüller durchgeführt, und die Ergebnisse gemeinsam im Kontext der jeweiligen Fachdomäne genutzt. Dabei sind im Rahmen einer wechselseitigen Co-Autorenschaft Veröffentlichungen [33, 34, 35, 36] entstanden, auf die in diesem Kapitel und Kapitel 4 Bezug genommen wird.

In diesem Kapitel werden zunächst die festgelegten Anforderungen und potenziellen Einsatzbereiche des Prüfstandes detailliert beschrieben. Anschließend folgt ein umfassender Überblick über die Anlage, wobei die eingesetzte Hardware, einschließlich Sensorik und Aktorik, im Detail erläutert wird. Weiterhin wird ein Prüfablauf und ein standardisierter, roboterbasierter Prüfprozess vorgestellt und die möglichen Prüfbewegungen beschrieben. Des Weiteren wird die Validierung des Kraftmodells KUKAForceISO sowie die flexible Testvorrichtung genauer beleuchtet. Abschließend wird der Versuchsaufbau für jeden der insgesamt vier Anwendungsfall erläutert.

3.1. Anforderungen, Herausforderungen und Einsatzbereiche	30
3.2. Aufbau des roboterbasierten Prüfstandes	32
3.3. Standardisierter roboterbasierter Prüfprozess	40
3.4. Prüfablauf	42
3.5. Validierung Kraftmodell KukaForceISO	43
3.6. Flexible Prüfvorrichtung	46
3.7. Versuchsaufbau der Anwendungsfälle	49

3.1. Anforderungen, Herausforderungen und Einsatzbereiche

Es gibt eine Vielzahl an Anforderungen, die an einen Prüfstand gestellt werden. Diese hängen sehr vom Ziel der Prüfung ab. Im Folgenden werden die wichtigsten Anforderungen aufgezählt, die an einen flexiblen mechanischen Prüfstand gestellt werden:

- Möglichst hohe Kräfte (circa 100 kN) und Drehmomente
- Hohe Flexibilität in der Art und Weise der Lasteinleitung
- Generierung komplexer Spannungszustände
- Abprüfen eines Lastenheftes (Abprüfen verschiedener Lastszenarios an einem Bauteil ohne Umspannen)
- Hohe absolute Genauigkeit bei der Positionierung
- Einstellen genau definierter Spannungszustände
- Flexibilität bezüglich des Prüfobjektes (Größe, Geometrie, Material)
- Flexible Einspannmöglichkeit des Prüfobjektes
- Flexible Prüfvorrichtung
- Sensorik zur Erfassung relevanter Parameter wie Kraft, Drehmoment, Weg und Dehnung während der Prüfung
- Datenaggregation:
 - Synchronisierter Datenstrom: Integration von Aktor- und Sensordaten
 - Datenmanagement: Speicherung und Synchronisierung
 - Datenanalyse: Auswertung der aggregierten Daten
- Sicherheit:
 - Automatische Abschaltung bei Überbelastung
 - Not-Halt-Verkettung
- Bedienbarkeit durch eingelerntes Fachpersonal
- Modularer Aufbau zur einfachen Erweiterung des Prüfstandes
- Möglichkeit zur Automatisierung

Viele der Anforderungen zielen auf eine Maximierung der Flexibilität ab. Eine vielversprechende Lösung zur Erfüllung dieser Anforderungen liegt in der Kombination von Robotik und Prüftechnik. Wie bereits in Kapitel 2.4 erläutert, existieren verschiedene Ansätze zur Prüfung eines Prüfobjekts mittels Robotik. Häufig wird dabei jedoch ein spezifisches Prüfobjekt oder ein bestimmter Lastfall untersucht, wie beispielsweise Ermüdungsversuche an einer Flugzeugküche mit einem Hexapod [37]. Die roboterbasierte Prüftechnik mittels Industrieroboter bietet den entscheidenden Vorteil, dass sechs Freiheitsgrade im Raum genutzt werden können, wodurch der Roboter flexibel am Bauteil positioniert werden kann und die Krafteinleitung während der Prüfung ebenfalls flexibel gestaltet werden kann.

Trotz dieser Vorteile bringt die Implementierung der roboterbasierten Prüftechnik auch eine Reihe von Herausforderungen mit sich, die für den erfolgreichen Einsatz überwunden werden müssen. Wie bereits in [33, 34] beschrieben, erfordert der gesamte Prüfaufbau die Bewältigung folgender zentraler Herausforderungen:

- Industrieroboter sind in der Regel nicht für die niedrigen Geschwindigkeiten ausgelegt, die für die Materialprüfung erforderlich sind.
- Dem dynamischen Modell des Industrieroboters fehlt die absolute Positionierung, wenn das System zusätzlich externen Lasten ausgesetzt ist.
- Während der Prüfung können Querkräfte oder überlagerte Drehmomente auftreten, die aus Abweichungen von der geplanten Prüfbewegung resultieren oder durch ungeplantes Materialverhalten.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurden die Testbewegungen durch externe Sensorik (sensorgeführt) angepasst. Diese Lösung umfasst eine intensive Nutzung von Sensorik und eine Rückkopplung der Sensordaten in die roboterbasierte Prüfbewegung (geschlossener Regelkreis).

Die potenziellen Einsatzgebiete sind vielfältig. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der mechanischen Prüfung im quasistatischen Bereich. Als Anwendungsbeispiele wurden Zugproben, eine Komponente aus der Automobilindustrie sowie zwei Sportgeräte getestet. Einschränkungen im Einsatzbereich ergeben sich aufgrund der maximal aufbringbaren Kraft von 30 kN und des maximalen Drehmoments von 5,4 kNm. Außerdem darf das Bauteil nicht die Größe des Spannungsfeldes (7 m x 2,5 m) überschreiten. Besonders prädestiniert ist die roboterbasierte Prüftechnik, wenn komplexe Lastpfade oder realistische Nachbildungen realer Bewegungsabläufe gefordert sind. Auch stark individualisierte Produkte, wie Prothesen oder Orthesen aus der Medizintechnik, sowie additiv gefertigte Komponenten eignen sich hervorragend, da der roboterbasierte Prüfstand schnell und flexibel auf neue Komponenten und individualisierte Produkte umgerüstet werden kann. Komponenten aus der Serienfertigung profitieren ebenfalls von diesem Ansatz, da das System ein hohes Automatisierungspotenzial bietet.

3.2. Aufbau des roboterbasierten Prüfstandes

3.2.1. Überblick

Der Aufbau des roboterbasierten Prüfstandes mit Schwerpunkt auf der verwendeten Sensorik und Aktorik wird im Folgenden genauer beschrieben. Eine Übersicht des Systems ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Der prinzipielle Aufbau der Roboteranlage ist als technische Zeichnung in der Anlage A.1 dargestellt und besteht im Wesentlichen aus den nachfolgend näher beschriebenen Teilkomponenten.

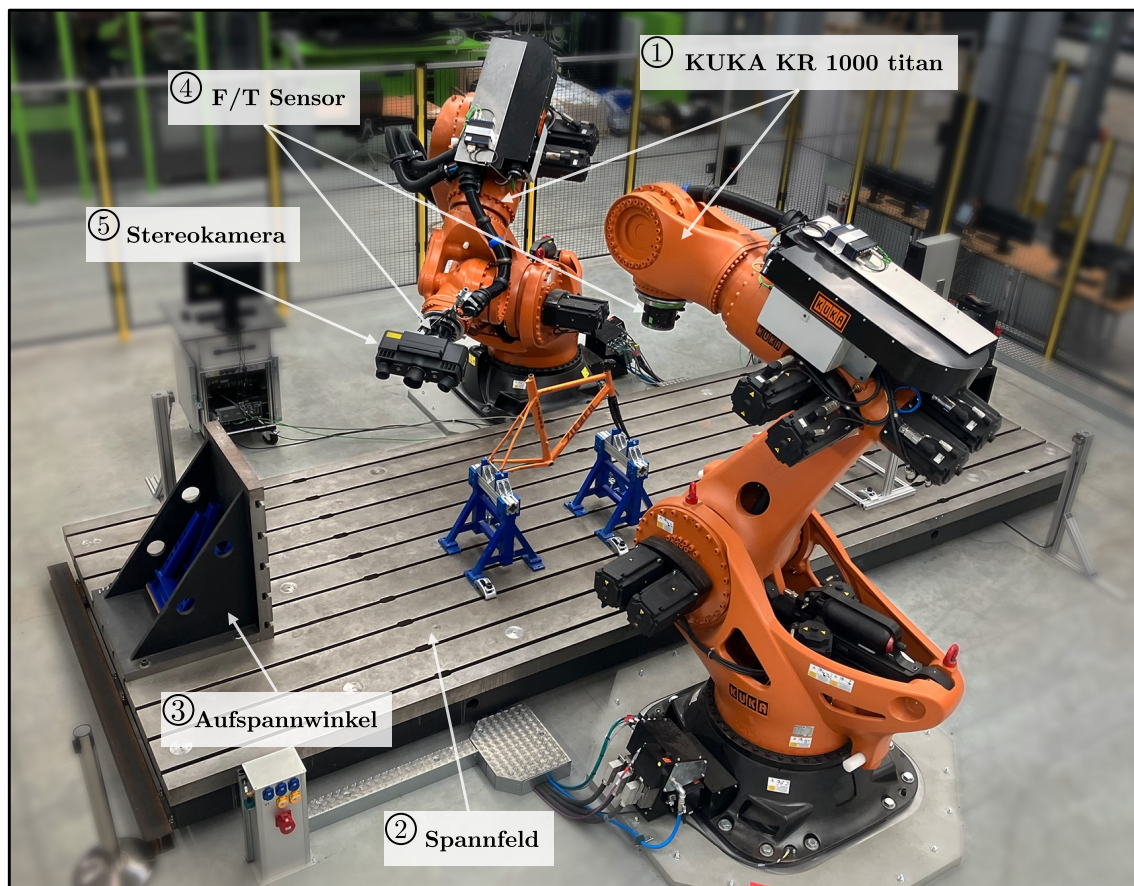


Abbildung 3.1.: Aufbau der roboterbasierten Komponentenprüfung mit zwei sechssachsigen Industrierobotern, einem Spannfeld und einem Aufspannwinkel zum flexiblen Positionieren und Spannen von Prüfobjekten. Zudem ist die integrierte Sensorik dargestellt, einschließlich einer Stereokamera und zwei Kraft-/Drehmomentsensoren (F/T-Sensoren). [36]

Die Basis bildet ein Spannfeld, siehe Nummer ② in Abbildung 3.1, mit den Abmessungen 7 m x 2,5 m x 0,3 m (Länge x Breite x Höhe). Dieses Spannfeld verfügt über integrierte T-Nuten über die gesamte Länge, in denen die Prüfobjekte mit Hilfe von Spannbacken befestigt werden können. Für die Fixierung von Proben und Bauteilen auf dem Spannfeld kommen konventionelle Aufspannvorrichtungen, wie z. B. Spannwinkel, zum Einsatz (siehe Nummer ③)

in Abbildung 3.1). Dadurch wird eine sehr flexible Befestigung von Komponenten an verschiedenen Positionen und in unterschiedlichen Ausrichtungen ermöglicht.

Die beiden KR 1000 titan Roboter, entwickelt von der KUKA AG, bilden die Kernkomponente des Prüfstandes (siehe Nummer ① in Abbildung 3.1). Diese sechsachsigen Industrieroboter zeichnen sich durch eine Traglast von jeweils 1000 kg und eine hohe Positionswiederholgenauigkeit von $\pm 0,1$ mm [38] aus, was sie besonders für Schwerlastanwendungen prädestiniert [39]. Beide Roboter werden jeweils von einem KUKA KR C4 Controller gesteuert und sind gegenüberliegend um das Spannungsfeld angeordnet. Darüber hinaus sind beide Roboter mit einem sechsachsigen Kraft-/Drehmomentsensor (Typ: K6D175 von ME-Messsysteme, Messbereich 50 kN/5 kNm, Genauigkeitsklasse 0,5 %), siehe Nummer ④ in Abbildung 3.1, nachfolgend als F/T Sensor bezeichnet, und einem Messverstärker (Typ: GSV-8DS EC/SubD44H von ME-Messsysteme) ausgestattet.

Zusätzlich ist ein optisches Messsystem (Typ: ATOS 5, Carl Zeiss GOM Metrology GmbH) in den Prüfstand integriert. Dieses dient zur optischen Verfolgung von Markern und kann als 3D-Extensometer sowie als digitales Bildkorrelationssystem für 3D-Vollfeld Dehnungsmessungen eingesetzt werden (siehe Nummer ⑤ in Abbildung 3.1).

Ein Linearprüfzylinder (Typ: EZ100 von ZwickRoell, maximale Prüfkraft: 100 kN, Prüfhub: 400 mm) ist in den Prüfstand integriert, um zusätzliche Lasten auf das Prüfobjekt aufzubringen. Dieser kann flexibel auf dem Spannungsfeld verschraubt werden. Standardmäßig ist dieser Prüfzylinder lediglich mit einem einachsigen Kraftsensor ausgestattet. Um Kräfte und Drehmomente in alle Raumrichtungen messen zu können, ist der Linearprüfzylinder mit einem sechsachsigen Kraft-/Drehmomentsensor (Typ: K6D225 von ME-Messsysteme, Messbereich: 100 kN/15 kNm, Genauigkeitsklasse: 0,2 %) ausgestattet.

Die Roboterzelle ist zusätzlich mit einem Netzwerkschrank der Firma Rittal GmbH & Co. KG ausgestattet, der alle notwendigen Komponenten zur reibungslosen Kommunikation zwischen den Sensoren und Aktoren des roboterbasierten Prüfstandes beherbergt. In einem typischen Netzwerkschrank finden sich neben der Netzwerktechnik, wie Switches und Router, auch Spannungsversorgungen, USV-Systeme (unterbrechungsfreie Stromversorgung), sowie Sicherungen und Verkabelungen. In diesem speziellen Fall sind zudem zwei IPCs (Industrie Personal Computer) vom Typ Automation PC 910 der Firma B&R Industrie-Elektronik GmbH für die Steuerung und Datenspeicherung verbaut. Diese IPCs sind mit leistungsstarken Intel Core i7-3615QE Quad-Core CPUs mit 2,30 GHz ausgestattet und verfügen über Intel i210-Netzwerkarten, die eine schnelle Anbindung an das Netzwerk mit einer Datenrate von 1 Gbit/s gewährleisten. Die Rechner sind für den Echtzeitbetrieb optimiert und laufen unter einem Preempt-RT Linux Kernel, der eine präzise Steuerung und Verarbeitung der Echtzeitdaten aus der Roboterzelle ermöglicht.

Die Kombination dieser Elemente gewährleistet eine flexible, umfassende und präzise Prüfung von Bauteilen unter verschiedenen Bedingungen.

3.2.2. Aktorik

Die Bewältigung der zuvor beschriebenen Herausforderungen erfordert die Integration zusätzlicher Sensoren und Aktoren sowie die Implementierung adaptiver Steuerungsstrategien. Diese Maßnahmen sind entscheidend, um den Anforderungen an Flexibilität, Reproduzierbarkeit, niedrigen Geschwindigkeiten, hoher Präzision und dem Handling hoher Lasten gerecht zu werden. Insbesondere für die Materialcharakterisierung, die präzise Bewegungsausführung sowie Anpassung von Bewegungen unter Last wurden entsprechende Systeme in das Prüfsetup integriert, die im Folgenden näher erläutert werden.

Die Positionierung der beiden Industrieroboter in Bezug auf das Spannfeld ist von zentraler Bedeutung, da sie eine präzise Einleitung von Kräften und Drehmomenten in unterschiedlichen Bereichen des Spannfeldes ermöglicht. Der Umzug der Roboterzelle im Sommer 2023 wurde genutzt, um den Abstand der Roboter zum Spannfeld zu verringern, und damit sowohl einen größeren gemeinsamen Arbeitsbereich zu schaffen als auch höhere Kräfte und Drehmomente effizienter in das Prüfobjekt einleiten zu können. Dies wurde erreicht, indem die Roboter näher am Prüfobjekt positioniert wurden, wodurch sich der Hebelarm verkürzt. Die maximale Reichweite eines KR 1000 titan Roboters beträgt 3202 mm [39].

In Abbildung 3.2 wird der mögliche Arbeitsbereich der Roboter, einschließlich des gemeinsamen Arbeitsbereichs (grün markiert), in einer Draufsicht dargestellt. Die Roboter sind jeweils 1000 mm vom Spannfeld entfernt und stehen insgesamt 4500 mm auseinander. Zusätzlich sind sie seitlich um jeweils 3000 mm von den Rändern des Spannfeldes versetzt, um eine optimale Abdeckung zu gewährleisten. Um den gesamten Arbeitsraum der Roboter auszunutzen, sind sie um 90 ° zum Spannfeld und zueinander um 180 ° gedreht. Diese Darstellung gibt einen ersten Hinweis auf die maximal zu prüfende Bauteilgröße. Bei sehr kleinen Bauteilen besteht das Risiko, dass die Roboter sich gegenseitig behindern, während sehr große Bauteile unter Umständen die Reichweite der Roboter oder die Spannmöglichkeiten des Spannfeldes überschreiten.

Um den Anforderungen an Flexibilität und hohen Lasten noch besser gerecht zu werden, wurde der Prüfstand um einen linearen Prüfzylinder des Typs EZ100 von ZwickRoell sowie einen Gegenwinkel zur axialen Krafteinleitung erweitert. Diese beiden Komponenten können flexibel an jeder beliebigen Position des Spannfeldes montiert werden. Der lineare Prüfzylinder ermöglicht es, zusätzliche Grundlasten oder Spannungszustände auf die zu prüfenden Bauteile aufzubringen. Er eignet sich sowohl für Zug- als auch für Druckbelastungen bis zu 100 kN und kann dabei Geschwindigkeiten zwischen 0,001 und 1400 mm/min erreichen. Die Positioniergenauigkeit des Zylinders mit Richtungsumkehr beträgt $\pm 0,014 \mu\text{m}$.

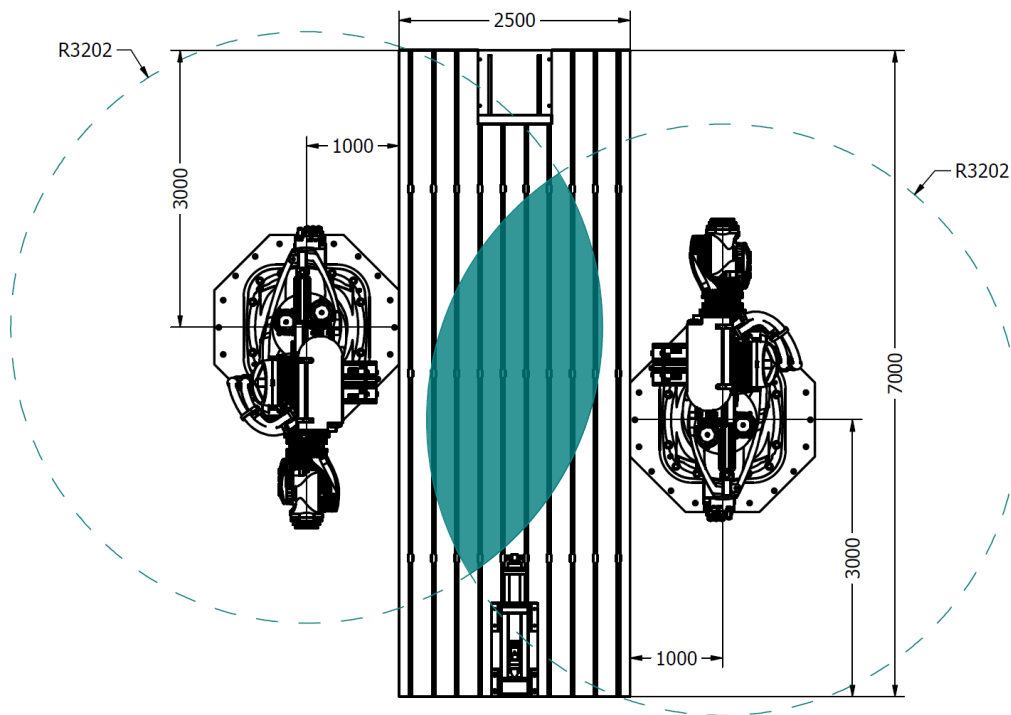


Abbildung 3.2.: Platzierung der Roboter relativ zum Spannfeld und gemeinsamer Arbeitsbereich des entwickelten roboterbasierten Prüfstandes. Angabe der Maße in Millimeter.

Der Arbeitsbereich des Prüfzylinders wird sowohl durch seine Position auf dem Spannfeld als auch durch den maximalen Kolbenhub von 400 mm festgelegt. Aufgrund seines mechanischen Aufbaus zeigt der Prüfzylinder eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Querkräften. Bei Überschreiten der maximal zulässigen Querkraft abhängig vom Hub reduziert sich die Lebensdauer des Prüfzylinders. Bei einem maximalen Hub von 400 mm beträgt die maximal zulässige Querkraft 2,5 kN. Im vollständig eingefahrenen Zustand (Hub von 0 mm) kann eine maximale Querkraft von bis zu 12 kN aufgenommen werden. Die Steuerung und der Betrieb erfolgen über die Software testXpert III von ZwickRoell. Über die angebotene Telnet-Schnittstelle (Teletype Network Protocol)¹ besteht die Möglichkeit, den Prüfzylinder in die übergeordnete Steuerung einzubinden und in den Regelkreis zu integrieren. In dieser Arbeit wurde jedoch auf eine Anbindung an das zentrale Steuerungssystem verzichtet, sodass der Prüfzylinder manuell über die testXpert-Software bedient wurde.

3.2.3. Sensorik

Sowohl für die Materialcharakterisierung, etwa zur Bestimmung von Spannungen und Dehnungen, als auch für die Bewegungsregelung des Roboters, wie bei der Kraftregelung, ist es

¹Telnet ist ein Netzwerkprotokoll, das für Remote-Terminal-Verbindungen genutzt wird, um über ein Ethernet-basiertes Netzwerk mit Geräten zu kommunizieren.

notwendig, die anliegenden Kräfte und Drehmomente präzise zu erfassen. Da die verwendeten Industrieroboter über sechs Freiheitsgrade verfügen, kommen sechssachsige Kraft-/ Drehmomentsensoren zum Einsatz. Der K6D175-Sensor des Herstellers ME-Messsysteme wurde über eine Adapterplatte (siehe technische Zeichnung im Anhang A.2) aus Edelstahl direkt am Flansch des Roboters montiert, sodass die z-Richtung des Sensors die Stoßrichtung im Werkzeugkoordinatensystem des Roboters darstellt (siehe Abbildung 3.3). Das rechtshändige Sensorkoordinatensystem wird zur Verdeutlichung in Abbildung 3.3 dargestellt.

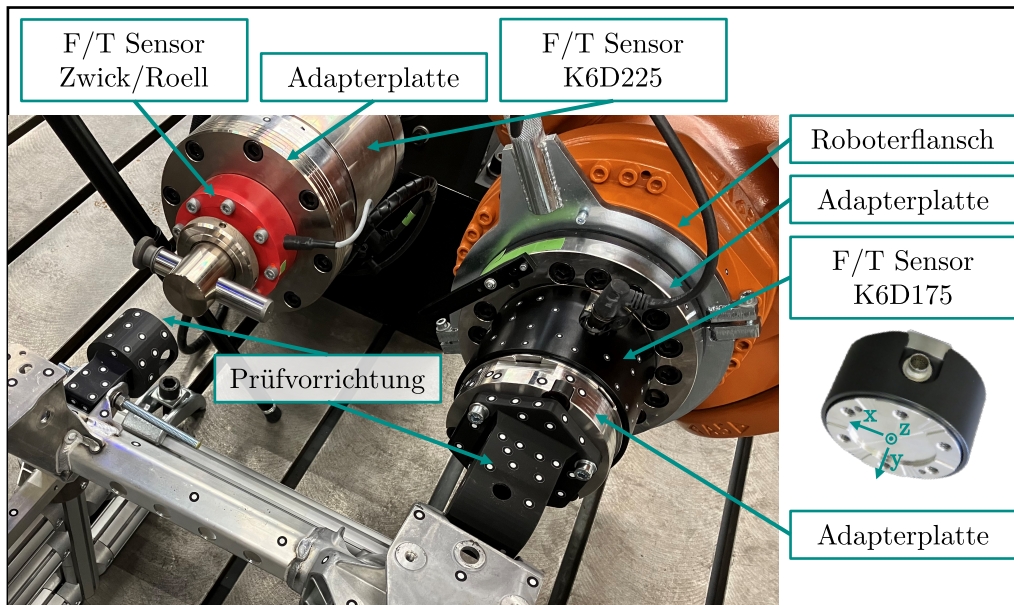


Abbildung 3.3.: Montage Kraft-/Drehmomenten Sensor inklusive zugehörigem Sensorkoordinatensystem.

Der Sensor mit einer Genauigkeitsklasse von 0,5 % kann Kräfte bis zu ± 100 kN in z-Richtung und Kräfte in x- und y-Richtung bis zu ± 50 kN zu messen. Darüber hinaus ist es möglich, Drehmomente bis zu 10 kNm in z-Richtung und Drehmomente bis zu 5 kNm in x- und y-Richtung messen. An die Sensoren können über eine weitere Adapterplatte verschiedene Prüfvorrichtungen (siehe Abbildung 3.3) oder auch optische Messsysteme, wie das ATOS 5, angebracht werden. Die Sensoren sind mit dem Messverstärker GSV-8DS EC/SubD44H verbunden, der die elektrischen Signale verstärkt und für die Weiterverarbeitung aufbereitet. Diese werden mit einer Messfrequenz von 250 Hz über eine EtherCAT-Schnittstelle (Ethernet for Control Automation Technology) zur Verfügung gestellt.

Die Regelung der Roboterbewegungen erfolgt ebenfalls auf Grundlage der durch den Kraft-/ Drehmomentsensor gemessenen Werte. Hierbei werden die aktuellen Kraft- und Drehmomentdaten in Echtzeit genutzt, um den Roboter zu steuern und beispielsweise auftretende Querkräfte aktiv auszugleichen. Auf diese Weise kann der Roboter seine Bewegungen dynamisch an die gemessenen Kräfte anpassen, wodurch eine präzise Krafteinleitung und Stabilität während der Prüfung gewährleistet werden.

Neben der Messung von Kräften und Drehmomenten ist die Bestimmung der Verschiebungen und der daraus abgeleiteten Dehnungen im Prüfobjekt ein entscheidender Parameter für die Materialcharakterisierung. Das ATOS 5 System der Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, eine Stereokamera, liefert hochpräzise 3D-Messdaten. Es bietet zwei verschiedene Funktionen: Zum einen ermöglicht es vollflächige 3D-Scans, und zum anderen fungiert es als digitales Bildkorrelationssystem (DIC: Digital Image Correlation). Durch den Austausch von Objektiven können verschiedene Prüfobjekte in unterschiedlichen Größen ausgewertet werden. Es stehen drei verschiedene Objektive zur Verfügung, deren Spezifikationen wie das Messvolumen oder die Auflösung pro Pixel in Tabelle 3.1 aufgeführt sind. Für Bauteile wie beispielsweise einem Fahrradrahmen eignet sich das größte Objektiv MV1000 am besten, für Messungen auf Probengröße das kleinste Objektiv MV170. Diese Anpassungsfähigkeit gewährleistet eine optimale Integration in das flexible roboterbasierte Prüfstandskonzept und ermöglicht eine präzise Inspektion diverser Komponenten. Das ATOS 5 System wurde meistens in der Funktion als DIC-System verwendet und arbeitet mit der Software ARAMIS Professional, die zwei Optionen zur Datenverarbeitung während einer Prüfung bietet: Zum einen können die berechneten Werte, wie beispielsweise Punkte im Messraum, in eine lokale Protokolldatei geschrieben werden und in der Software direkt ausgewertet werden, zum anderen können die gemessenen Werte in Echtzeit über eine SCPI-Schnittstelle (Standard Commands for Programmable Instruments)² mit einer Abtastrate von 10 Hz abgerufen werden.

Diese Positionsdaten werden nicht nur zur Materialcharakterisierung verwendet, sondern auch zur exakten Steuerung der Roboterbewegungen (Positionsregelung). Die vom DIC-System erfassten Verschiebungsdaten werden über die SCPI-Schnittstelle an die RSI-Schnittstelle (Robot Sensor Interface)³ der KUKA-Roboter übertragen und in Echtzeit in die Bewegungsregelung integriert. Dies ermöglicht eine präzise Steuerung der Roboterbewegungen, basierend auf den tatsächlichen Verschiebungen des Prüfobjekts.

Bezeichnung	Name Kalibrierobjekt	Messvolumen [mm x mm x mm]	Referenzpunkt- größe [mm]	Auflösung pro Pixel (12M) [mm]	Arbeitsabstand (vorne) [mm]
MV 1000	CP40/MV1000	1000 x 750 x 750	5,0	0,236	880
MV 700	CP40/MV700	700 x 530 x 520	3,0	0,169	880
MV 170	CP40/MV170	170 x 130 x 130	0,8	0,048	880

Tabelle 3.1.: Vorhandene ATOS 5 Objektive: MV 1000, 700, 170, eigene Darstellung nach [40].

²Eine SCPI-Schnittstelle ist ein standardisiertes Kommunikationsprotokoll, das es ermöglicht, elektronische Messgeräte und Aktoren über textbasierte Befehle in Echtzeit zu steuern und deren Daten abzufragen.

³KUKA spezifische Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Industrieroboter und Sensorsystem

3.2.4. Regelungsarten

Üblicherweise werden die KUKA-Roboter in der Programmiersprache KUKA Robot Language (KRL) gesteuert. Diese ermöglicht die Ausführung von Bewegungsbefehlen, die Durchführung von Berechnungen, das Abfragen integrierter Sensoren sowie die Steuerung zusätzlicher Komponenten wie Endeffektoren oder Linearachsen. Allerdings ist KRL nur bedingt geeignet für komplexe, sensorgesteuerte Bewegungsabläufe. Eine direkte Regelung der Prüfbewegung über die interne Robotersteuerung ist möglich, berücksichtigt jedoch keine Positionsveränderungen des Roboters unter Last, da sie allein auf der Kinematik des Roboters basiert.

In Kapitel 3.1 wurden bereits die Herausforderungen des roboterbasierten Prüfstandes beschrieben. Eine Möglichkeit diesen Herausforderungen zu begegnen, besteht in der Nutzung externer Schnittstellen der Robotersteuerung. Hierfür wird die ethernetbasierte RSI-Schnittstelle eingesetzt – eine universelle Schnittstelle der KUKA AG zur Einbindung externer Sensorik, die Echtzeit-Datenübertragung zwischen Roboter und externen Systemen, wie z. B. Sensoren, ermöglicht [41]. RSI arbeitet mit einem Echtzeit-Verarbeitungszyklus und kann die Roboterbahn direkt beeinflussen, indem es Daten externer Systeme in einem Zyklus von 4 ms verarbeitet [41]. Dadurch können sensorgeführte Bewegungen realisiert werden. In diesem roboterbasierten Prüfstand werden mithilfe der in Kapitel 3.2.3 vorgestellten Sensorik zwei Arten sensorgeführter Bewegungen (siehe Abbildung 3.4) eingesetzt: Die Kraft- und Drehmomentregelung über einen Kraft-/Drehmomentsensor sowie die Positionsregelung über ein optisches 3D-Messsystem (DIC-System). Diese Regelungsarten lassen sich jederzeit erweitern, z. B. um eine dehnungsgeregelte Bewegung basierend auf einem DIC-System. Eine Übersicht über die verwendeten Regelungsarten für die roboterbasierte Prüfung ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

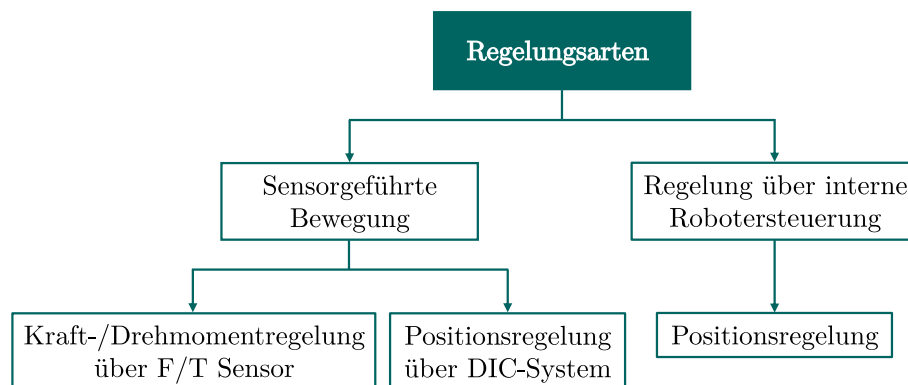


Abbildung 3.4.: Überblick über die verwendeten Regelungsarten bei der roboterbasierten Prüfung.

3.2.5. Datenfluss

Abbildung 3.5 zeigt schematisch den gesamten Datenfluss der Sensorik und Aktorik und deren Weiterverarbeitung. Die Kraftregelung erfolgt über den am Industrieroboter angebrachten Kraft-/Drehmomentsensor, der eine Messfrequenz von 250 Hz aufweist und seine Daten über eine EtherCAT-Schnittstelle zur Verfügung stellt. Die Sensordaten, in diesem Fall drei Kraftwerte (F_x, F_y, F_z) und drei Drehmomentwerte (T_x, T_y, T_z), werden an die Datenaggregation der zentralen Steuereinheit gesendet. Ähnlich funktioniert die Bahnsteuerung über das optische Messsystem. In diesem Fall werden die Relativverschiebungen (D_x, D_y, D_z) und Drehwinkel ($D_\alpha, D_\beta, D_\gamma$) zwischen der Prüfeinrichtung am Endeffektor des Industrieroboters und dem Bauteil über eine SCPI-Schnittstelle mit der maximalen Systemfrequenz von 10 Hz an die Datenaggregation gesendet. Gleichzeitig werden von allen Robotern alle 4 ms (entspricht 250 Hz) Positionsdaten über RSI an die Datenaggregation gesendet. Die Positionsdaten, die benötigt werden, um die Position eines Industrieroboters eindeutig zu definieren, sind wie folgt: Die Koordinaten (X, Y, Z), die Orientierung (A, B, C) sowie Status (S) und Turn (T). Status und Turn definieren eine eindeutige Achsposition aus mehreren möglichen Achspositionen für dieselbe Position (KUKA-spezifisch). Die Daten der oben genannten Erfassungssysteme werden mit unterschiedlichen Frequenzen aufgezeichnet. Daher wird ein synchronisierter Zeitstempel mit den Daten übertragen und gegebenenfalls durch lineare Extrapolation der Datenpunkte auf eine gemeinsame Frequenz von 250 Hz angepasst. Anschließend werden die Daten in einen Folgevektor umgewandelt, der Informationen über die Belastungsrichtung und die Prüfgeschwindigkeit enthält und an die Bewegungssteuerung übertragen wird, um eine bestimmte Bewegung des Roboters auszuführen. Durch die kontinuierliche Erfassung der Sensordaten kann die Bewegung alle 4 ms exakt nach den gewünschten Kriterien nachjustiert werden. Hierbei handelt es sich um einen geschlossenen Regelkreis, der einen Sollwert mit einem Istwert vergleicht. Auftretende Abweichungen werden in Echtzeit durch Anpassung der Roboterbewegung korrigiert. Diese Korrektur hat keinen Einfluss auf die Prüfgeschwindigkeit. Wie in [34, 33] beschrieben, stellt die Nachgiebigkeit der Industrieroboterkinematik eine zentrale Herausforderung für die präzise Vorhersage streng linearer Bewegungen in eine definierte Richtung dar. Ohne Korrektur durch externe Sensorik ist die erforderliche Bewegungsgenauigkeit für Bauteilprüfungen nicht gewährleistet, insbesondere wenn der Industrieroboter zusätzlich externen Lasten ausgesetzt ist, die im internen Kinematikmodell des Roboters nicht berücksichtigt werden. Der Einsatz sensorgestützter Prüfbewegungen ermöglicht die Erfassung und gezielte Kompensation dieser Einflüsse, sodass unerwünschte Querkräfte und Verschiebungen aktiv korrigiert werden können. Abschließend werden die aufgezeichneten Daten im Datenspeicher abgelegt, um sie für eine Offline-Auswertung weiter zu verwenden.

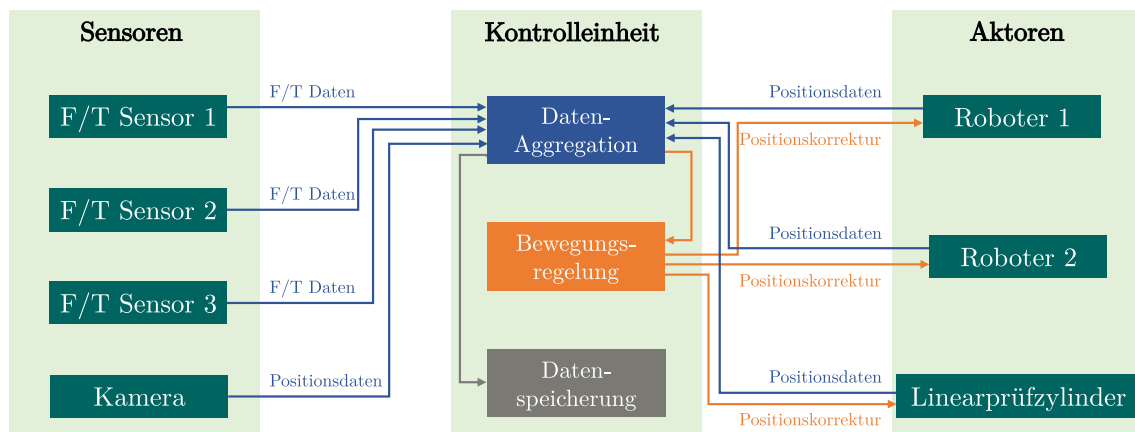


Abbildung 3.5.: Überblick über den Datenfluss und die Datenverarbeitung bei der roboterbasierten Komponentenprüfung. [36]

3.3. Standardisierter roboterbasierter Prüfprozess

In diesem Kapitel wird ein standardisiertes Konzept für den roboterbasierten Prüfprozess vorgestellt, das die Komplexität mechanischer Bauteilprüfungen überschaubar macht und gleichzeitig eine hohe Reproduzierbarkeit gewährleistet. Der Prozess orientiert sich an [33], legt jedoch einen besonderen Fokus auf die technische Umsetzung der Prüfverfahren und deren präzise Ausführung unter Einsatz des roboterbasierten Prüfstandes. Eine grafische Darstellung des gesamten Prozesses ist in Abbildung 3.6 zu sehen, und im Folgenden wird der Ablauf Schritt für Schritt erläutert.

Der Prüfprozess gliedert sich in drei Hauptphasen: Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung. In der ersten Phase, der Vorbereitung, werden die Grundlagen der Prüfung definiert, was die Festlegung der Ziele, Anforderungen und spezifischen Prüfparameter umfasst. Dies ist die arbeitsintensivste Phase, da hier alle wesentlichen Bedingungen und Parameter der Prüfung festgelegt werden. Die Durchführung bildet die zweite Phase, in der die eigentliche Bauteilprüfung erfolgt. In der abschließenden Phase, der Nachbereitung, steht die detaillierte Auswertung der erhobenen Messdaten im Vordergrund. Ein wesentlicher Bestandteil der Vorbereitung ist die Definition der Lastfälle, wobei Prüfbewegungen und -bedingungen spezifiziert werden. Dazu gehört eine umfassende Analyse des Prüfobjekts und seines Einsatzszenarios. Im Anschluss wird die erforderliche Sensorik und Aktorik ausgewählt. Zum Beispiel wird entschieden, ob eine Grundlast über den Linearprüfzylinder erforderlich ist oder ob zusätzliche Sensoren, wie etwa für Schallemissionsmessungen, integriert werden sollten. Daraufhin erfolgt die Entwicklung und Fertigung der Spannvorrichtungen, die das Prüfobjekt auf dem Spannungsfeld fixieren, sowie der Prüfvorrichtungen, die zwischen Roboterendeffektor und Prüfobjekt positioniert werden. Diese benötigen oft längere Vorlaufzeiten, weshalb die Planung frühzeitig beginnt.

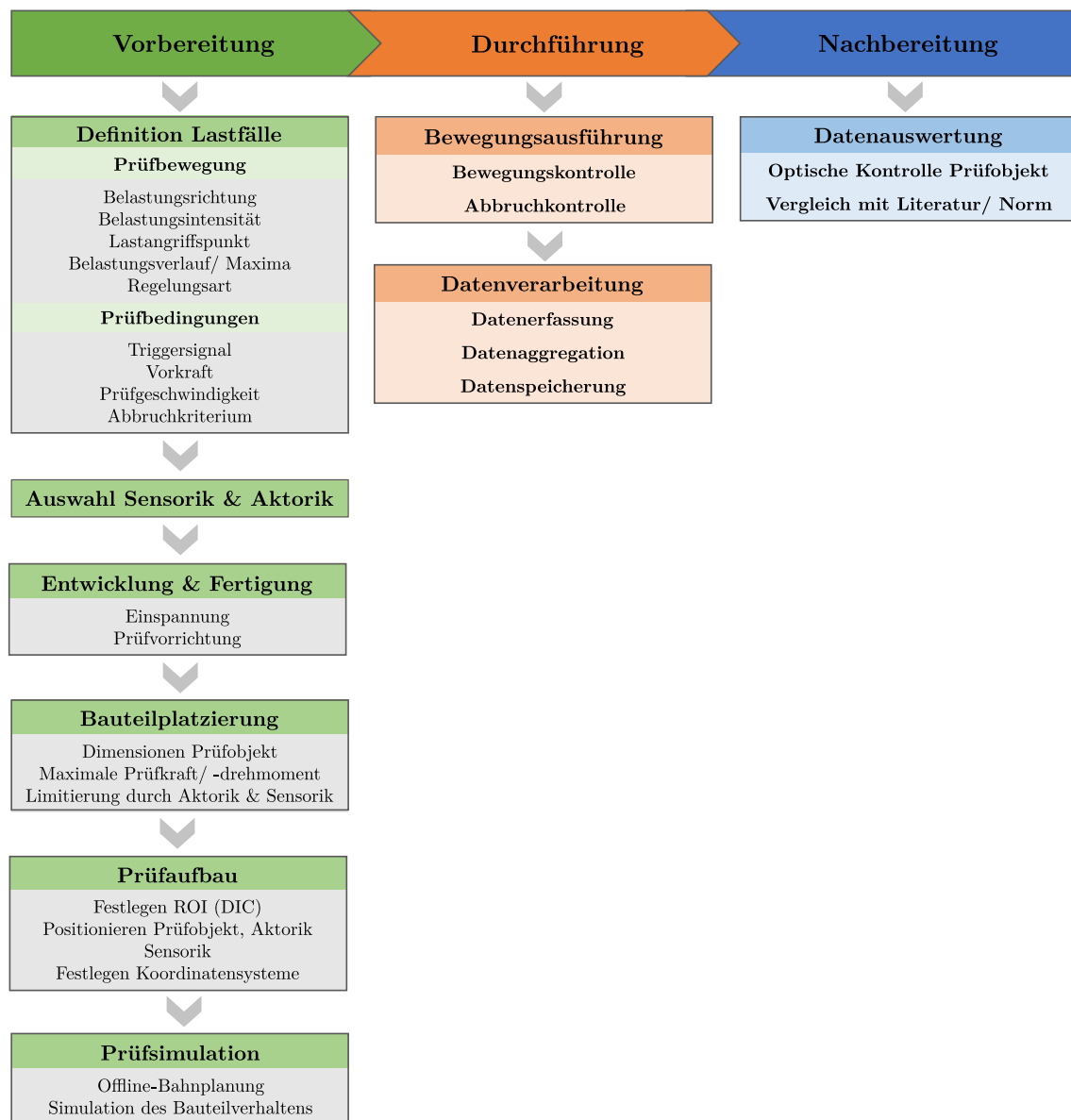


Abbildung 3.6.: Der standardisierte roboterbasierte Prüfprozess umfasst drei Phasen: Vorbereitung, Durchführung und Nachbearbeitung, in Anlehnung an [33].

Im nächsten Schritt wird die optimale Platzierung des Prüfobjekts auf dem Spannungsfeld festgelegt. Diese hängt sowohl von den Prüfobjektmaßen als auch von den für den Lastfall erforderlichen Kräften und Drehmomenten ab. Um einen geeigneten Prüfbereich in Abhängigkeit der während der Prüfung wirkenden Lasten zu bestimmen, kann das Kraftmodell KukaForceISO (siehe Kapitel 3.5) herangezogen werden. Grundsätzlich gilt, dass bei geringerem Abstand des Prüfobjektes zur Roboterbasis, also bei kleinerer Hebelwirkung, größere Lasten möglich sind. Weitere relevante Faktoren sind die Begrenzungen durch Aktorik und Sensorik, die Vermeidung möglicher Kollisionspunkte, die Einhaltung des maximalen Hubs des Linearprüfzylins-

ders sowie die Positionen der T-Nuten auf dem Spannungsfeld, da diese die möglichen Befestigungspositionen des Prüfobjekts bestimmen. Auch die Sensorik, wie das ATOS-System, das auf dem Roboter oder einem Stativ montiert wird, verlangt bestimmte Abstände zum Prüfobjekt und Konfigurationen. Nach Festlegung des Prüfaufbaus und der Region of Interest (ROI) für die digitale Bildkorrelation (DIC) wird das Prüfobjekt eingespannt, Aktorik und Sensorik entsprechend positioniert, und die Koordinatensysteme festgelegt. Optional kann eine Prüfungssimulation durchgeführt werden, die eine Offline-Bahnplanung sowie eine Simulation des Bauteilverhaltens vor der Durchführung der Prüfung umfasst.

Die zweite Phase, die Durchführung der Prüfung, umfasst die Bewegungsausführung inklusive Bewegungs- und Abbruchkontrolle zur Gewährleistung der Sicherheit. Gleichzeitig erfolgt die Datenverarbeitung, die alle Schritte von der Datenerfassung durch Sensoren und Aktoren über die Aggregation und Verarbeitung bis hin zur Datenspeicherung umfasst.

In der abschließenden Phase, der Nachbereitung, werden die aufgezeichneten Daten ausgewertet. Dazu gehört eine visuelle Kontrolle des Prüfobjekts, um das Versagensverhalten zu analysieren und die Beobachtungen mit den aufgezeichneten Daten zu vergleichen. Abschließend werden die Ergebnisse mit der einschlägigen Literatur und den entsprechenden Normen abgeglichen.

3.4. Prüfablauf

Ein typischer Ablauf der roboterbasierten Bauteilprüfung umfasst eine Anfahrbewegung, die eigentliche Prüfbewegung und eine abschließende Abfahrbewegung, basierend auf [33]. Abbildung 3.7 stellt den schematischen Ablauf eines solchen Prüfprozesses dar. Die Anfahrbewegung erfolgt positions- oder kontaktbasiert: Hier kann bereits eine Vorkraft – eine initiale Kraft vor Beginn der eigentlichen mechanischen Prüfung – aufgebracht werden, um das Prüfobjekt vorzuspannen oder ein möglicherweise bestehendes Spiel in der Einspannung zu beseitigen. Die Anfahrbewegung endet, sobald ein sicherer Kontakt mit dem Prüfobjekt hergestellt oder eine bestimmte Position erreicht ist.

Die anschließende Prüfbewegung wird durch verschiedene Parameter genau festgelegt. Die Belastungsrichtung, die eine der klassischen Beanspruchungsarten (siehe Abbildung 2.2) oder eine Kombination dieser beschreibt, kann während der Prüfung durch eine sensorgeführte Prüfbewegung an die Verformung des Prüfobjekts angepasst werden. Der Verlauf der Belastung kann im Vorfeld definiert oder durch sensorgeführte Bewegungen dynamisch während der Prüfung angepasst werden. Die Regelungsarten legen fest, wie die Prüfbewegung angesteuert und kontrolliert wird, wie in Abschnitt 3.2.4 erläutert. Der Lastangriffspunkt beschreibt den Punkt, an dem die Belastung in das Prüfobjekt eingeleitet wird, während die Belastungsintensität die Höhe der aufgebrachten Kräfte oder Drehmomente angibt.

Zusätzlich zur Prüfbewegung werden spezifische Prüfbedingungen festgelegt, darunter mechanische Prüfbedingungen wie die Prüfgeschwindigkeit (Weg pro Zeit), um beispielsweise den elastischen Bereich durch entsprechende Steuerbedingungen gezielt langsam zu durchfahren, ein Triggersignal für den Prüfstart, sowie Abbruchkriterien (beispielsweise ein Lastabfall um 80 %). Die Phase der Prüfbewegung endet mit dem Erreichen eines Abbruchkriteriums.

Die letzte Phase des Prüfablaufs, die Abfahrbewegung, ermöglicht es dem Roboter, den Prüfbereich sicher zu verlassen und sorgt so für eine kontrollierte Entlastung des Prüfobjekts.

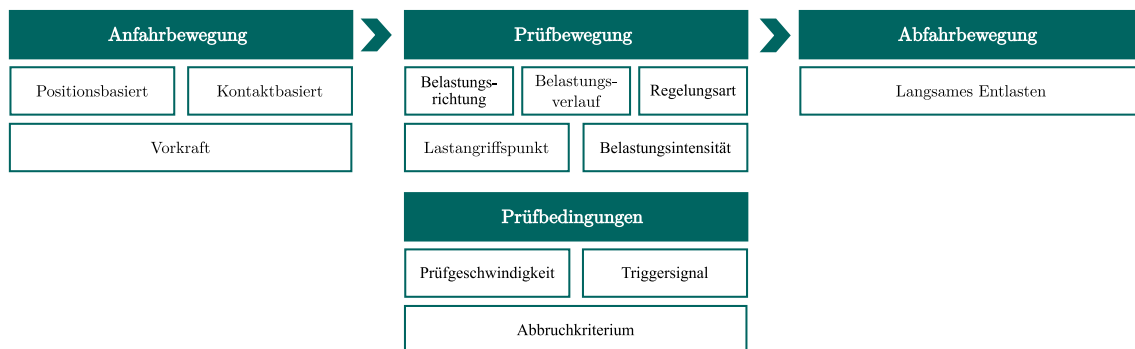


Abbildung 3.7.: Prüfablauf eines roboterbasierten Prüfprozesses mit den zugehörigen Prüfparametern und -bedingungen, aufgeteilt in eine Anfahrbewegung, die eigentliche Prüfbewegung und eine Abfahrbewegung, in Anlehnung an [36].

3.5. Validierung Kraftmodell KukaForceISO

Neben den Vorteilen, die Roboter für die Bauteilprüfung bieten, wie der höheren Flexibilität bei den Prüfobjekten und Lastfällen, ergibt sich durch ihren Einsatz eine zusätzliche Komplexität in der optimalen Positionierung der Prüfobjekte. Bei der Platzierung eines Bauteils müssen sowohl die Erreichbarkeit durch den Roboter als auch die am Endeffektor aufbringbare Kraft berücksichtigt werden. Zwar ist ein Roboter flexibler als ein Linearprüfzylinder, jedoch erreicht er nicht zwangsläufig jede Position auf dem Spannungsfeld, und auch bei erreichbaren Positionen kann nicht immer die maximale Kraft übertragen werden. Beispielsweise ist die Belastungsfähigkeit des Roboters bei vollständig gestrecktem Arm (maximaler Hebelarm) eingeschränkt. Zur Unterstützung der optimalen Positionierung entwickelten Filipenko et al. [42] die Software KukaForceISO, das die maximal anwendbaren Kräfte am Endeffektor des Roboters in Abhängigkeit von der spezifischen Roboterpose berechnet. Das statische Kraftanalysemodell nutzt die Jacobi-Matrix des Roboters und zielt darauf ab, die Beziehung zwischen den am Endeffektor erzeugten Kräften und den an den Gelenken wirkenden Drehmomenten in einer Gleichgewichtskonfiguration zu berechnen – eine Konfiguration, die für die Bauteilprüfung angenommen werden kann. Der Einfluss der Schwerkraft kann dabei die erreichbaren Kräfte am Endeffektor erhöhen oder verringern, abhängig von der Roboterpo-

se (z. B. führt ein Drücken nach unten zu einer Erhöhung der Kräfte durch das Gewicht des Roboters). Mithilfe dieser Gleichungen lässt sich die höchste erreichbare Kraft am Endeffektor bestimmen. Für die dynamische Berechnungen wird auf interne Parameter wie Getriebe- und Motordrehmomente zurückgegriffen, die über KUKA-spezifische Simulationsbibliotheken (insbesondere KUKA.load) generiert wurden. [42]

Da dieses theoretische Kräftemodell jedoch einer Validierung bedarf, sind experimentelle Tests erforderlich, um die Übereinstimmung der berechneten mit den tatsächlich erzielten Kräften zu überprüfen. Zur Validierung des Modells wurden experimentelle Tests an spezifischen Positionen durchgeführt, bei denen der Roboter definierte Kräfte auf geeignete Objekte aufbrachte. Die Versuchsaufbauten dieser Tests sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Zur präzisen Darstellung der Krafrichtung wurden für jedes Lastszenario ein gelbes Koordinatensystem und ein weiß/grüner Pfeil integriert. Dabei umfasst die Validierung drei spezifische Szenarien:

1. Druckversuch mit Kraftvektor in z-Richtung: Nach unten gerichteter Druck auf einen Stahl-T-Träger.
2. Druckversuch mit Kraftvektor in y-Richtung: Seitliches Drücken gegen einen Aufspannwinkel.
3. Zugversuch mit Kraftvektor in negativer z-Richtung: Ziehen an einer Zugprobe aus carbonfaserverstärktem Kunststoff.

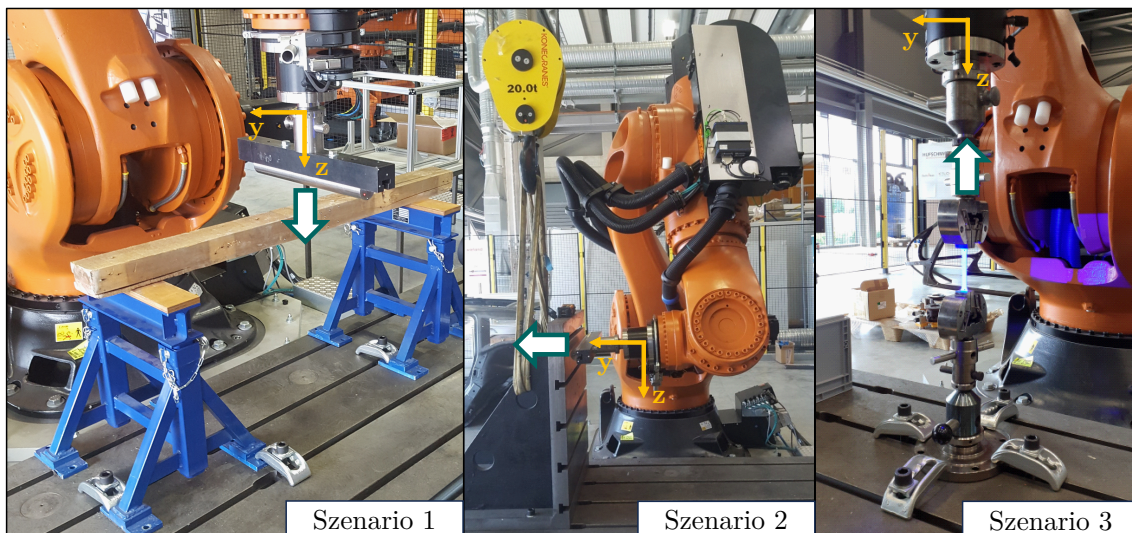


Abbildung 3.8.: Versuchsaufbauten zur Ermittlung experimenteller Kraftwerte zur Validierung der KukaForceISO Software in drei Lastszenarien, mit Koordinatensystem (gelb) und Angabe der Krafrichtung (weiß/grüne Pfeile).

In Tabelle 3.2 sind die theoretisch berechneten Kräfte aus dem KukaForceISO-Modell und die experimentell ermittelten Werte an zehn verschiedenen Roboterpositionen einander gegen-

übergestellt. Die Tabelle gibt die verwendeten Szenarien sowie die jeweilige Roboterachsstellung (A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6) an. Dabei wird zwischen der Dauermomentgrenze G_D (bei der der Roboter länger als 60 s die Kraft aufrecht erhalten kann) und der Haltestromgrenze G_H (bei der der Roboter automatisch abschaltet) unterschieden. In der Validierung liegt die experimentell ermittelte Kraft F_1 unterhalb der Dauermoment- und Haltestromgrenze G_D bzw. G_H , da die Kraft über 60 s gehalten wurde. Die Kraft F_2 wurde zwar erreicht, konnte jedoch nicht 60 s gehalten werden und lag damit über G_D und unter G_H . Für die ursprüngliche theoretische Kraft, ermittelt mit dem KukaForceISO-Modell, werden die am Motor erzeugten Drehmomente betrachtet, ohne den Wirkungsgrad der Antriebsstränge einzubeziehen. Da jedoch nicht das gesamte Motordrehmoment am Abtrieb ankommt, sondern aufgrund des Getriebewirkungsgrads nur ein Teil der Leistung übertragen wird, wird gemäß den KUKA-Empfehlungen eine sogenannte Joint Efficiency von 0,8 angenommen. Diese Korrektur wird bei der theoretischen Kraft F_3 bereits berücksichtigt. Die Differenz Δ zwischen der theoretischen Kraft F_3 und der experimentellen Kraft F_1 wird in der letzten Spalte der Tabelle 3.2 dargestellt und berechnet sich wie folgt:

$$\Delta = F_3 - F_1$$

Szenario	Roboterachsstellung	Exp. Kraft F_1 $< G_D$ [kN]	Exp. Kraft F_2 $\geq G_D$ [kN]	Theor. Kraft F_3 [kN]	Differenz Δ [N]
	[°]				
1	(-90,51 -90,55 127,47 -0,19 53,01 -91,17)	34	35	34,31	-300
1	(-90,51 -95,91 119,03 -0,17 66,8 -91,22)	30	31,3	29,77	230
1	(-90,45 -63,24 79,33 -0,16 73,84 -91,07)	14,5	15	15,09	-599
1	(-90,45 -60 86,69 -0,17 63,23 -91,04)	15	16	14,77	230
2	(-69,25 -23,72 76 -74,7 -76,04 -143,81)	5,5	5,6	5,93	-430
2	(-69,32 -34,97 77,55 -77,31 -73,74 -134,04)	5,4	5,5	5,88	-480
2	(-97,99 -36,29 124,88 -98,02 -88,11 -178,6)	7,4	7,5	8,5	-1100
2	(-98,42 -58,28 127,38 -98,59 -91,03 -159,33)	7,5	7,6	8,46	-960
2	(-56,93 -24,82 52,24 -75,48 -59,96 -120,73)	5,6	5,8	5,85	-250
3	(-107,64 -84,35 128,25 0,21 45,76 18,44)	28	29	23,68	4320

Tabelle 3.2.: Die Tabelle vergleicht die experimentellen Messwerte F_1 und F_2 mit der aus KUKAForceISO berechneten Kraft F_3 an zehn Roboterpositionen und gibt zudem die Differenz Δ zwischen F_3 und F_1 an.

Die Auswertung der Ergebnisse aus Tabelle 3.2 zeigt Folgendes: Im ersten Szenario wurde eine maximale Kraft von 34 kN gemessen, wobei die experimentell ermittelten Werte durch-

schnittlich mit einer Abweichung von 340 N mit den Vorhersagen des Kräftemodells übereinstimmen. Im zweiten Szenario lag der experimentell gemessene Wert im Schnitt um 644 N unter den prognostizierten Werten des Modells, mit einem maximal gemessenen Wert von 7,5 kN. Im dritten Szenario wurden die Dauermomentgrenze bei 28 kN und die Haltestromgrenze bei 29 kN experimentell ermittelt, während das Kräftemodell eine maximale Zugkraft von 23,68 kN vorhersagte. An derselben Roboterposition ergab die theoretische Berechnung für eine Druckkraft 31,13 kN. Die Roboterachsstellung in der ersten Zeile der Tabelle (Druckkraft, Szenario 1) ähnelt derjenigen im dritten Szenario, bei dem deutlich höhere Kräfte von 34 kN erreicht wurden. Dies verdeutlicht den erheblichen Einfluss der Schwerkraft auf die maximal erreichbaren Kräfte, abhängig von der jeweiligen Roboterpose. Insgesamt zeigt das theoretische Kräftemodell eine hohe Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Werten und stellt eine zuverlässige Grundlage für die Kraft- und Positionsbestimmung in der Bauteilprüfung dar.

Eine umfassendere Validierung erfordert jedoch zusätzliche experimentelle Daten an einer größeren Anzahl von Positionen, um die Modellgenauigkeit weiter abzusichern. Zusätzlich ist ein Vorhersagemodell der Drehmomente für die jeweilige Roboterpose erforderlich. Das aktuelle Kraftmodell ist nur eingeschränkt geeignet, um Kraftmaxima und optimale Positionen für spezifische Prüfungen vorab zu identifizieren. Dies zeigt die Notwendigkeit für ein neues Tool zur Bauteilplatzierung und zur Vorhersage geeigneter Prüfpositionen. Ein weiterentwickeltes Tool kann auf einer Datenbank basieren, in der alle möglichen Roboterpositionen und deren zugehörige maximale Kräfte gespeichert sind. In diesem Zusammenhang bietet das Paper von Hanke et al. [43] wertvolle Ansätze zur optimalen Positionierung von Prüfobjekten. Das in Hanke et al. vorgestellte CASP (Computer Aided Specimen Placement)-System ermöglicht eine effiziente Planung und Platzierung von Prüfobjekten basierend auf einer detaillierten Kraftanalyse und unterstützt dadurch die präzise Bauteilplatzierung und -ausrichtung in roboterbasierten Prüfsystemen.

3.6. Flexible Prüfvorrichtung

Ein zentrales Ziel des roboterbasierten Prüfstandes ist die Maximierung der Flexibilität in der Prüftechnik. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, sind neben vielseitigen Prüfverfahren auch flexible Vorrichtungen zur Einspannung der Prüfobjekte erforderlich. Derzeit kommen für jeden Lastfall und jedes Prüfobjekt spezifisch entwickelte Prüfvorrichtungen zum Einsatz, die häufig additiv gefertigt werden. Dieser Ansatz ist jedoch mit erheblichem zeitlichen und logistischen Aufwand verbunden. Eine universell anpassbare Lösung, die je nach Lastfall und Bauteilgeometrie flexibel konfiguriert werden kann, stellt eine deutlich effizientere Alternative dar. Dies beschleunigt den Prüfprozess, steigert die Effizienz des Versuchsablaufs und erleichtert eine zukünftige Automatisierung. In diesem Kapitel werden Anforderun-

gen, Konzepte und Herausforderungen flexibler Prüfvorrichtungen für den roboterbasierten Prüfstand erläutert.

3.6.1. Anforderungen

Im Rahmen der Entwicklung des Prüfkonzepts für den roboterbasierten Prüfstand wurden folgende Anforderungen an die flexible Prüfvorrichtung definiert:

- Kräfteaufnahme: Idealwert von 32 kN
- Drehmomentaufnahme: Idealwert von 5 kNm
- Anpassungsfähigkeit: Variable Form zur Anpassung an unterschiedliche Bauteilgeometrien und -größen (begrenzt durch Spannungsfeldgröße und Erreichbarkeit des Lastangriffspunktes durch die Roboter)
- Belastungsarten: Geeignet für Zug-, Druck-, Biege- und Torsionsbelastungen sowie kombinierte Belastungen

3.6.2. Konzepte und Herausforderungen

Im Folgenden werden unterschiedliche Konzepte und Lösungsansätze vorgestellt sowie die Herausforderungen erörtert.

Ein naheliegendes und einfach umzusetzendes Konzept für den Einsatz roboterbasierter Prüftechnik ist die Verwendung eines Greifers. Der Vorteil dieses Konzepts liegt in der verhältnismäßig einfachen Umsetzung, da keine umfangreiche Entwicklung oder Konstruktion erforderlich ist. Zudem zeichnen sich Greifer durch ihre kompakte Bauweise aus, die eine gute Erreichbarkeit der Spannposition gewährleistet. Die hohen erforderlichen Kräfte und Drehmomente sowie die notwendige Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an die Bauteilgeometrie stellen jedoch eine signifikante Herausforderung dar. Ein elektromagnetischer oder pneumatisch-mechanischer Greifer kann die erforderlichen Kräfte und Drehmomente realisieren. Ein Beispiel hierfür ist der 2-Backen-Parallelgreifer der Serie GPP5045 entwickelt von der Zimmer Group, der eine Greifkraft von bis zu 26.950 N aufbringen kann [44], siehe Nummer ① Abbildung 3.9. Eine weitere Möglichkeit, ausreichend Greifkraft zu erzeugen, bietet der Kraftspanner von SMW-Autoblok Spannsysteme GmbH [45]. Dieser ist in mechanischer, pneumatischer und hydraulischer Ausführung verfügbar, wobei die mechanischen Varianten (IMG-Schraubstöcke siehe Nummer ② Abbildung 3.9) eine Spannkraft von bis zu 50 kN erreichen. Ein Nachteil dieser Kraftspanner besteht jedoch darin, dass sie wenig Flexibilität bei der Anpassung an unterschiedliche Bauteilgeometrien bieten.

Eine weitere Möglichkeit, einen mechanischen Formschluss zu erzeugen und gleichzeitig eine größere Flexibilität für verschiedene Bauteilgeometrien zu ermöglichen, stellt der

Einsatz eines Fraktal-Schraubstocks am Endeffektor des Roboters dar. Die fraktale Struktur der Spannflächen sorgt dafür, dass sich das Werkstück durch direkten Kontakt formschlüssig an die fraktale Oberfläche anpasst, siehe Nummer ③ Abbildung 3.9. Diese Struktur ist so konzipiert, dass sie sich passiv den Konturen des Werkstücks anlegt, ohne eine zusätzliche Energiequelle oder elektronische Steuerung zu benötigen. Während der primäre Formschluss mechanisch erfolgt, kann der Fraktal-Schraubstock in modernen Anwendungen durch elektrische oder magnetische Komponenten ergänzt werden, um den Formschluss weiter zu verstärken oder dynamisch anzupassen. Aufgrund seiner voluminösen Bauweise ist der Fraktal-Schraubstock jedoch weniger geeignet für schwer zugängliche Spannpositionen, was die Handhabung kleiner, verwinklelter Prüfbjekte erschwert.

Eine alternative Möglichkeit zur Fixierung von Objekten am Endeffektor des Roboters bietet die Entwicklung einer Universalklemmbake, die speziell auf die Anforderungen der roboterbasierten Prüftechnik abgestimmt ist. Diese kann den Formschluss durch verschiedene physikalische Prinzipien herstellen: Mechanisch, pneumatisch oder hydraulisch. Der mechanische Formschluss kann beispielsweise durch speziell geformte Adaptereinsätze erreicht werden, die entweder additiv gefertigt oder aus weichen, formadaptiven Materialien wie Gel pads, Schaum oder Hartgummi bestehen. In Abbildung 3.9 Nummer ④ ist eine beispielhafte Konzeptidee dargestellt, entwickelt von Dr.-Ing. Andreas Monden. Ein wichtiger Effekt, der bei der Nutzung weicher, anpassungsfähiger Materialien genutzt werden kann, ist der sogenannte Jamming-Effekt. Dieser Effekt beschreibt eine Viskositätserhöhung mesoskopischer Materialien (z. B. Granulate) bei Erhöhung der Partikeldichte (z. B. durch Drucksteigerung). Es handelt sich um einen physikalischen Phasenübergang, der in gewisser Weise mit dem Übergang von Flüssigkeiten in Festkörper vergleichbar ist. Nicht-newtonsche Flüssigkeiten ändern ihre Viskosität unter äußeren Belastungen, wie Scherkräften oder Deformationen, was sie zu einem interessanten Material für Anwendungen wie den Jamming-Effekt macht. Einige wissenschaftliche Arbeiten verdeutlichen das Potenzial dieses Effekts für Greifersysteme in der Bauteilprüfung. Choi et al. [46] präsentieren einen flexiblen Greifer, der mithilfe aufblasbarer Gummitaschen Objekte unterschiedlicher Form und Größe greifen kann. Durch den Einsatz pneumatischer Steuerung passt sich der Greifer zuverlässig an verschiedenste Objektgeometrien an und zeigt somit die Vielseitigkeit formadaptiver Materialien. Brown et al. [47] stellen einen universellen Greifer vor, der durch das Jamming granulärer Materialien in einer elastischen Hülle eine flexible Anpassung an verschiedenste Objektformen ermöglicht. Dabei bewirkt eine gezielte Druckanpassung die Verfestigung des Granulats, wodurch der Greifer selbst unregelmäßig geformte Objekte sicher fassen kann. Beide Ansätze veranschaulichen, wie der Jamming-Effekt innovative und vielseitige Greiferlösungen ermöglicht, die insbesondere für flexible Prüfanforderungen von Vorteil sind. Die zuletzt vorgestellte Konzeptidee, die auf dem Jamming-Effekt beruht, wurde von Dr.-Ing. Andreas Monden im Rahmen des Forschungsprojekts WiR Augsburg (Wissenstransfer Region Augsburg) erarbeitet.



Abbildung 3.9.: Vier Konzepte für flexible Prüfvorrichtungen: ① 2-Backen-Parallelgreifer Serie GPP5000 entwickelt von der Zimmer Group [44], ② Kraftspanner IMG 160-270 von SMW-Autoblok Spannsysteme GmbH [45], ③ Fraktal-Schraubstock [48] und ④ formadaptive Universalklemmbacke entwickelt von Dr.-Ing. Andreas Monden.

3.6.3. Ausblick

Trotz der Vielzahl bestehender Konzepte, die jeweils unterschiedliche Anforderungen abdecken, gibt es bislang kein System, das alle Anforderungen hinsichtlich Flexibilität, Lastkapazität und Anpassungsfähigkeit vollständig vereint. Insbesondere die Kombination aus hoher Anpassungsfähigkeit und gleichzeitig großer Lastkapazität stellt eine Herausforderung dar. Während Systeme, die eine hohe Flexibilität bei der Objektaufnahme bieten, oftmals nur bei geringen Lasten funktionieren, sind die Systeme, die hohe Lasten oder eine hohe Klemmkraft aufbringen können, häufig nicht ausreichend filigran oder anpassungsfähig. Hinzu kommt, dass der Einsatzbereich des roboterbasierten Prüfstandes hinsichtlich Bauteilgröße und -geometrie sehr weit gefasst ist. Eine Spezialisierung auf eine bestimmte Größe oder Form ist daher nicht möglich. Ein Roboter-Werkzeugwechselsystem, wie beispielsweise das HTC 600 von Stefan Holzer Feinmechanik GmbH & Co. KG, kann verwendet werden, um die Stärken der verschiedenen Konzepte zu kombinieren [49]. Im Magazin des Werkzeugwechslers können unterschiedliche Prüfvorrichtungen verfügbar sein, aus denen die jeweils passendste für die spezifische Prüfaufgabe ausgewählt werden kann. Diese Vorrichtungen sind auf spezielle Anforderungen wie bestimmte Belastungsarten, komplexe Bauteilgeometrien oder hohe Kräfte optimiert.

3.7. Versuchsaufbau der Anwendungsfälle

Die vier verschiedenen Prüfzenarien, die zur Validierung des Versuchsaufbaus und zur Bewältigung spezifischer Herausforderungen durchgeführt wurden, werden in den folgenden Unterkapiteln detailliert beschrieben. Zunächst wurde ein einachsiger Zugversuch durchgeführt, um einen reinen Spannungszustand ohne Querkräfte zu erzeugen. Ein standardisierter Zugversuch auf einer Universalprüfmaschine diente dabei als Referenz zur Validierung der

Bewegungsgenauigkeit, Prüfabläufe und Materialeigenschaften. Anschließend wurden komplexere Belastungsszenarien an repräsentativen Bauteilen wie einem Fahrradrahmen, einem Snowboard und einer Automobilkomponente durchgeführt. Mit dem Fahrradrahmen wurde eine Sequenz verschiedener Lastfälle realisiert, in denen Druckkräfte an unterschiedlichen Positionen der Struktur eingeleitet wurden. Beim Snowboard hingegen lag der Fokus auf überlagerten Belastungen, insbesondere Biege- und Torsionslasten, sowie auf der Fähigkeit, den ursprünglichen Lastvektor bei hoher Systemnachgiebigkeit anzupassen. Das abschließende Szenario umfasste die Prüfung einer Automobilkomponente, bei der mehrere Lasten durch kooperierende Roboter gleichzeitig aufgebracht wurden. In dieser Multi-Roboter-Prüfung wurde eine wechselnde Zug- und Druckbelastung von jedem Roboter auf das Bauteil ausgeübt.

Für jedes Szenario wurden die Koordinatensysteme der jeweiligen Sensoren und Aktoren entsprechend angepasst. Generell basiert das Koordinatensystem der Industrieroboter und des DIC-Systems auf dem internen Koordinatensystem des Kraft-/Drehmomentsensors, da dieses nicht verändert werden kann. Dies gewährleistet die Übereinstimmung der erfassten Kräfte, Momente, Verschiebungen und Drehungen der verschiedenen Sensoren und Aktoren. Das jeweils verwendete Koordinatensystem zur Ergebnisdarstellung und Diskussion ist in den Abbildungen der einzelnen Versuchsaufbauten angegeben.

3.7.1. Zugversuch: Uniaxiale Spannungszustände ohne Querkräfte

Dieser Validierungsansatz dient als Konzeptnachweis, um die oben genannten roboterbasierten Komponentenprüf- und Bewegungssteuerungssysteme zu verifizieren. Um den in Kapitel 3.1 beschriebenen Herausforderungen zu begegnen, wurden die Testbewegungen durch sensorgesteuerte Bewegungen angepasst. In dieser Studie wurden drei verschiedene Regelungsarten realisiert: Kraftregelung und Positionsregelung über externe Sensorik sowie Positionsregelung über die interne Roboterkinematik ohne zusätzliche Sensoren (siehe Abbildung 3.7). Das optische Messsystem ermöglicht die Messung der Materialdehnung als Extensometer sowie die Verfolgung der exakten Position der Spannbacken zur Bewertung der Systemnachgiebigkeit und möglicher überlagerter Starrkörperbewegungen.

Zur Validierung der roboterbasierten Prüfung (siehe Abbildung 3.10A) wurden Referenzversuche auf einer Universalprüfmaschine (Zwick/Roell Zmart.Pro Z1464, Kraft: 50 kN, Genauigkeitsklasse 0,5 %) im Labor mit den gleichen Werkstoffen und Probengeometrien aus Edelstahl (X5CrNi18-10) durchgeführt (siehe Abbildung 3.10B). Die Ergebnisse der drei verschiedenen Prüfmodi der roboterbasierten Prüfung wurden jeweils über drei Proben gemittelt, während die Zugprüfung im Labor über vier Proben gemittelt wurde. Knochenförmige Proben wurden durch Wasserstrahlschneiden mit den Abmessungen 190 mm x 10 mm x 3 mm (Gesamtlänge x Mindestbreite x Dicke) hergestellt. Die Länge des reduzierten Abschnitts betrug 80 mm. Eine technische Zeichnung der Zugprobe ist im Anhang A.3 dargestellt.

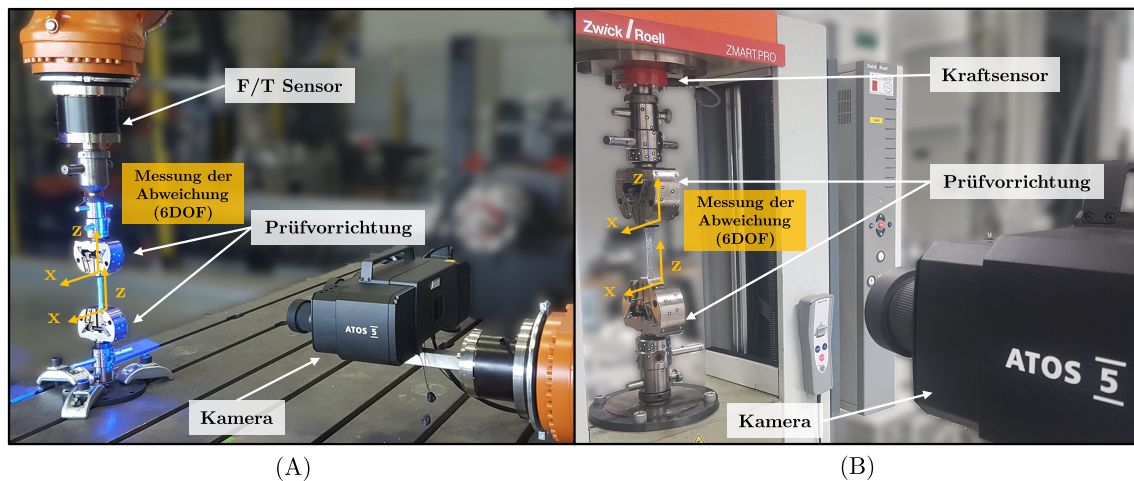


Abbildung 3.10.: Zwei verschiedene Versuchsaufbauten für den Zugversuch: (A) roboterbasierter Zugversuch in der Roboterzelle, (B) klassischer Aufbau mit einer Universalprüfmaschine. [36]

Gemäß dem Datenblatt des Werkstofflieferanten beträgt der Elastizitätsmodul 200 GPa. Die Prüfgeschwindigkeit wird auf 5 mm/min eingestellt, bis eine Kraft von 6000 N erreicht wird, und dann auf 10 mm/min erhöht, bis die Probe versagt. Für die roboterbasierte und die konventionelle Prüfung wurden das gleiche Prüfverfahren und die gleichen Abbruchkriterien (Lastabfall von 80 % von F_{max}) verwendet. Um sicherzustellen, dass der Industrieroboter die erforderlichen Kräfte erreicht, wurde das Werkzeug zur Bauteilplatzierung [43] verwendet. In beiden Prüfständen wurde das gleiche optische Messsystem ATOS 5 mit CP40/MV700-Objektiven verwendet, das ein Volumen von $700 \times 530 \times 520 \text{ mm}^3$ untersuchen kann (Kalibrierabweichung: 0,117 Pixel). Auf jede geprüfte Zugprobe wurde ein Specklemuster, aufgebracht, um die Verschiebungen und die daraus resultierenden Dehnungsfelder in der Probe mit Hilfe der digitalen Bildkorrelation (Digital Image Correlation: DIC) zu bestimmen. Zusätzlich wurden Referenzpunktmarker an den Spannbacken angebracht, um deren Bewegung während des Versuchs aufzuzeichnen. Aufgrund des Versuchsaufbaus und der messtechnischen Anforderungen mussten bei der Wahl der Objektivgröße und der Auflösung Kompromisse eingegangen werden: Die Fläche der Zugprobe (Messlänge x Mindestbreite) ist klein im Vergleich zum gesamten aufgenommenen Messvolumen einschließlich der Spannbacken (Pixelgröße: 0,18 mm/Pixel). Beim Vergleich von klassischen Zugversuchen auf einer Universalprüfmaschine mit roboterbasierten Versuchen ist es jedoch wichtig, auch die Spannbacken, die Vorrichtung oder den Roboter-Endeffektor zu verfolgen, um Rückschlüsse auf die Qualität der Bewegung und Steuerung ziehen zu können. Daher musste ein Kompromiss zwischen der DIC-Auflösung, der Region of Interest (ROI) und den verfügbaren Objektivsystemen gefunden werden. Unter diesen Bedingungen war es möglich, die Bewegung des gesamten Systems einschließlich der Traverse bzw. des Industrieroboters und der Vorrichtung zu verfolgen. Für eine reale Bauteilprüfung wird mit dem optischen Messsystem,

das hier nur den DIC-Modus verwendet, auf Grundlage der IDICS-Empfehlungen gearbeitet, um zuverlässige Daten zu erhalten [50]. Die mit den Robotern geprüften Zugversuche wurden in drei Versuchsreihen aufgeteilt und unter Kraft-, Positions- und Roboterpositionsregelung geprüft. Die Referenzversuche mit der Prüfmaschine wurden lagegeregelt geprüft. Neben dem Vergleich der roboterbasierten Prüfung mit der konventionellen Prüfung mit einer Universalprüfmaschine im Labor konnte auch der Einfluss der drei unterschiedlichen Roboterprüfbewegungen bewertet werden.

3.7.2. Prüfung Fahrradrahmen: Variation der Lastvektor Position

Um die Flexibilität des roboterbasierten Prüfansatzes zu untersuchen, wurde ein Fahrradrahmen für weitere Untersuchungen ausgewählt. Der Fahrradrahmen besteht aus einer Aluminiumlegierung und kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (starre Fahrradgabel). Es werden drei Lastfälle ausgewählt (in Abbildung 3.11 durch nummerierte Pfeile gekennzeichnet).

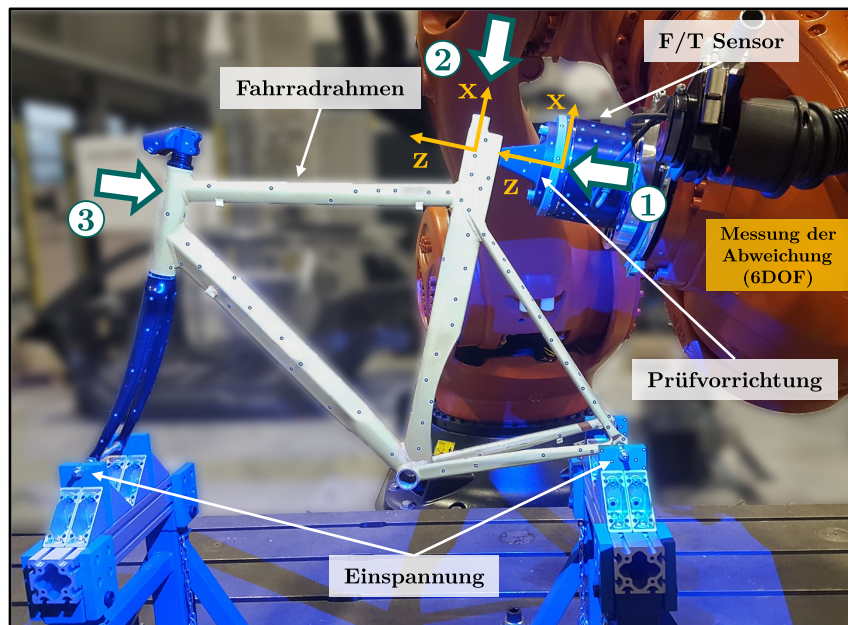


Abbildung 3.11.: Versuchsaufbau für die Prüfung des Fahrradrahmens mit drei verschiedenen Lastfällen, dargestellt durch Pfeile. [36]

Die Prüfgeschwindigkeit beträgt für jeden Lastfall 5 mm/min, bis die Druckkraft F_z 100 N erreicht wird (Vorbelastung), danach wird mit 2 mm/min weiter geprüft. Lastfall 1 umfasst eine quer zum Sitzrohr wirkende Druckkraft von bis zu 500 N, Lastfall 2 eine axial entlang des Sitzrohres wirkende Druckkraft von bis zu 2000 N und Lastfall 3 eine quer auf das Steuerrohr wirkende Druckkraft von bis zu 1000 N. Alle Lastfälle wurden positions- und kraftgeregelt realisiert. Die resultierenden Verschiebungen und die Positionsabweichungen wurden durch optische Verfolgung der Referenzpunktmarker am Fahrradrahmen gemessen. Als optisches

Messsystem wurde das ATOS 5 mit CP40/MV1000-Objektiven verwendet, das ein Volumen von $1000 \times 750 \times 750 \text{ mm}^3$ untersuchen kann (Kalibrierabweichung: 0,027 Pixel).

Es wurde eine spezielle Spannvorrichtung entwickelt, um den Fahrradrahmen über die starre Fahrradgabel und die Ausfallenden zu fixieren. Diese Einspannpunkte sind praxisnah gestaltet, da an der Fahrradgabel und den Ausfallenden normalerweise die Räder befestigt sind, die wiederum Kontakt zum Boden haben. Ergänzend wurden auf Basis eines 3D-Scans des Fahrradrahmens mittels ATOS 5-System formschlüssige Prüfvorrichtungen konstruiert, die präzise an die Geometrie des Rahmens angepasst sind. Diese wurden für die drei spezifischen Lastfälle im Fused Deposition Modeling oder kurz FDM-Verfahren aus kohlefaserverstärktem Nylonfilament additiv gefertigt. In Abbildung 3.12 sind die CAD-Modelle (Computer-aided design) der drei Prüfvorrichtungen für die jeweiligen Lastfälle dargestellt: Vorrichtung ① am Sattelrohr, Vorrichtung ② an der Sattelstütze und Vorrichtung ③ am Steuerrohr. Die Nummerierungen der Prüfvorrichtungen in Abbildung 3.12 entsprechen dabei den Lastfall Nummern in Abbildung 3.11. Montiert werden diese Prüfvorrichtungen auf die bereits im Kapitel 3.2.3 erwähnte Adapterplatte (siehe technische Zeichnung im Anhang A.2).

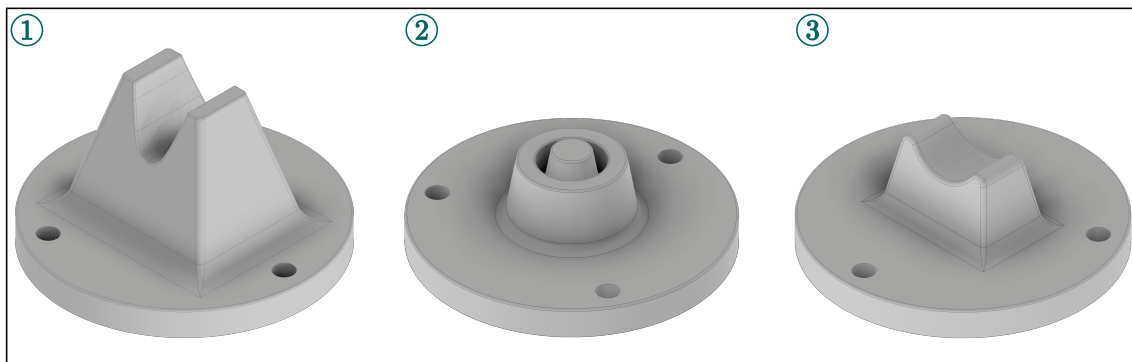


Abbildung 3.12.: CAD-Modelle der drei Prüfvorrichtungen für Druckprüfungen am Fahrradrahmen mit den folgenden drei Lastfällen: Lastfall ① am Sattelrohr, Lastfall ② auf der Sattelstütze und Lastfall ③ am Steuerrohr.

3.7.3. Prüfung Snowboard: Überlagerung von Lastfällen

Im Folgenden wurde ein Snowboard für die Prüfung herangezogen. Dieses weist eine deutlich höhere Nachgiebigkeit als die bisher verwendeten Proben und Bauteile auf. Zudem sind überlagerte Beanspruchungen wie Biegung und Torsion realistische Lastfälle für dieses Bauteil. Das Snowboard ist auf einer Seite fest in der Bindung eingespannt. Auf der anderen Seite, die frei beweglich ist, wird die Last über eine additiv gefertigte Prüfvorrichtung aus glasfaserverstärktem Kunststoff aufgebracht (siehe technische Zeichnung im Anhang A.2). Es wurden zwei unterschiedliche Lastfälle realisiert, die in Abbildung 3.13 dargestellt sind: Lastfall 1 stellt eine reine Biegebeanspruchung dar, da eine konstante Belastung in z-Richtung (lokales Koordinatensystem, orthonormal zur Oberfläche) mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min eingeleitet wurde. Die globale Belastungsrichtung des Kraftvektors wurde

kontinuierlich angepasst, so dass die Kraft immer senkrecht zur Snowboardoberfläche einge-
leitet wurde. Die resultierende Trajektorie erzeugt eine Biegung des Snowboards. In diesem
Experiment wurden sowohl Versuche mit Weg- als auch mit Drehmomentregelung durch-
geführt. Die beiden Steuerungsarten unterscheiden sich geringfügig in ihrer Praktikabilität:
Bei der Drehmomentregelung müssen Roboter und Snowboard fest miteinander verbunden
sein, damit steuerbare Querkkräfte bzw. Drehmomente auftreten. Die Positionsregelung hin-
gegen benötigt keine feste Verbindung. Dieser Ansatz erleichtert die Beobachtung der Ver-
schiebung des Snowboards und macht damit die Funktionsweise der Lastvektoranpassung
und der überlagerten Lasten besser sichtbar.

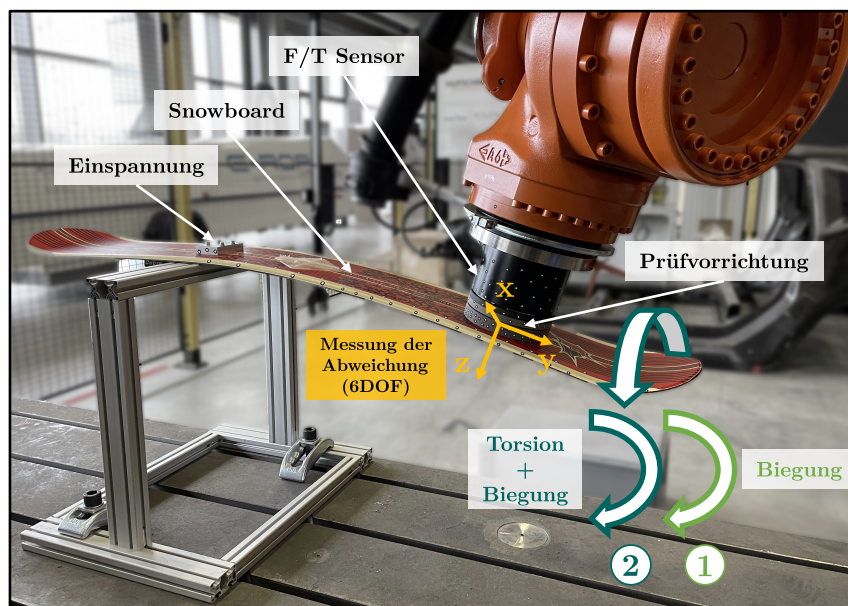


Abbildung 3.13.: Versuchsaufbau für Snowboardtests auf Biegung und Torsion. [36]

Lastfall 2 stellt eine überlagerte Biege- (F_z) und Torsionsbeanspruchung (T_y) dar. Die Prüfge-
schwindigkeit wurde auf 50 mm/min in z-Richtung und 50 °/min bzw. 10 °/min für die Dre-
hung um die x- und y-Achse festgelegt. Das Drehmoment in z-Richtung wurde angepasst,
da diese Drehung hauptsächlich die Schraubverbindung belastet und nicht die gewünsch-
te Richtung für die Krafteinleitung ist. Biegung und Torsion im Lastfall 2 wurden über ei-
ne feste Verbindung zwischen Roboter und Snowboard aufgebracht, aber nur das Drehmo-
ment wurde zur Steuerung der Roboter-Testbewegung verwendet. In diesem Fall wurden die
Verschiebungen und Positionsabweichungen der verschiedenen Bauteile (wie Einspannung
oder Prüfvorrichtung) durch optische Verfolgung der Referenzpunktmarker auf dem Snow-
board gemessen. Als optisches Messsystem wurde ein ATOS 5 mit CP40/MV1000-Objektiven
verwendet, das ein Volumen von 1000 x 750 x 750 mm³ untersuchen kann (Kalibrierabwei-
chung: 0,027 Pixel).

3.7.4. Prüfung Automobilkomponente: Multi-Roboter Prüfung

Das vierte Lastszenario ist der erste Multi-Roboter-Test in dieser Konfiguration. Hierbei prüfen beide Industrieroboter gemeinsam und gleichzeitig ein Fahrzeugbauteil, einen sogenannten Hilfsrahmen eines Porsche Panameras (Bauteilnummer 971400048AH) mit den Außenmaßen 1000 mm x 650 mm, siehe Abbildung 3.14.

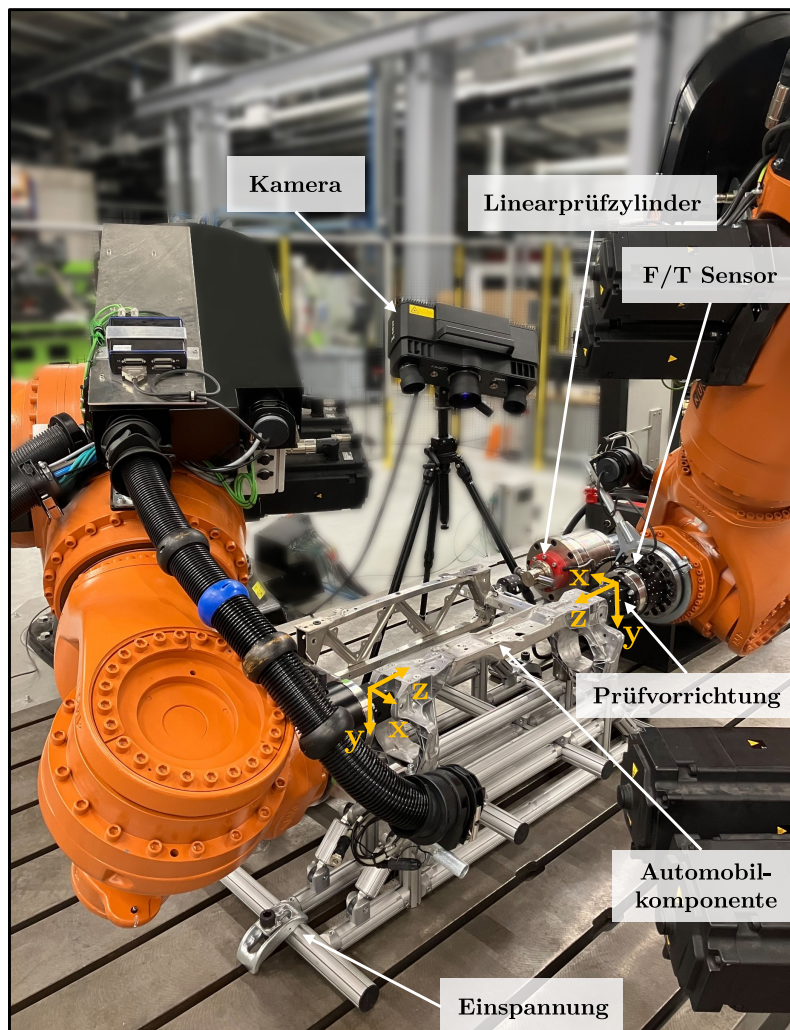


Abbildung 3.14.: Versuchsaufbau für Multi-Roboter Versuche am Beispiel der Hilfsrahmen Prüfung (Automobilkomponente). [35]

Für die Auswahl eines realitätsnahen Lastszenarios war eine präzise Analyse des Hilfsrahmens und der einwirkenden Kräfte erforderlich, wie sie in der Bachelorarbeit von Jonathan Winderl [51] umfassend untersucht wurde. Auf Grundlage dieser Analyse werden im Folgenden die wichtigsten Punkte erläutert. Der Hilfsrahmen, gefertigt aus einer Aluminium-Magnesium-Legierung, befindet sich unterhalb des Motors zwischen den Vorderrädern und trägt Querlenker, Lenkgetriebe, Stabilisator, Motorlagerungen und

Schubfelder. Da das Lenkgetriebe und der Stabilisator ausschließlich mit den hier nicht betrachteten Anbauteilen des Hilfsrahmens verbunden sind, bleiben sie unberücksichtigt. Die Schubfelder dienen der Versteifung, während die Motorlagerung das Motorgewicht trägt. Da beide Elemente nur geringfügig dynamische Belastungen in den Hilfsrahmen während der Fahrt einbringen, konzentriert sich die Auslegung des Lastfalls hauptsächlich auf den Querlenker. Dieser verbindet Rad und Hilfsrahmen und leitet die während Bremsvorgängen oder Kurvenfahrten auftretenden Querkräfte in den Hilfsrahmen. Eine zentrale Rolle spielen dabei die Seitenführungskräfte, die der Haftreibungskraft der Reifen entspricht. Diese halten das Fahrzeug in der Kurve und sind stets zum Kurvenmittelpunkt gerichtet. Den Seitenführungskräften entgegen wirken die Zentrifugalkräfte während einer Kurvenfahrt. Solange diese kleiner als die Seitenführungskräfte sind folgt das Fahrzeug der vorgegebenen Lenkbewegung. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Simulation einer Kurvenfahrt ein realistisches Belastungsszenario für den Hilfsrahmen darstellt und eine frühzeitige Erprobung des Bauteils ermöglicht, ohne das Gesamtfahrzeug auf einer Teststrecke einsetzen zu müssen.

Als optisches Messsystem wurde ein ATOS 5 mit CP40/MV1000-Objektiven verwendet, das ein Volumen von $1000 \times 750 \times 750 \text{ mm}^3$ untersuchen kann (Kalibrierabweichung: 0,027 Pixel). Durch aufgeklebte Referenzpunktmarker an Einspannung, Prüfvorrichtung und Prüfobjekt konnten verschiedene Verschiebungen, der zurückgelegte Weg oder die Geschwindigkeit gemessen werden. Bei den Multi-Roboter Versuchen werden zwei verschiedene Lastfälle durchgeführt: Der erste Lastfall erfolgt nur mit Hilfe der Roboter, beim zweiten Lastfall bringt der Linearprüfzylinder eine zusätzliche Grundlast mit in den Hilfsrahmen ein. Bei beiden Lastfällen simulieren die Roboter das Einbringen der Seitenführungskräfte über den Querlenker. Dazu belasten beide Industrieroboter den Hilfsrahmen gleichzeitig mit einer Druck- und einer Zugkraft von jeweils 5000 N (Kraftvektoren gleichgerichtet). Während der Prüfung wird die Richtung des Kraftvektors umgekehrt, so wird das abwechselnde Durchfahren einer Rechts- bzw. Linkskurve simuliert.

In Abbildung 3.15 ist zum besseren Verständnis eine Linkskurve und die Richtung der simulierten Seitenführungskräfte der Roboter dargestellt. Roboter A2 bringt eine Zugkraft von 5000 N, und Roboter A1 eine Druckkraft von -5000 N auf. Im zweiten Lastfall bringt der Linearprüfzylinder eine zusätzliche quasistatische Druckkraft von -5000 N auf den Hilfsrahmen auf. Dies ist ebenfalls in Abbildung 3.15 dargestellt. Die Prüfgeschwindigkeit der Roboter beträgt für beide Lastfälle 10 mm/min in bzw. gegen z-Richtung. Die Prüfgeschwindigkeit des Linearprüfzylinders für den Lastfall 2 beträgt 5 mm/min. Damit wird zum einen erstmalig gezeigt, dass dieser in den Prüfprozess integriert werden kann und zum anderen wird der Einfluss des Linearprüfzylinders auf die Prüfung untersucht.

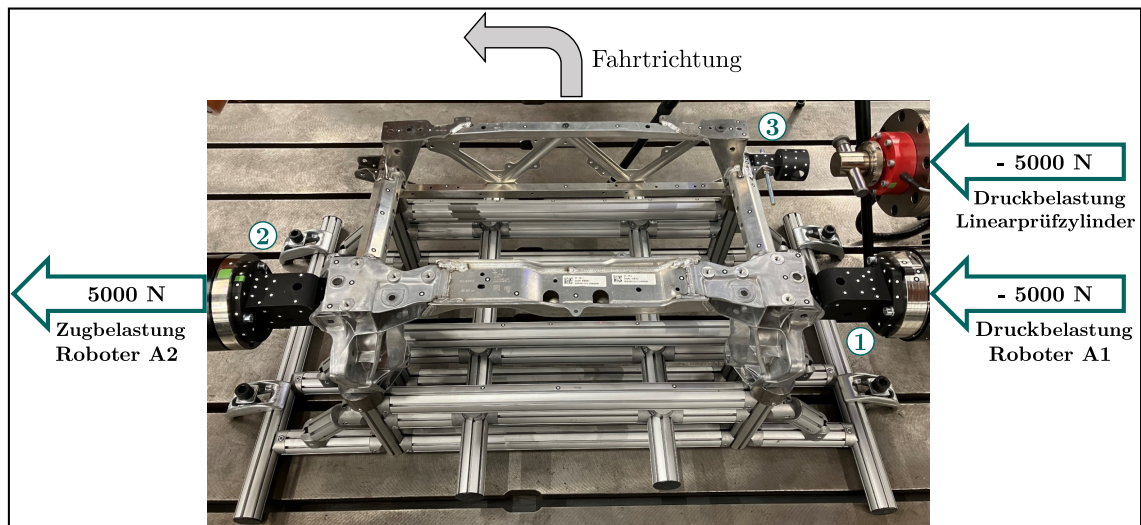


Abbildung 3.15.: Darstellung der Lastfälle bei der Prüfung eines Hilfsrahmens (Automobilkomponente).

Eine spezielle Spannvorrichtung wurde entwickelt (siehe Abbildung 3.14 und 3.15), um die Automobilkomponente möglichst realitätsnah auf dem Spannungsfeld zu fixieren. Dabei orientiert sich die Befestigung am realen Verschraubungsprozess an der Karosserie, etwa durch die gleiche Ausrichtung des Hilfsrahmens. Für das Lastszenario wurden zudem drei formschlüssige Prüfvorrichtungen konstruiert, die präzise an die Geometrie des Hilfsrahmens angepasst sind und an denselben Positionen wie die Querlenker befestigt werden. Abbildung 3.16 zeigt die CAD-Modelle der drei Prüfvorrichtungen, die in der Masterarbeit [51] entwickelt wurden: Vorrichtung ① ist für Roboter A1 vorgesehen, Vorrichtung ② für Roboter A2 und Vorrichtung ③ wurde für den Linearprüfzylinder konstruiert. Die Nummerierungen der CAD-Modelle in Abbildung 3.16 entsprechen denen in Abbildung 3.15. Die Vorrichtungen wurden im FDM-Verfahren additiv aus kohlefaserverstärktem Nylonfilament gefertigt.

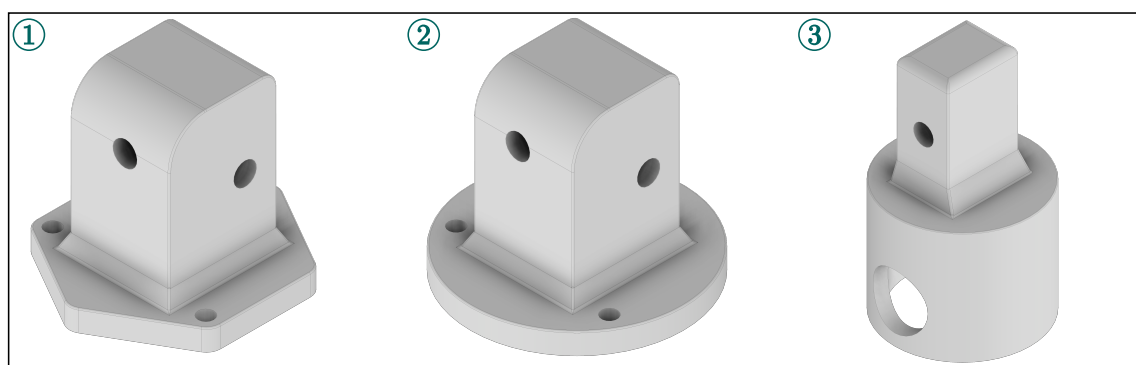


Abbildung 3.16.: CAD-Modelle der drei Prüfvorrichtungen nach [51] für die wechselnde Zug- und Druckprüfungen an der Automobilkomponente: Vorrichtung ① ist für Roboter A1 vorgesehen, Vorrichtung ② für Roboter A2, und Vorrichtung ③ wurde für den Linearprüfzylinder konstruiert.

4. Ergebnisse und Diskussion

Das vorliegende Kapitel gliedert sich in zwei Teile. Zunächst werden die Ergebnisse der vier Anwendungsfälle vorgestellt, analysiert und diskutiert, wobei dies getrennt für jeden Versuch erfolgt. Im anschließenden Kapitel werden die Ergebnisse aller vier durchgeführten Versuche zusammengeführt und im Kontext der übergeordneten Zielsetzung des roboterbasierten Prüfstandes analysiert. Diese übergreifende Diskussion dient dazu, die Potenziale und Herausforderungen des roboterbasierten Prüfstandes umfassend zu bewerten.

4.1. Anwendungsfälle	60
4.2. Übergreifende Diskussion des roboterbasierten Prüfstandes	82

4.1. Anwendungsfälle

Die technische Machbarkeit des roboterbasierten Prüfstandes wird anhand von vier Anwendungsfällen untersucht, die sich durch individuelle Forschungsfragen, unterschiedliche Zielsetzungen und spezifische Lastfälle auszeichnen.

Der erste Anwendungsfall, dem Erzeugen eines uniaxialen Spannungszustandes ohne Querkräfte, erfolgt mittels eines Zugversuchs. Dabei wird ein klassischer Zugversuch an einer Prüfmaschine mit einem roboterbasierten Zugversuch verglichen, was die Grundlage für die Validierung des roboterbasierten Prüfstandes bildet. Im zweiten Anwendungsfall wird erstmals eine Komponentenprüfung durchgeführt, wodurch die Komplexität des Prüfobjekts von der Proben- auf die Bauteilebene erhöht wird. Dabei wird die Variation der Position des Lastvektors untersucht, indem Druckversuche an einem Fahrradrahmen entsprechend beispielhaften Anforderungen eines Lastenhefts durchgeführt werden. Im dritten Anwendungsfall, der die Überlagerung von Lastfällen thematisiert, wird ein Snowboard als Prüfobjekt herangezogen. Hierbei werden sowohl Biegeprüfungen als auch überlagerte Biege- und Torsionsprüfungen durchgeführt. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Echtzeitregelung zu, da der Lastvektor an die Verformung des Bauteils angepasst wird. Im vierten und letzten Anwendungsfall, der Multi-Roboter Prüfung einer Automobilkomponente, wird zum einen erstmalig eine wechselnde Zug- und Druckbelastung in das Bauteil eingebracht und zum anderen das simultane Aufbringen mehrerer Lasten mit Hilfe von kooperierenden Robotern realisiert.

4.1.1. Uniaxiale Spannungszustände ohne Querkräfte

Ergebnis

Abbildung 4.1 zeigt vier Spannungs-Dehnungs-Kurven zum Vergleich der verschiedenen Prüfbedingungen. Drei Kurven zeigen die Ergebnisse der roboterbasierte Zugversuche, die jeweils einer Regelungsart dieser entsprechen. Jede Kurve zeigt den Mittelwert von drei geprüften Proben. Eine weitere Kurve zeigt den Mittelwert von vier Proben, die mit der Universalprüfmaschine geprüft wurden. Die auf den Rohdaten basierenden Spannungs-Dehnungs-Kurven der roboterbasierten Kraftregelung zeigen aufgrund der Regelung deutliche Schwankungen. Eine Darstellung der nicht geglätteten Verlaufskurven ist im Anhang in Abbildung A.4 enthalten. Um einen aussagekräftigen Wert für die Zugfestigkeit zu erhalten, wurde die roboterbasierte, kraftgeregelter Verlaufskurve (grau) in Abbildung 4.1 geglättet (gleitender Mittelwert, points of window: 50).

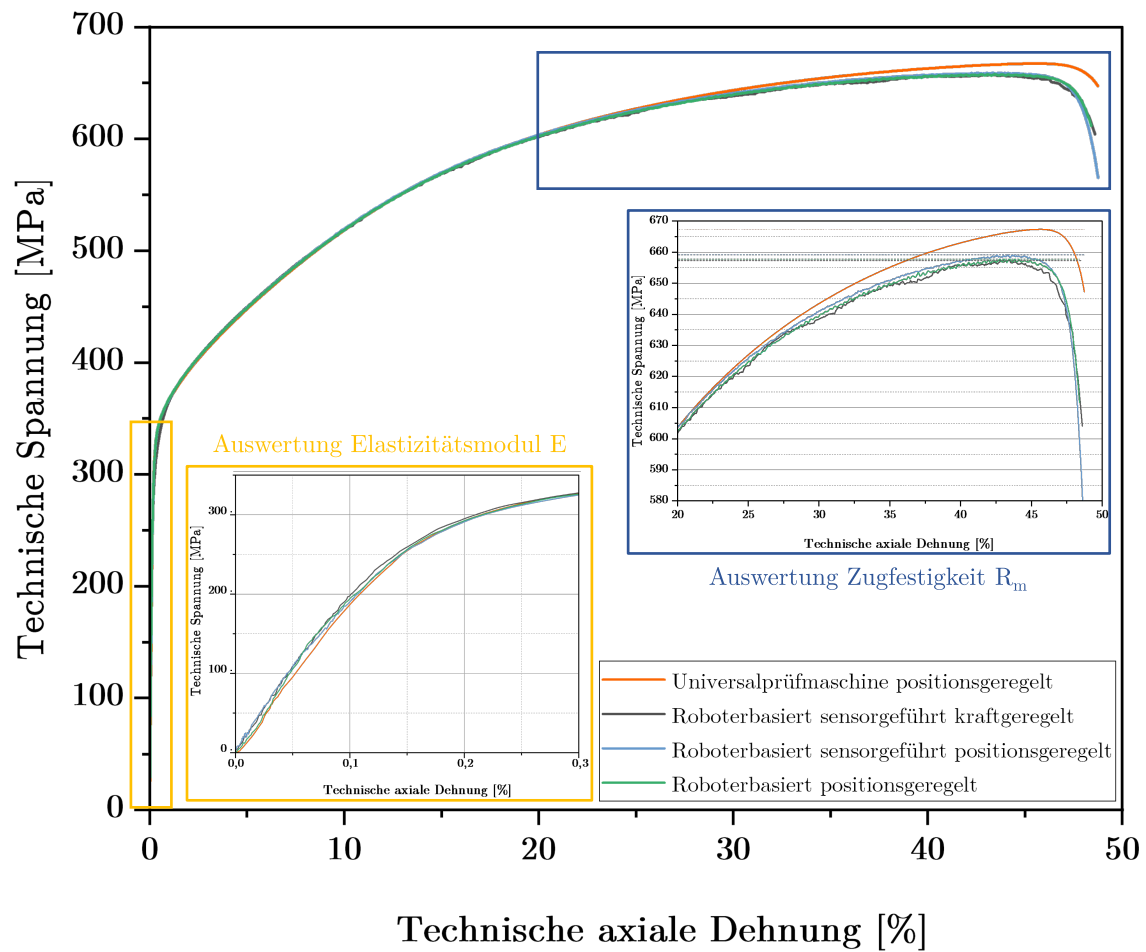


Abbildung 4.1.: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Zugversuche. Verglichen werden vier Prüfarten: Sensorgesteuerte Kraft- und Positionsregelung sowie Positionsregelung gemäß der internen Robotersteuerung und an der Universalprüfmaschine. Die Kurven der drei verschiedenen Regelungsarten der roboterbasierten Prüfung werden auf der Basis von jeweils drei Proben gemittelt. Für die Kurve der Zugversuche im Prüflabor wurden vier Proben betrachtet. [36]

Tabelle 4.1 fasst die Materialeigenschaften nach der Auswertung zusammen. Ausgewertet wurden der Elastizitätsmodul (E), die Zugfestigkeit (R_m), die Bruchdehnung (A_t), die Poissonzahl und die Streckgrenze ($R_{p0,2}$). Der Elastizitätsmodul wurde für die einzelnen Messungen durch lineare Regression im Dehnungsbereich von 0,01 % bis 0,15 % ermittelt. Zur Bestimmung des arithmetischen Mittelwertes und der Standardabweichung in Tabelle 4.1 wurden für die roboterbasierten Zugversuche drei Wiederholungen bzw. Zugproben je Regelungsart und für die klassischen Zugversuche auf der Universalprüfmaschine vier Wiederholungen bzw. Zugproben je Regelungsart durchgeführt. Die Messlänge entspricht der parallelen Länge der knochenförmigen Zugproben von 80 mm. Zur Bestimmung der technischen Dehnung wurde für jede Zugprobe eine Oberflächenkomponente (DIC) generiert. Dies bedeutet, dass die resultierenden Dehnungswerte über die gesamte Fläche

und nicht nur punktuell ausgewertet werden. Die geglätteten Kurven wurden auch für die Auswertung der Zugfestigkeit R_m der roboterbasierten Zugversuche in Tabelle 4.1 verwendet.

Versuchstyp	E-Modul E [GPa]	Zugfestigkeit R_m [MPa]	Bruchdehnung A_t [%]	Poissonzahl [-]	Streckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa]
Roboterbasiert sensorgeführt kraftgeregelt	$211,5 \pm 4,3$	$656,3 \pm 1,4$	$49,1 \pm 0,5$	$0,29 \pm 0,01$	$336,2 \pm 1,4$
Roboterbasiert sensorgeführt positionsgeregelt	$202,6 \pm 1,2$	$659,4 \pm 1,3$	$48,8 \pm 0,0$	$0,27 \pm 0,02$	$334,7 \pm 0,4$
Roboterbasiert positionsgeregelt	$215,1 \pm 3,2$	$657,8 \pm 1,2$	$49,1 \pm 0,5$	$0,29 \pm 0,01$	$335,0 \pm 0,5$
Universalprüfmaschine positionsgeregelt	$201,0 \pm 8,8$	$668,9 \pm 7,0$	$53,1 \pm 2,6$	$0,28 \pm 0,01$	$336,0 \pm 1,3$

Tabelle 4.1.: Vergleich der Materialkennwerte der roboterbasierten Prüfungen und der auf der Universalprüfmaschine durchgeführten Prüfungen. [36]

Um die Genauigkeit der Querkraftkompensation durch sensorgeführte Prüfbewegungen zu verifizieren, wurden die Positionsabweichungen (siehe Abbildung 4.2) und die resultierenden Querkräfte (siehe Abbildung 4.3) näher untersucht. Im Gegensatz zu [34], wo Kraft- und Positionsabweichungsdaten aus roboterbasierten Messungen bereits als Vorstudien auf der Basis von nur einem Probekörper veröffentlicht wurden, basieren die in dieser Studie veröffentlichten Ergebnisse auf mehreren Probekörpern pro Versuchstyp. Jede Kurve stellt einen Mittelwert über die Zugversuche der jeweiligen roboterbasierten Versuche und der konventionellen Versuche dar. Zur Auswertung der Positionsabweichungen in x- und y-Richtung wurden zwei Koordinatensysteme (siehe Abbildung 3.10) in der Mitte der Spannbacken angebracht und sowohl der Abstand in x-, y-, z-Richtung als auch die drei zugehörigen Drehwinkel (6DOF) mit dem optischen Messsystem zueinander gemessen. Die stationäre Spannbacke diente als Referenz. Bei den roboterbasierten Versuchen wird die obere Spannbacke, die mit dem Industrieroboter verbunden ist, relativ zur Position der stationären unteren Spannbacke bewegt. In Abbildung 4.2 sind die gemessenen Abweichungen in x- und y-Richtung für die Positionsregelung blau dargestellt. Nach einer kurzen Einschwingzeit gehen die Positionsabweichungen in x- und y-Richtung gegen 0 mm (Abbildung 4.2), da sie durch den Regelkreis sofort korrigiert werden. Im Vergleich dazu zeigt die Kurve für die Positionsregelung des Roboters eine zunehmende Abweichung mit der Zeit (grüne Linie, Abbildung 4.2). Hier wird keine sensorgeführte Regelung verwendet, was zu einer deutlich höheren Abweichung im Vergleich zu den anderen Kurven führt. Die Kurve für die Kraftregelung (graue Kurve, Abbildung 4.2) pendelt sich in beiden Richtungen auf einen konstanten Wert ein, führt aber in beiden Richtungen zu einer deutlichen Abweichung. Im Vergleich dazu zeigen die Ergebnisse der Universalprüfma-

schine einen relativ hohen Anfangswert von 0,2 mm in x-Richtung. Nach dem anfänglichen Spitzenwert geht die Abweichung von 0,1 mm auf nahezu 0 mm zurück. In y-Richtung beginnt die Abweichung bei -0,25 mm und steigt langsam auf -0,5 mm an. Diese Abweichungen zu Beginn der Prüfung auf der klassischen Universalprüfmaschine deuten darauf hin, dass die Mittelstellung der oberen und unteren Spannbacke im Prüflabor leicht von einer Ideallinie abweicht. Diese anfängliche Abweichung ändert sich im Verlauf der Prüfung, sobald eine Last aufgebracht wird.

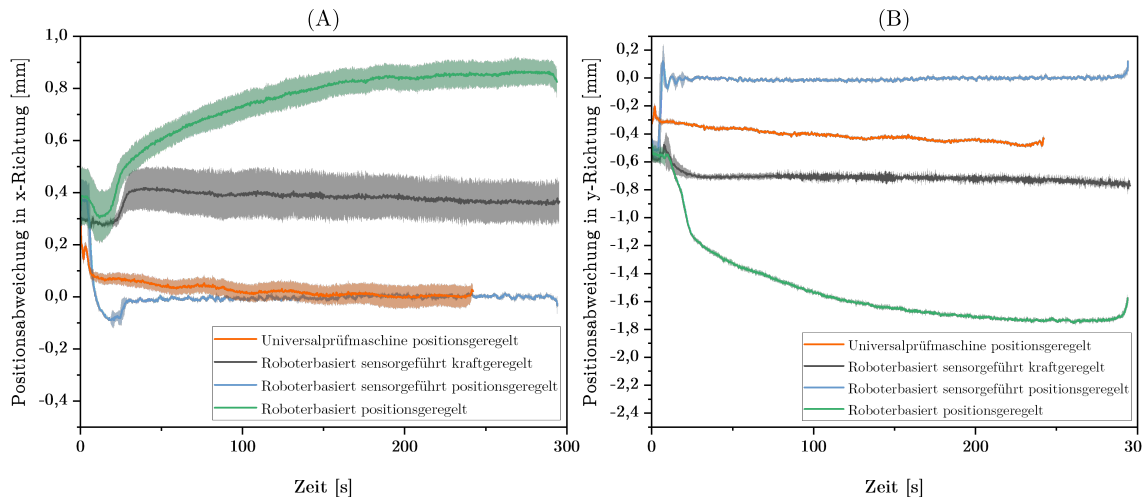


Abbildung 4.2.: Gemittelte Positionsabweichung mit Standardabweichung in x-Richtung (A) und y-Richtung (B) für die verschiedenen Regelungsarten der roboterbasierten Prüfungen und die Prüfungen durch eine Universalprüfmaschine. [36]

Abbildung 4.3 zeigt die Querkräfte F_x und F_y in Abhängigkeit von der Prüfzeit nur für die roboterbasierte Prüfung. Da die verwendete Universalprüfmaschine nicht mit einem mehrachsigen Kraftsensor ausgestattet war, konnten die Querkräfte nicht erfasst werden. In der Kraftregelkurve (graue Linie, Abbildung 4.3) werden die Querkräfte während der Messung unter 5 N kompensiert. Dies entspricht jedoch einer systematischen Positionsabweichung, wie sie in Abbildung 4.2 zu sehen ist. Im Gegensatz dazu zeigt die Positionsregelung (blaue Linie, Abbildung 4.3) eine anfängliche Setzung, die der Setzung der Positionen in Abbildung 4.2 entspricht, gefolgt von einem konstanten, aber hohen Wert der beiden Komponenten F_x und F_y . Die Positionsregelung mit der internen Robotersteuerung (grüne Linie, Abbildung 4.3) weist durchweg die höchsten Querkräfte auf (F_x über 100 N, F_y über 125 N) und realisiert somit weder einen rein einachsigen Spannungs- noch einen rein einachsigen Dehnungszustand.

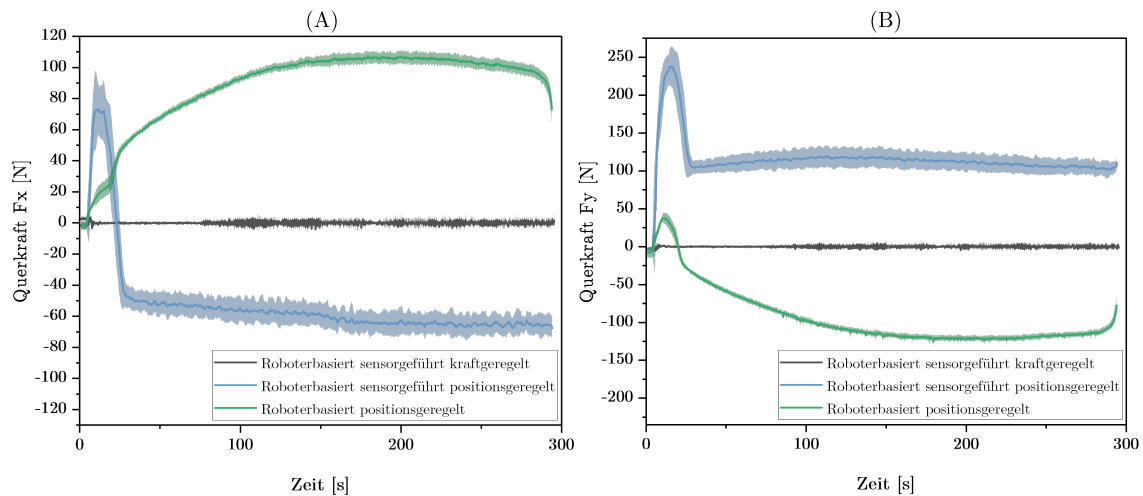


Abbildung 4.3.: Gemittelte Querkräfte F_x (A) und F_y (B) mit Standardabweichung für die verschiedenen roboterbasierten Prüfungen. [36]

Diskussion

Die Ergebnisse der roboterbasierten und der konventionellen Prüfung unterscheiden sich nur geringfügig innerhalb der in Tabelle 4.1 angegebenen Fehlergrenzen. Beide Prüfbedingungen, die roboterbasierte und die konventionelle Zugprüfung, stimmen mit der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und der Streckgrenze aus dem Datenblatt des Werkstofflieferanten [52] überein. Die ermittelten Elastizitätsmoduln von 211,5 GPa (roboterbasierte Kraftregelung) und 215,1 GPa (roboterbasierte Positionsregelung) überschreiten die im Werkstoffdatenblatt angegebenen Referenzwerte. Die Ursache dieser Abweichung konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht abschließend geklärt werden. Das Hauptziel besteht jedoch darin, die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Versuchsaufbauten und -methoden zu gewährleisten, und nicht darin, die mechanischen Eigenschaften zu bestimmen. Während der Prüfungen wurde darauf geachtet, die Konsistenz zwischen den roboterbasierten und den konventionellen Zugversuchsaufbauten aufrechtzuerhalten. Dies beinhaltete die Verwendung des gleichen Bildkorrelationssystems (ATOS 5), identischer Objektive und somit des gleichen Messabstandes. Um einen aussagekräftigen Vergleich zu ermöglichen, wurde das Specklemuster mit der gleichen Methode aufgebracht und wies damit eine einheitliche Form auf. Außerdem wurde bei allen Zugversuchen die gleiche Auflösung (0,18 mm/Pixel) und Einschnideabweichung (unter 0,1) verwendet. Zusätzlich wurde die im konventionellen Prüflabor beobachtete hohe Standardabweichung untersucht. Es wurde festgestellt, dass bei einer von den vier getesteten Proben der Elastizitätsmodul (216,1 GPa), die Zugfestigkeit (656,9 MPa) und die Bruchdehnung (48,8 %) eine signifikant hohe Abweichung aufweisen. Die anderen Proben ergaben deutlich konsistentere Ergebnisse. Daher wurden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung nur mit den drei

verbleibenden Proben neu berechnet, was zu einem E-Modul $E = 196,0 \pm 1,7$ GPa, einer Zugfestigkeit $R_m = 672,9 \pm 1,2$ MPa und einer Bruchdehnung $A_t = 54,6 \pm 0,69$ % führte.

Die Auswertung der Positionsabweichungen zeigt, dass der Prüfmodus der Universalprüfmaschine am ehesten der Positionsregelung der Roboterprüfung entspricht. Für diese beiden Fälle stimmen die experimentell ermittelten Werte innerhalb der Fehlergrenzen überein. Darüber hinaus stimmt der Verlauf der klassischen Prüfung im linear-elastischen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagramms mit dem der roboterbasierten Prüfung überein (siehe Abbildung 4.1). Bei Spannungen nahe der Zugfestigkeit ist eine leichte Abweichung zwischen den Kurven zu erkennen. Da die Universalprüfmaschine im positionsgeregelten Modus arbeitet, kommt es wahrscheinlich zum Aufbau von Querkräften, ähnlich wie beim positionsgeregelten roboterbasierten Versuchsaufbau (blaue Kurve in Abbildung 4.3). Aufgrund der gemessenen Positionsabweichungen in x- und y-Richtung (orangene Kurve in Abbildung 4.2) kann davon ausgegangen werden, dass die Querkräfte beträchtlich, aber nicht genau bekannt sind, da der Kraftsensor der Universalprüfmaschine nur einachsiger ist. Es ist bekannt, dass einachsige Kraftsensoren durch überlagerte Querkräfte stark beeinflusst werden, was sich auf das tatsächliche Messergebnis auswirkt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die verbleibende Abweichung ein tatsächlicher Fehler des Kraftsensors in der Universalprüfmaschine ist und nicht durch den roboterbasierten Versuchsaufbau verursacht wird.

Abbildung 4.2 zeigt, dass die Positionsregelung für eine quasistatische einachsige Prüfbewegung realisiert werden konnte. Alle Positionsabweichungen quer zur Belastungsrichtung können erfolgreich kompensiert werden. Dadurch treten weniger Querkräfte auf als ohne Sensorregelung. Die Kraftregelung kann erfolgreich realisiert werden, da alle Querkräfte kompensiert werden können (siehe Abbildung 4.3). Die Abweichungen quer zur Lastrichtung (in x- und y-Richtung) können im Vergleich zur Positionsregelung durch die interne Robotersteuerung deutlich reduziert werden.

4.1.2. Variation der Lastvektor Position

Ergebnis

Mit den drei durchgeführten Lastfällen am Fahrradrahmen wird gezeigt, dass die Lage des Lastvektors am Bauteil flexibel variiert werden kann. Dies bedeutet, dass ein komplettes Lastenheft in einem Versuchsaufbau abgeprüft werden kann. Alle drei Positionen wurden erfolgreich positions- und kraftgeregelt getestet. Für alle Lastfälle gilt: Bei der Positionsregelung stellen die Positionsabweichungen quer zur Prüfrichtung (in x- und y-Richtung) zwischen der Mitte der Prüfvorrichtung und der Mitte des Sitzrohrs bzw. Steuerrohrs des Fahrradrahmens die Regelgrößen dar. Bei der Kraftregelung sind es die Querkräfte F_x und F_y . In beiden Fällen ist das Ziel der Regelung, die jeweiligen Regelgrößen aktiv auf den Sollwert 0 (mm bzw. N)

zu führen. Im Folgenden wird nacheinander auf die Ergebnisse der einzelnen Lastfälle eingegangen.

Bei Lastfall Nummer 1 wird seitlich gegen das Sitzrohr mit einer maximalen Kraft F_z von etwa -500 N gedrückt. Abbildung 4.4 zeigt das Ende der Prüfung. Die Bilder wurden mit dem optischen Messsystem ATOS 5 aufgenommen. Die gemessenen Verschiebungen des Fahrradrahmens sind als Pfeile dargestellt, die mit den entsprechenden optischen Markierungen (Referenzpunktmarker) verbunden sind. Die Pfeilrichtung gibt die Richtung der Verschiebung an, die Farbkodierung die Größe. Die Pfeillängen sind skaliert und dienen der Veranschaulichung, sie entsprechen nicht der realen Verschiebung. Die maximale Verschiebung (rote Pfeile) tritt in der Nähe des Krafteinleitungspunktes auf. Sie beträgt 0,75 mm für die Positionsregelung (Abbildung 4.4A) und 0,55 mm für die Kraftregelung (Abbildung 4.4B) bei gleicher Belastung. Die Pfeilrichtungen der Kraftregelung (Abbildung 4.4B) zeigen deutlicher in Prüfrichtung (z-Richtung) und weisen einen geringeren negativen y-Anteil auf als die Pfeile der Positionsregelung (Abbildung 4.4A).

Die Kräfte und Drehmomente am Ende der Prüfung sind ebenfalls in Abbildung 4.4 dargestellt. Beim kraftgeregelten Versuch (Abbildung 4.4B) sind die Querkräfte kompensiert und konvergieren gegen 0 N. Drehmomente treten nur in y-Richtung mit -1,9 Nm auf. Beim positionsgeregelten Versuch (Abbildung 4.4A) hingegen sind die Querkräfte und Drehmomente am Ende des Versuchs wesentlich höher als im kraftgeregelten Versuch. Für die Kraft in x-Richtung beträgt diese zum Beispiel -35,8 N, während sie im kraftgeregelten Versuch nur -2,1 N beträgt.

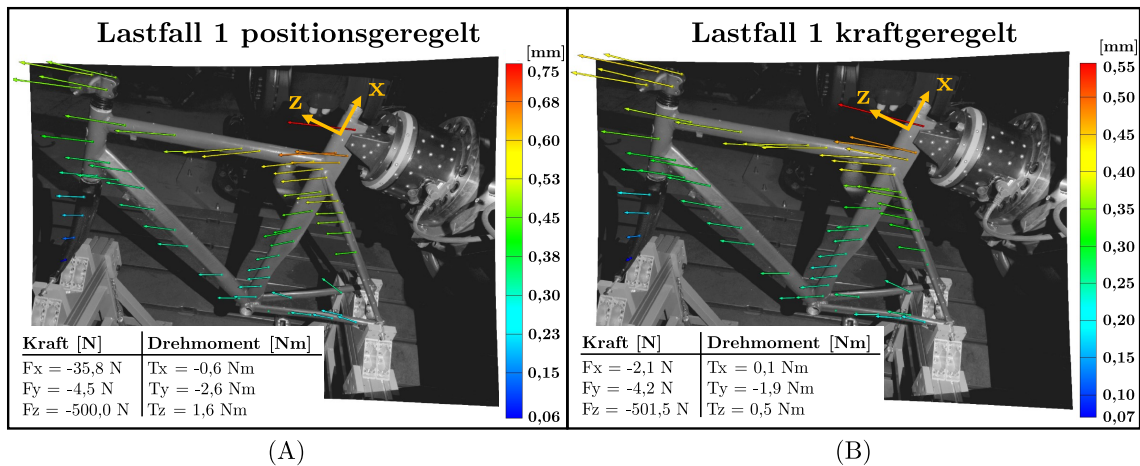


Abbildung 4.4.: Fahrradrahmenprüfung Lastfall 1: Die Druckbelastung von ca. -500 N auf das Sitzrohr mit Hilfe der Positionsregelung (A) bzw. der Kraftregelung (B).

Während des Versuchs werden die Kräfte und Positionsabweichungen in x-, y- und z-Richtung aufgezeichnet. In Abbildung 4.5 sind diese für die Positionsregelung und die Kraftregelung ge-

genüber gestellt. Die blaue Kurve (z-Richtung) gibt dabei die Prüfrichtung an, während x und y jeweils senkrecht dazu verlaufen (siehe Koordinatensystem in Abbildung 4.4).

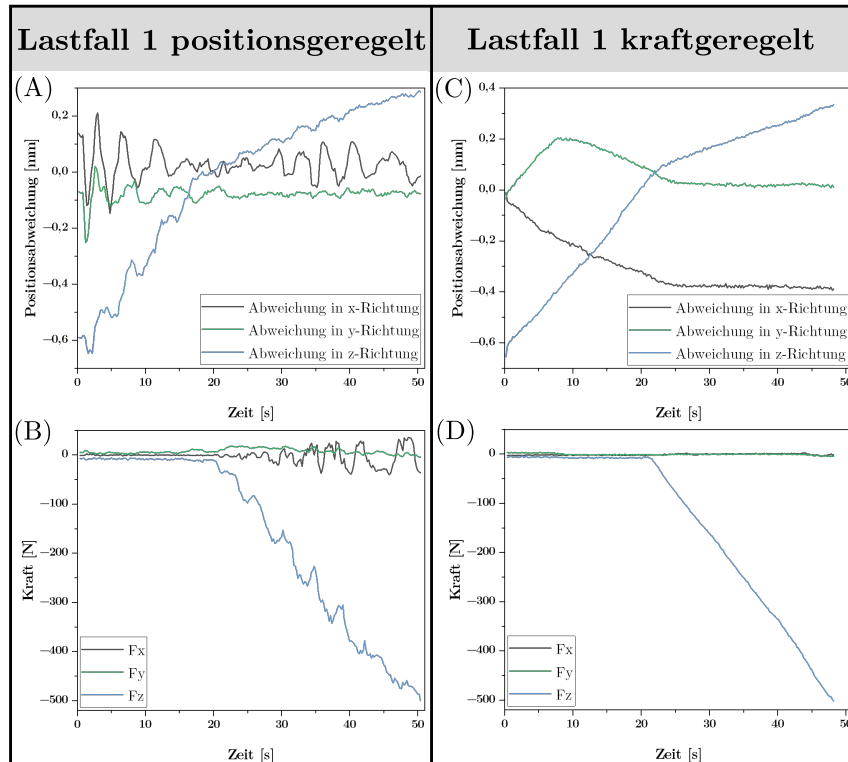


Abbildung 4.5.: Fahrradprüfung Lastfall 1: Jeweils zwei Diagramme, die die Kraft und Abweichung in x-, y- und z-Richtung über die Zeit für die Kraft- und Positionsregelung darstellen.

Im Lastfall Nummer 2 wird eine Druckkraft entlang des Sitzrohrs ausgeübt. Das Ende der Prüfung (Abbildung 4.6) wird bei einer maximalen Last F_z von etwa -2000 N erreicht. Die maximale Verschiebung (rote Pfeile) tritt in der Nähe des Krafteinleitungspunktes auf. Sie beträgt 1,07 mm bei der Positionsregelung (Abbildung 4.6A) und 0,58 mm bei der Kraftregelung (Abbildung 4.6B) bei gleicher maximaler Druckkraft. Die unterschiedlichen Verschiebungen sind auf verschiedene lokale Orientierungen der resultierenden Verformung zurückzuführen. Bei der Kraftregelung (siehe Abbildung 4.6B) kann die Kraft entlang der Achse des Sitzrohrs eingeleitet werden. Diese Art der Krafteinleitung führt zu einer anderen Verformungsrichtung und zu einer geringeren maximalen Verformung. Aufgrund der Geometrie des Fahrradrahmens ist eine größere Steifigkeit zu erwarten, wenn die Kraft in Richtung der Achse des Sitzrohrs eingeleitet wird (d. h. im Fall der Kraftregelung), als wenn die Kraft eine Reaktion auf die Verformung im Fall der Positionsregelung ist.

Die Kräfte und Drehmomente am Ende der Prüfung sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Beim kraftgeregelten Versuch (Abbildung 4.6B) sind die Querkräfte kompensiert und konvergieren gegen 0 N. Drehmomente treten lediglich in x-Richtung auf, mit einem Wert von -17,6 Nm.

Im Gegensatz dazu sind beim positionsgeregelten Versuch die unregulierten Querkräfte und Drehmomente deutlich höher. Die Kraft in x-Richtung beträgt 79,0 N, in y-Richtung -109,7 N. Beide Werte liegen damit deutlich über dem Niveau der Kraftregelung, bei der die Querkräfte im Bereich des Messrauschens unter 1 N bleiben. Es ergibt sich ein deutlicher Unterschied in Belastungsrichtung und Querkräften infolge der unterschiedlichen Regelungsarten.

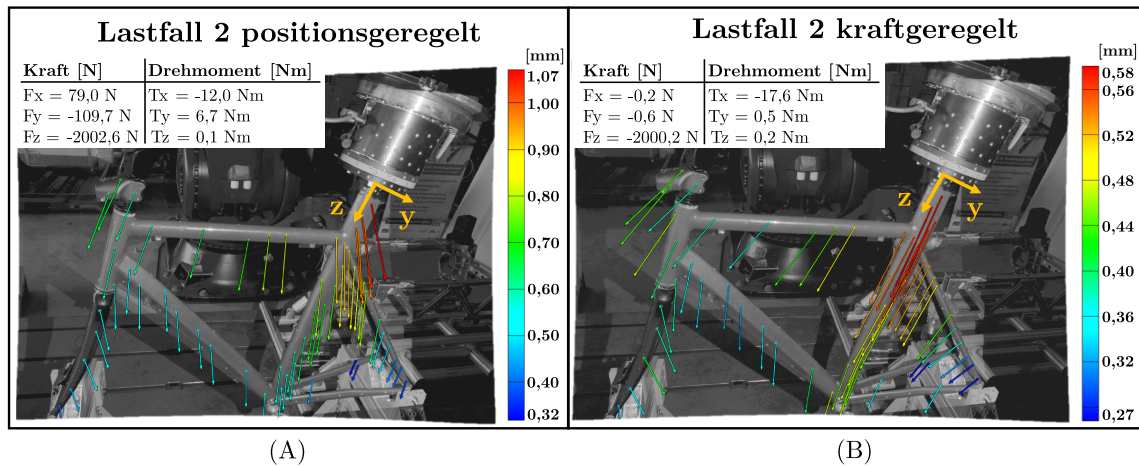


Abbildung 4.6.: Fahrradrahmenprüfung Lastfall 2: Die Druckbelastung von ca. -2000 N auf das Sitzrohr mit Hilfe der Positionsregelung (A) bzw. der Kraftregelung (B). [36]

Auch für den Lastfall 2 sind die Kräfte und Positionsabweichungen in x-, y- und z-Richtung in Abbildung 4.7 für die Wegreglung und die Kraftregelung gegenüber gestellt.

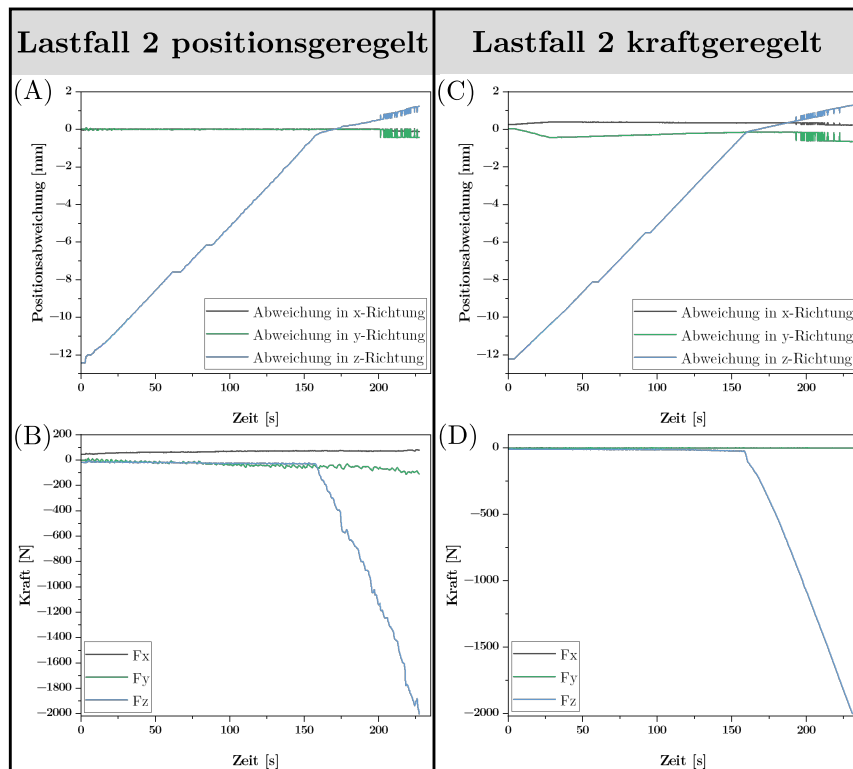


Abbildung 4.7.: Fahrradprüfung Lastfall 2: Jeweils zwei Diagramme, die die Kraft und Abweichung in x-, y- und z-Richtung über die Zeit für die Kraft- und Positionsregelung darstellen.

Die blaue Kurve (z-Richtung) gibt dabei wieder die Prüfrichtung an, während x und y quer dazu verlaufen (siehe Koordinatensystem in Abbildung 4.6).

Im Lastfall Nummer 3 wird eine seitliche Druckkraft auf das Steuerrohr des Fahrradrahmens ausgeübt, wobei die maximale Druckkraft -1000 N beträgt. Die Ergebnisse am Ende des Versuchs sind in Abbildung 4.8 dargestellt. Die maximale Verschiebung tritt in der Nähe des Krafteinleitungspunktes auf und beträgt 1,07 mm bei der Positionsregelung (Abbildung 4.8A) sowie 0,55 mm bei der Kraftregelung (Abbildung 4.8B). Auch in diesem Lastfall zeigt sich ein deutlicher Unterschied in der Richtung der Verschiebungsvektoren zwischen Weg- und Kraftregelung. Während die Kraftregelung die Prüfrichtung präzise in der z-Richtung (senkrecht zum Steuerrohr) einhält, zeigen die Verschiebungsvektoren im positionsgeregelten Versuch signifikante Anteile in der x-Richtung sowie geringfügige Abweichungen in der y-Richtung. Ein vergleichbares Verhalten zeigt sich bei den Querkraften: Während im positionsgeregelten Versuch die Kraft in x-Richtung am Ende des Versuchs -99,4 N beträgt, liegt sie im kraftgeregelten Versuch in der Größenordnung des Messrauschens von weniger als 1 N. Auch in y-Richtung zeigt sich dieser Unterschied deutlich mit -31,0 N bei der Positionsregelung gegenüber einem Wert im Bereich des Messrauschens bei der Kraftregelung. Diese Ergebnisse verdeutlichen erneut die höhere Genauigkeit der Kraftregelung in der Einhaltung der Prüf-

richtung und heben gleichzeitig die Einschränkungen der Positionsregelung bei der Prüfung des Fahrradrahmens hervor.

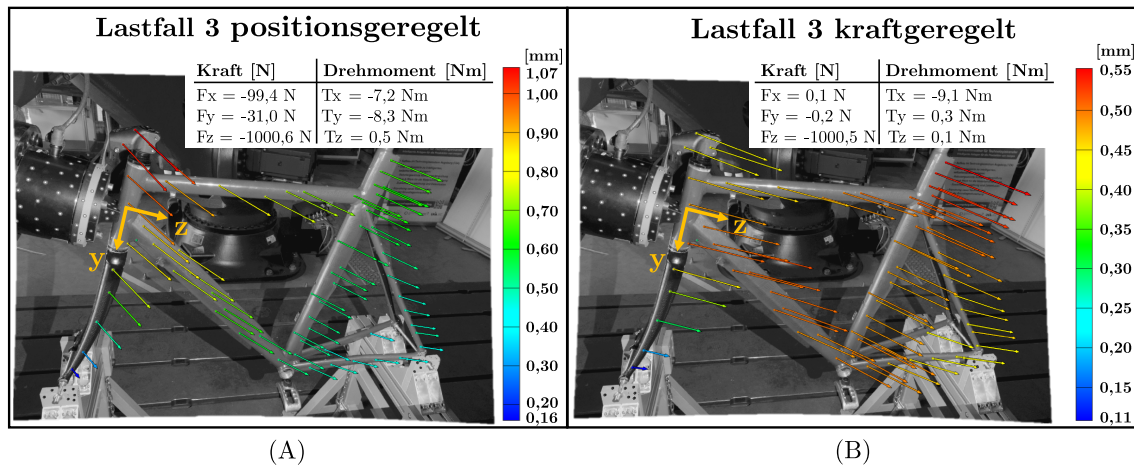


Abbildung 4.8.: Fahrradrahmenprüfung Lastfall 3: Die Druckbelastung von ca. -1000 N auf das Steuerrohr mit Hilfe der Positionsregelung (A) bzw. der Kraftregelung (B).

Die Kräfte und Positionsabweichungen in x-, y- und z-Richtung für Lastfall 3 sind in Abbildung 4.9 sowohl für die Positionsregelung als auch für die Kraftregelung dargestellt. Dabei repräsentiert die blaue Kurve erneut die Prüfrichtung in z-Richtung, während die Achsen x und y die quer dazu verlaufenden Richtungen beschreiben (siehe Koordinatensystem in Abbildung 4.8).

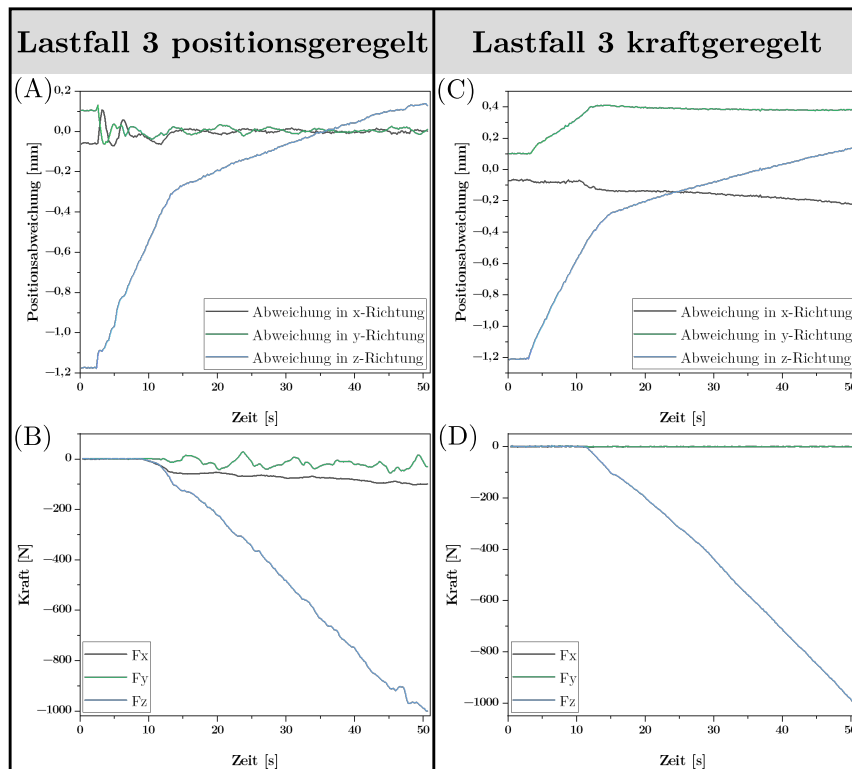


Abbildung 4.9.: Fahrradprüfung Lastfall 3: Jeweils zwei Diagramme, die die Kraft und Abweichung in x-, y- und z-Richtung über die Zeit für die Kraft- und Positionsregelung darstellen.

Bei der Kraftregelung zeigt sich über alle drei Lastfälle ein linearer Verlauf der Kraft F_z (siehe Abbildungen 4.5, 4.7 und 4.9). Diese folgt bei der Positionsregelung einem linearen Trend, ist aber vor allem in Lastfall 1 größeren Schwankungen ausgesetzt (Abbildung 4.5). Zwischen den Regelungsarten sind Unterschiede in den jeweiligen Regelgrößen erkennbar. So weist die Positionsabweichung bei der Positionsregelung einen konstant niedrigen Verlauf nahe 0 mm und geringere Schwankungen auf als bei der Kraftregelung. Bei den Querkraften verhält es sich ähnlich. Dort weist die Kraftregelung die niedrigsten Werte nahe 0 N und konstante Verläufe auf. Dieses Ergebnis zeigt, dass die sensorgeführte Regelung auch bei einer komplexen Geometrie wie dem Fahrradrahmen mit einer hohen Genauigkeit umgesetzt werden kann. In der nachfolgenden Diskussion wird noch genauer auf die Regelgrößen eingegangen.

Diskussion

Die Prüfung des Fahrradrahmens zeigt, dass die roboterbasierte Prüfung auch für komplexere starre Geometrien auf Bauteilebene möglich ist. Ebenso konnten sensorgeführte Bewegungen zur Realisierung von drei unterschiedlichen Lastfällen erfolgreich umgesetzt werden. Der positionsgeregelte Ansatz führt hier zu besonderen Herausforderungen. Aufgrund der komplexen Geometrien der Versuchsaufbauten und des Fahrradrahmens ist die Definition eines

geeigneten Koordinatensystems deutlich erschwert. Daher ist eine neue Methode zur Definition des Koordinatensystems im Bauteil und in der Prüfvorrichtung erforderlich, um eine positionsgeregelte Bewegung zu ermöglichen. Dazu werden die vorhandenen STL-Dateien (Standard Transformation Language) in die Messsoftware für die optische Vermessung importiert. In dieser Umgebung können die für die Bahnsteuerung notwendigen Punkte bestimmt werden, wie z. B. der Krafteinleitungspunkt am Fahrradrahmen oder der Mittelpunkt der Prüfvorrichtung. In jedem dieser Punkte wird ein Koordinatensystem platziert. Insgesamt lässt sich für alle drei Lastfälle feststellen, dass die positionsgeregelten Versuche aufgrund der Herausforderung, einen geeigneten Weg zu definieren, aufwendiger und ungenauer in der Durchführung sind als die kraftgeregelten Versuche. Je nach Prüfvorrichtung ergab sich bei den positionsgeregelten Versuchen eine Abweichung von ca. 1 mm zwischen der in der Messsoftware ermittelten Position und der tatsächlichen Position der Mittelpunkte von Fahrradrahmen und Prüfvorrichtung (Kraftangriffspunkt). Dies konnte mit Hilfe der exakt modellierten formschlüssigen Prüfvorrichtungen ermittelt werden. Die fehlende Kompensation zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen kann ein Grund für die hohen Querkräfte im positionsgeregelten Versuch sein, die in den Abbildungen 4.5, 4.7 und 4.9 dargestellt sind. Diese weisen deutlich höhere Werte im Vergleich zu den positionsgeregelten Zugversuchen auf (blaue Kurve in Abbildung 4.3), was darauf hinweist, dass die Erzeugung einer dreidimensionalen Bewegung mit höheren Herausforderungen verbunden ist, insbesondere wenn es darum geht, unerwünschte Effekte wie Querkräfte zu minimieren. Daher ist die Kraftregelung für die Prüfung komplexer Geometrien besser geeignet, da sie eine direkte Kontrolle des aufgebrachten Lastvektors ermöglicht.

Obwohl die Geometrie des Prüfkörpers bei der Fahrradrahmenprüfung wesentlich komplexer ist als bei den standardisierten Zugversuchen, weist die sensorgeführte Regelung dennoch eine hohe Genauigkeit auf. Dies wird durch die Darstellung der Regelgrößen für alle drei Lastfälle in Abbildung 4.10 veranschaulicht. Die Positionsregelung zeigt die Positionsabweichungen in x- und y-Richtung über die Zeit, während die Kraftregelung die Querkräfte in x- und y-Richtung darstellt. Die Positionsabweichung der Positionsregelung bleibt stets unter 0,2 mm und die Querkraft in der Kraftregelung liegt jederzeit unter 3 N. Insgesamt zeigen alle Diagramme einen konstanten Verlauf der Regelgrößen. Schwankungen von bis zu 1 N sind auf das Messrauschen des Kraft-/Drehmomentsensors zurückzuführen. Diese konnten auch im unbelasteten Zustand in dieser Größenordnung beobachtet werden und sind hinsichtlich großen Messbereichs (bis 50 kN) nicht ungewöhnlich. Bei Diagramm (C) in Abbildung 4.10 ist am Ende der Prüfung eine verhältnismäßig große Schwankung der Positionsabweichung, insbesondere in y-Richtung (0,4 mm), erkennbar. Während der Prüfung konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden. Eine mögliche Erklärung für diese Schwankung könnte die bereits beschriebene Abweichung zwischen der in der Messsoftware ermittelten Position und der tatsächlichen Position der Mittelpunkte von Fahrradrahmen und Prüfvorrichtung (Kraft-

angriffspunkt) sein. Diese Abweichung könnte dazu geführt haben, dass die Prüfvorrichtung beim Einfädeln auf das Sitzrohr nicht exakt positioniert war und sich erst unter einwirkender Kraft zentriert hat.

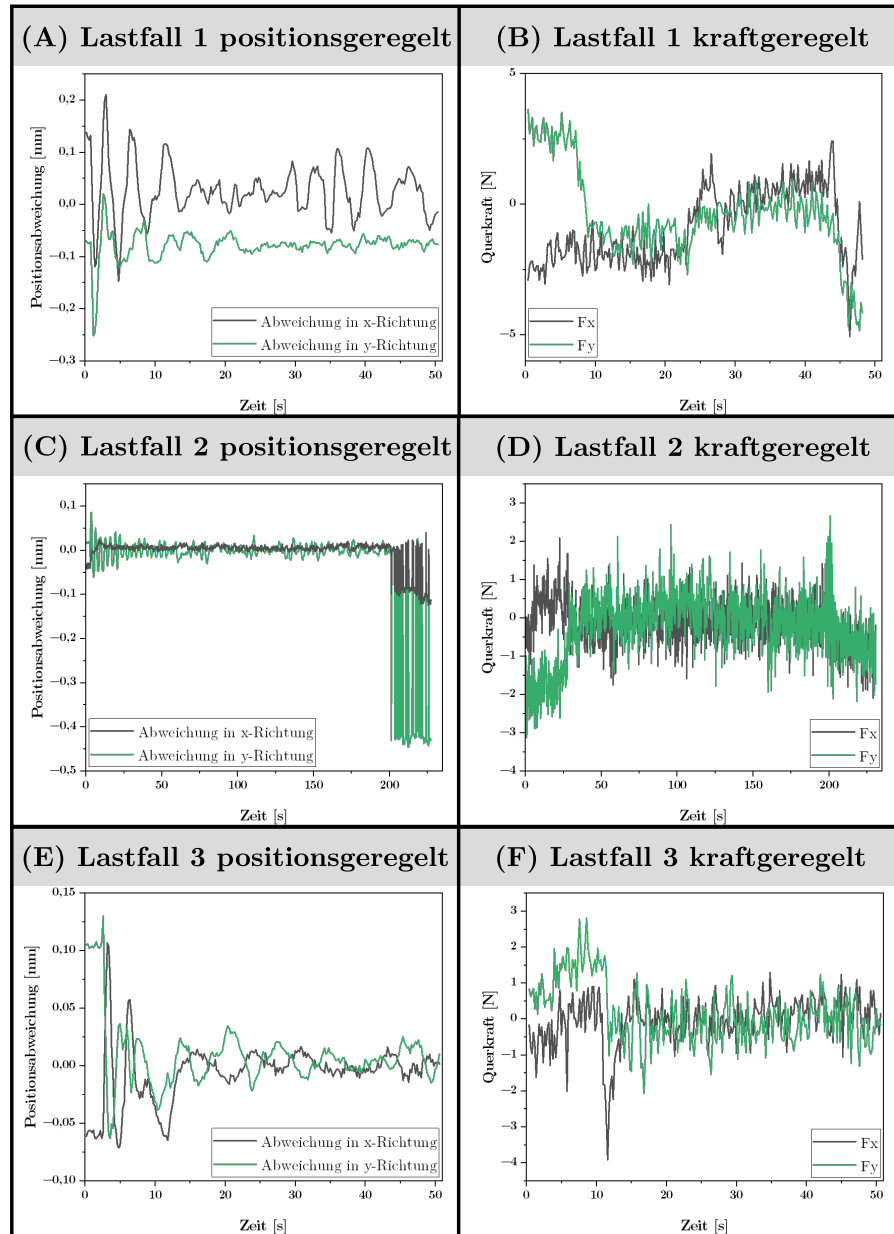


Abbildung 4.10.: Regelgrößen der Fahrradrahmenprüfung für alle drei Lastfälle: Für jeden Lastfall werden zwei Diagramme dargestellt - eines für die Positionsregelung, das die Positionsabweichung in x- und y-Richtung über die Zeit zeigt, und eines für die Kraftregelung, das die Querkraft in x- und y-Richtung über die Zeit darstellt.

4.1.3. Überlagerung von Lastfällen

Ergebnis

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse des reinen Biegeversuchs (Lastfall 1, Abbildung 3.13) und des überlagerten Biege- und Torsionsversuchs am Snowboard (Lastfall 2, Abbildung 3.13) vorgestellt. Wie bereits erwähnt, zeichnet sich das Snowboard durch eine hohe Nachgiebigkeit aus. Dadurch verhält sich das Snowboard anders als der wesentlich steifere Fahrradrahmen und die Zugversuche. Mit zunehmender Nachgiebigkeit des Bauteils steigen die Anforderungen an das Steuerungssystem aufgrund der größeren Verfahrrwege der Industrieroboter (abhängig von der Prüfgeschwindigkeit). Daraus ergeben sich höhere Anforderungen an die Latenz- und Reaktionszeit des Regelsystems. Die Ergebnisse der reinen Biegung (Lastfall 1) für die Position- und Drehmomentregelung sind in Abbildung 4.11 zusammengefasst. Dargestellt sind Kraft, Drehmoment, Positionsabweichung und Drehwinkel in allen drei Raumrichtungen in Abhängigkeit von der Zeit. Die Drehmomente sind die Regelgrößen für die Drehmomentregelung, die drei Drehwinkel und die Abweichung in x- und y-Richtung sind die Regelgrößen für die Positionsregelung. In beiden Fällen kann gezeigt werden, dass die Regelung erfolgreich durchgeführt wurde. Ähnlich wie bei den Zugversuchen wurden die in Abbildung 4.11 dargestellten Abweichungen zwischen zwei Koordinatensystemen in der Software GOM Correlate unter Verwendung von 6DOF (in x-, y-, z-Richtung und den entsprechenden Drehwinkeln) ausgewertet. Ein Koordinatensystem wurde in der Adapterplatte auf der Seite des Snowboards und ein weiteres Koordinatensystem in der Adapterplatte auf der Seite des Roboter-Endeffektors platziert. Beide Koordinatensysteme befinden sich nahezu an der gleichen Position, so dass in Abbildung 3.13 aus Gründen der Übersichtlichkeit nur ein Koordinatensystem dargestellt ist. Die Abweichung in z-Richtung (Bewegungsrichtung) ist in diesem Fall der Abstand der Koordinatensysteme der beiden Adapterplatten und wird nur der Vollständigkeit halber mit aufgezeichnet (es findet aber keine Regelung statt).

Die Fähigkeit des Systems, den Lastvektor anzupassen, wird durch die reine Biegeprüfung veranschaulicht. Die in Abbildung 4.11 dargestellten Drehwinkel zwischen dem Snowboard und dem Endeffektor des Roboters sind während der Positionsregelung nahezu 0° und können diesen Wert während der Prüfung konstant halten. Das bedeutet, dass der Lastvektor am Ende des Versuchs den gleichen vertikalen Winkel zum Snowboard einnimmt wie zu Beginn des Versuchs. Die Drehwinkel für die Drehmomentregelung zeigen während des Versuchs eine leichte Veränderung (maximal $0,2^\circ$). Es kann jedoch gezeigt werden, dass der Lastvektor auch bei der Drehmomentsteuerung innerhalb dieser Genauigkeit in Echtzeit an die Verformung des Snowboards angepasst werden kann.

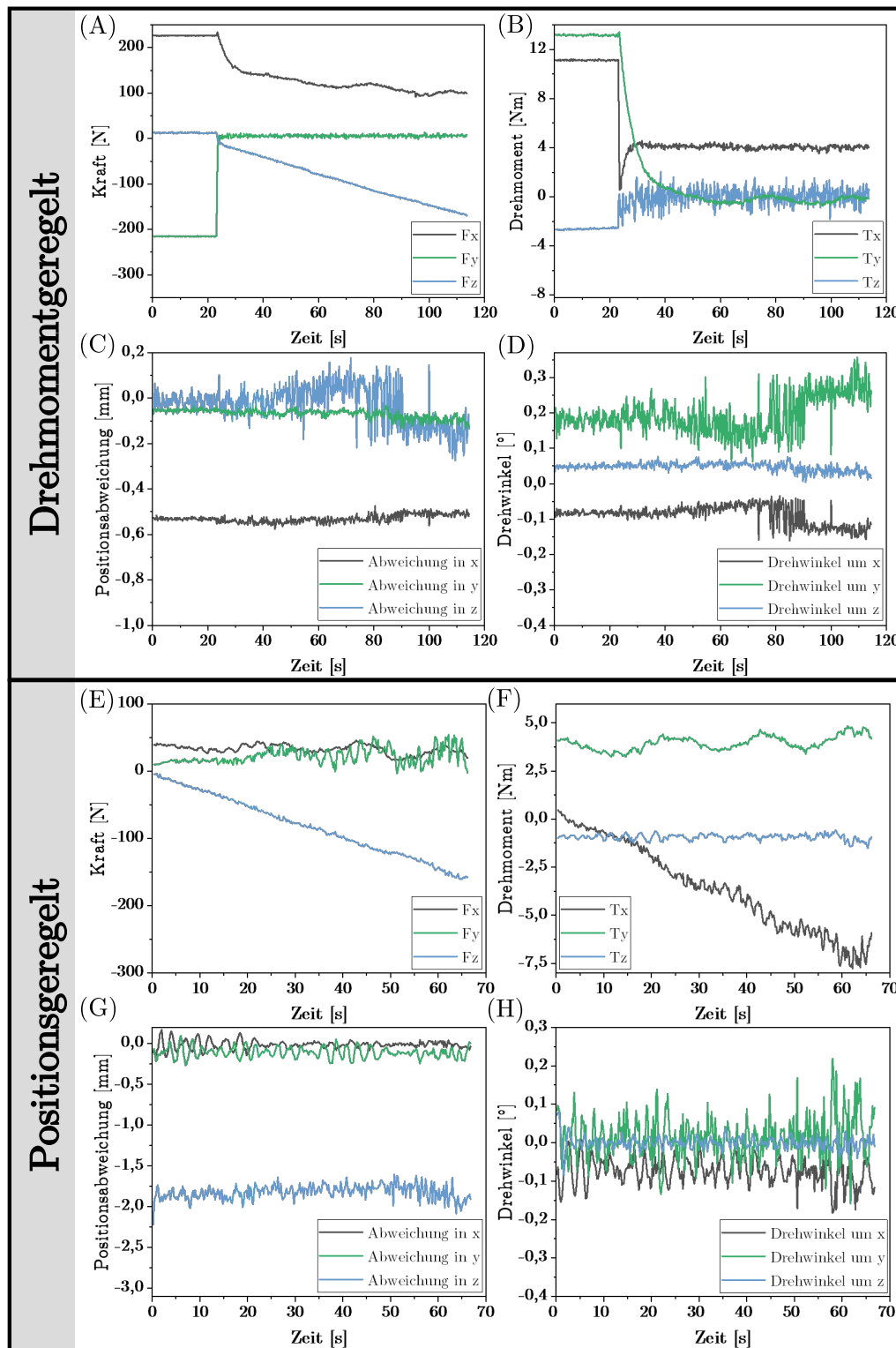


Abbildung 4.11.: Snowboardprüfung reine Biegebelastung: Jeweils vier Diagramme (Kraft, Torsion, Weg, Drehwinkel über der Zeit) für die Drehmomentregelung und die Positionsregelung. [36]

Um eine Drehmomentenregelung zu ermöglichen, wurde im reinen Biegeversuch eine feste Verbindung zwischen der Prüfvorrichtung und dem Snowboard hergestellt. Diese Verbindung verursacht Spannungen, die dazu beitragen, dass die Anfangswerte der Kräfte und Drehmomente deutlich höher ausfallen als bei der Positionsregelung. Sobald die Prüfung beginnt werden diese abgebaut und es kommt zu dem deutlich sichtbaren Sprung in den Kraft- (Abb. 4.11A) und Drehmomentverläufen (Abb. 4.11B) bei circa 25 s. Damit können die Drehmomente während des Versuchs erfolgreich reduziert werden und sind geringer als die bei der Positionsregelung auftretenden Drehmomente. Aufgrund der nicht vorhersehbaren gegenseitigen Beeinflussung der Kräfte und Drehmomente war es nicht möglich, eine gleichzeitige Drehmoment- und Kraftregelung zu realisieren. Aus diesem Grund ist die gegen Ende des Versuchs abnehmende Kraft F_x von ca. 100 N ein vorerst akzeptiertes Ergebnis.

Die Ergebnisse des überlagerten Biege- und Torsionsversuchs sind in Abbildung 4.12 dargestellt. Abbildung 4.12A zeigt die Verschiebung des Snowboards bei der höchsten Kraft und dem höchsten Drehmoment. Die Verschiebung wurde zwischen dem globalen (festen) Koordinatensystem in der Einspannung des Snowboards und dem lokalen (beweglichen) Koordinatensystem in der Adapterplatte, die den Kraft-/Drehmomentsensor am Endeffektor des Roboters und das Snowboard verbindet, bestimmt (siehe Abbildung 4.12). Erwartungsgemäß ist die Verschiebung am freien Ende des Snowboards mit insgesamt 98,62 mm am größten. Die Werte der Kräfte und Drehmomente am Ende der Prüfung sind in Abbildung 4.12 dargestellt.

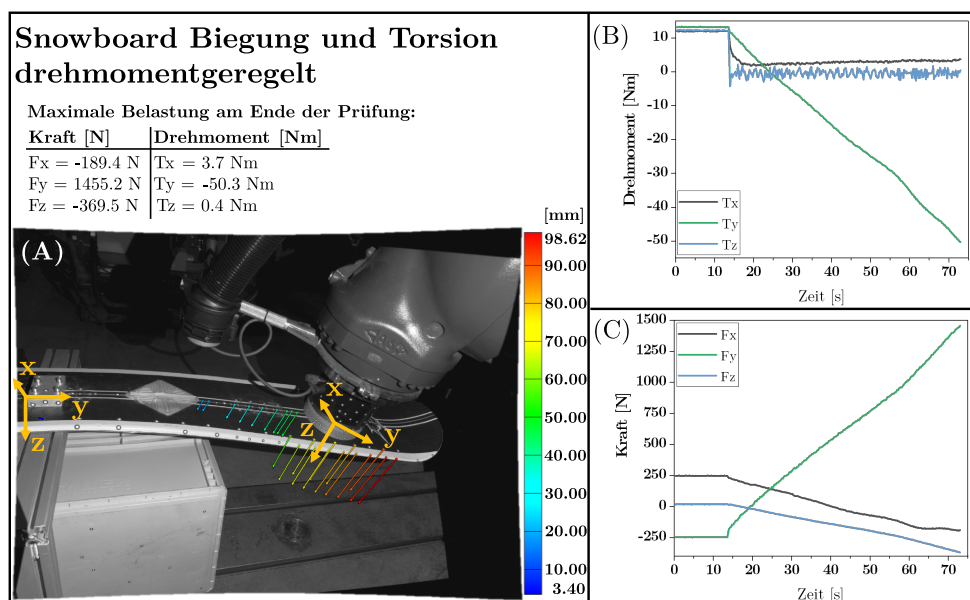


Abbildung 4.12.: Überlagerte Biege- und Torsionsbelastungen bei Snowboardprüfung: Die absolute Verschiebung des Snowboards und die Kraft-/Drehmomentwerte am Ende des Tests (A), die Drehmomentkurven (B) und Kraftkurven (C). [36]

Da sich die Kräfte und Drehmomente gegenseitig beeinflussen, ist es auch in diesem Versuchsaufbau nicht möglich, gleichzeitig Drehmomente und Kräfte auszuregeln. Abbildung 4.12B zeigt alle drei Drehmomentkurven. Der Sprung bei circa 15 s in Abbildung 4.12B und C markiert wieder den Beginn der Prüfung. Der kontinuierliche Anstieg des Drehmoments T_y ist sichtbar und in der Versuchsdefinition vorgesehen. Die Drehmomente T_x und T_z werden durch die Regelung kompensiert. Abbildung 4.12C zeigt den Kraftverlauf für alle drei Raumrichtungen. Hier steigt F_y durch den Einfluss der Drehmomente kontinuierlich an. Aufgrund der Biegebelastung nimmt F_z ebenfalls kontinuierlich ab. Die Kräfte F_x und F_y weisen zu Beginn einen Versatz von circa 200 N auf, bedingt durch die während des Spannvorgangs entstehenden Kräfte. Ebenso sind die Anfangswerte der Drehmomente T_x und T_y auf die feste Einspannung des Snowboards zurückzuführen.

Diskussion

Komplexe zwei- bzw. dreidimensionale Prüfbewegungen in Form von Biegung sowie überlagerter Biegung und Torsion wurden mit dem beschriebenen Snowboard-Versuchsaufbau realisiert. Für den positionsgeregelten Biegeversuchsaufbau ist keine feste Verbindung zwischen den beiden Prüfadaptern erforderlich. Das bedeutet, dass eine Verschiebung des oberen Prüfadapters relativ zum unteren Prüfadapter sofort sichtbar und messbar ist. Im Gegensatz zu den Versuchen am Fahrradrahmen wurden die zylindrischen Prüfkörper am Snowboard und am Endeffektor des Industrieroboters mit einem taktilen Messverfahren genau vermessen. Das bedeutet, dass die Genauigkeit der Positionsregelung von der Komplexität der Geometrie der Prüfvorrichtung und des Bauteils abhängt. Ähnlich wie bei den Zugversuchen treten auch hier konstant geringe Abweichungen auf (Drehmomentregelung: -0,5 mm in x-Richtung, Positionsregelung: -2,0 mm in z-Richtung). Die Koordinatensysteme befanden sich zu Beginn des Versuchs nicht auf gleicher Höhe, da das Snowboard aufgrund der einseitigen Einspannung bereits zu Beginn eine Durchbiegung durch das Eigengewicht aufweist. Außerdem waren beim drehmomentgeregelten Snowboardversuch die Adapterplatten zwischen Roboter-Endeffektor und Snowboard fest verbunden. Beim positionsgeregelten Versuch liegen die Platten dagegen nur lose aufeinander. Daher ist der Abstand zwischen den Adapterplatten (und damit die Abweichung in z-Richtung) bei dem positionsgeregelten Versuch etwas größer. Trotzdem konnte keine relevante Abweichung festgestellt werden (siehe Abbildung 4.11). Ebenso konnte keine Änderung des Drehwinkels während des Versuchs festgestellt werden (siehe Abbildung 4.11). Der Lastvektor kann also während der Verformung des Snowboards sehr genau verfolgt werden. Dies zeigt, dass die roboterbasierte Prüfung die Echtzeitanforderungen eines Komponententests erfüllt und der Regelkreis trotz der hohen Flexibilität und Nachgiebigkeit des Bauteils korrekt arbeitet.

Die gewünschte Überlagerungsbelastung aus Biegung und Torsion kann mit der Prüfung des Snowboards erfolgreich realisiert werden. Mit der Drehmomentregelung kann eine definierte

Last auf ein flexibles Bauteil aufgebracht werden. Diese Versuche dienen nur als Beispiel und zeigen, dass der Ansatz auch auf andere Überlagerungslastfälle übertragbar ist.

4.1.4. Multi-Roboter Prüfung

Ergebnis

Im Folgenden werden die Ergebnisse des vierten und letzten Anwendungsfalls vorgestellt. Dieser stellt gleichzeitig die erste Multi-Roboter Prüfung dar. Das bedeutet eine Komponente wird von zwei oder mehr Robotern gleichzeitig geprüft. In diesem Versuch handelt es sich um eine Automobilkomponente, einen sogenannten Hilfsrahmen, der mit zwei Robotern kraft-geregelt geprüft wird. Dabei werden die Querkräfte (F_x und F_y) und Drehmomente (T_x , T_y und T_z) auf den Wert 0 N bzw. 0 Nm geregelt. Abbildung 4.13 zeigt die Kraft- und Drehmomentverläufe in x-, y- und z-Richtung über die Zeit für den Lastfall 1. In diesem Lastszenario wird die Prüfung nur mit Hilfe der beiden Roboter durchgeführt ohne zusätzliche Lastaufbringung durch den Linearprüfzylinder.

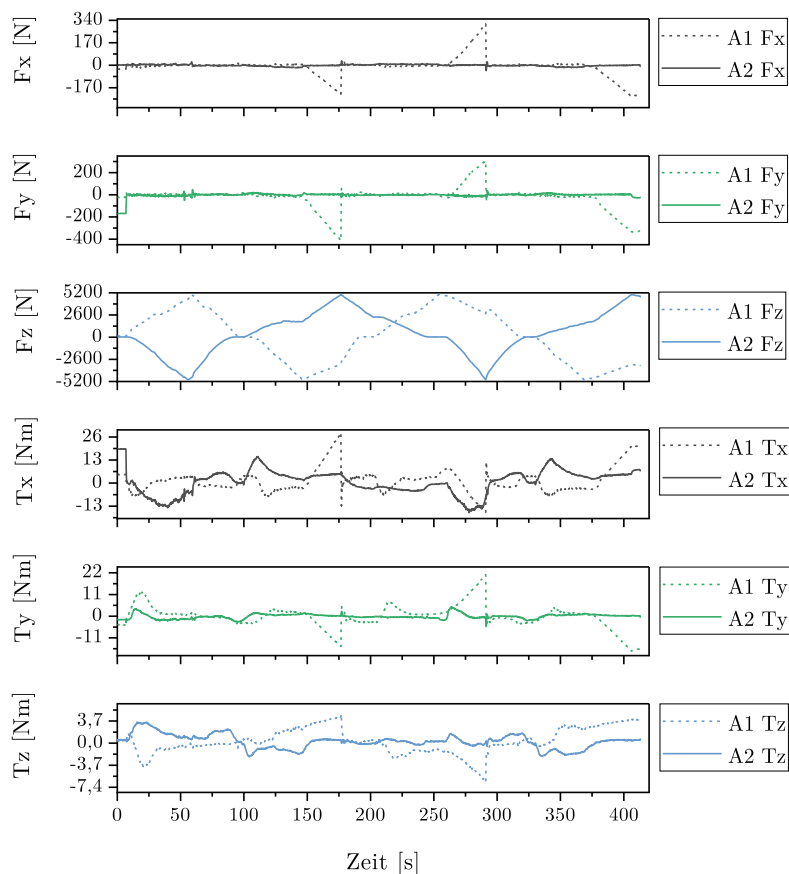


Abbildung 4.13.: Kraft- und Drehmomentverläufe einer kraftgeregelten Prüfung (Lastfall 1) mit zwei Robotern A1 und A2, die den Hilfsrahmen gleichzeitig mit einer Druck- und Zugkraft von jeweils 5000 N (Kraftvektoren gleichgerichtet) belasten.

Die Prüfkraft F_z ist in blau dargestellt. Hier zeigt sich deutlich die wechselnde Belastung durch die beiden Roboter: Beide starten aus einer neutralen Position ohne Kraftaufbringung. Zuerst wird eine Druckkraft von -5000 N durch Roboter A1 und eine Zugkraft von 5000 N von Roboter A2 aufgebracht. Erst wenn beide Roboter die Endposition, die durch das Aufbringen der vorgegebenen Last von +/-5000 N definiert ist, erreicht haben, wird die Krafrichtung umgekehrt. Insgesamt sind vier dieser Krafrichtungswechsel dargestellt. Auffällig sind die großen Peaks in den Querkraftverläufen von F_x und F_y (dunkelgrau und grün), obwohl die Querkräfte auf 0 N geregelt wurden. Dort steigt die Querkraft kontinuierlich an und fällt plötzlich wieder ab. Dieser Querkraftanstieg tritt immer auf nachdem ein Roboter die maximale Kraft von +/-5000 N erreicht hat und endet wenn der zweite Roboter ebenfalls die maximale Kraft erreicht hat. Dementsprechend tritt dieser Effekt viermal auf. Der erste Peak bei circa 50 s fällt wesentlich kleiner aus als die drei nachfolgenden (circa bei 175 s, 290 s, 425 s) und ist daher schwer zu erkennen. Bei den Drehmomentverläufen zeichnet sich ein ähnliches Bild ab. Hier sind die Verläufe generell unregelmäßiger, aber trotzdem sind auch hier die Peaks zur gleichen Zeit wie bei den Querkraftverläufen erkennbar. In der nachfolgenden Diskussion wird ausführlich auf die möglichen Gründe für das Auftreten der Peaks bei den Querkraft- und Drehmomentverläufen eingegangen.

Im zweiten Lastfall erfolgt die Prüfung durch die zusätzliche Einleitung einer quasistatischen Druckkraft von -5000 N mittels des Linearprüfzylinders, wobei alle übrigen Prüfbedingungen unverändert bleiben. Die Steuerung des Linearprüfzylinders erfolgt lagegeregelt mit einer konstanten Geschwindigkeit von 5 mm/min, sodass die Kraft F_z bis zur vorgegebenen Maximalkraft von -5000 N kontinuierlich erhöht wird. Nach Erreichen dieser Maximalkraft verbleibt der Prüfzylinder in dieser Position, ohne weitere Regelung. Abbildung 4.14 zeigt die Kraft- und Drehmomentverläufe in x-, y- und z-Richtung über die Zeit für den Lastfall 2.

Bei den Querkraftverläufen der beiden Roboter zeigt sich ein ähnlicher Verlauf zu Abbildung 4.13. Auch hier sind deutlich die Peaks der hohen Querkräfte und Drehmomente zu erkennen. Diese treten zum gleichen Zeitpunkt auf wie in Lastfall 1, zwischen dem Erreichen der Maximalkraft durch den ersten Roboter und dem Erreichen der Maximalkraft durch den zweiten Roboter. Werden beide Abbildungen miteinander verglichen, hat der Linearprüfzylinder wenig Einfluss auf die Kraft-/ Drehmomentkurven der Roboter, da diese geregelt sind. Andererseits nimmt die ungeregelte Prüfkraft F_z des Prüfzylinders nach dem ersten Krafrichtungswechsel des Roboters A1 deutlich ab bis die maximale Druckkraft von -5000 N erreicht wurde. Das ist realistisch, da der Roboter A1 sich neben dem Linearprüfzylinder befindet (siehe Abbildung 3.15) und so den größeren Einfluss hat als A2. Belastet Roboter A1 den Hilfsrahmen auf Druck entlastet das die Seite des Prüfzylinders, der den Hilfsrahmen ebenfalls auf Druck belastet. Erst nachdem Roboter A2 auch seine maximale Zugkraft erreicht hat, hört F_z des Linearprüfzylinders auf abzunehmen. Anschließend steigt sie wieder an ohne die maximale Prüfkraft von -5000 N wieder zu erreichen.

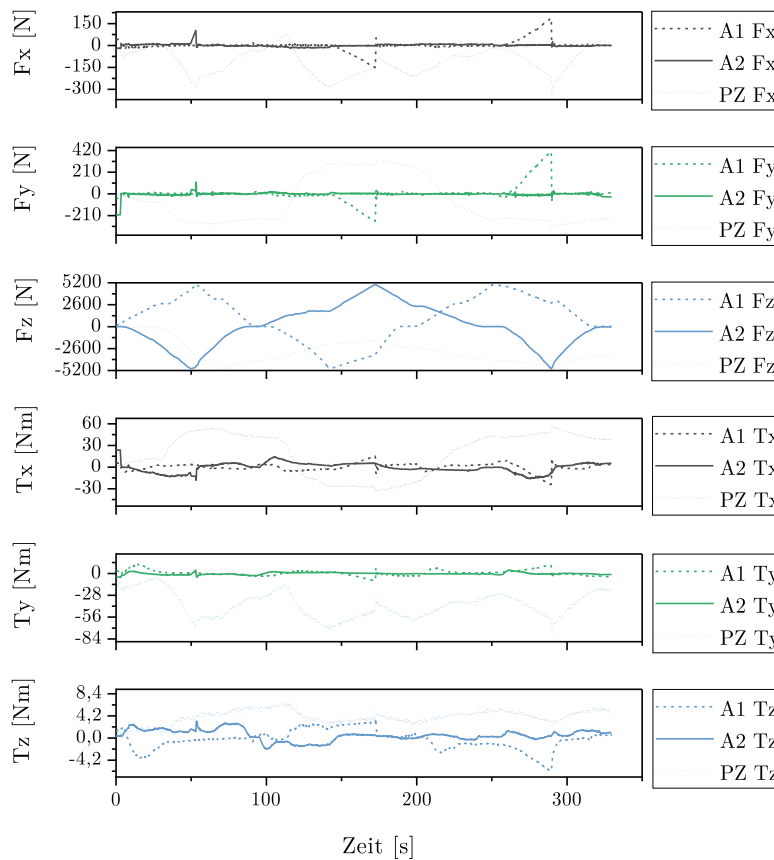


Abbildung 4.14.: Kraft- und Drehmomentverläufe einer kraftgeregelten Prüfung (Lastfall 2) mit zwei Robotern A1 und A2, die den Hilfsrahmen gleichzeitig mit einer Druck- und Zugkraft von jeweils 5000 N (Kraftvektoren gleichgerichtet) belasten, sowie einem Linearprüfzylinder PZ.

Diskussion

Die in den Abbildungen 4.13 (Lastfall 1) und 4.14 (Lastfall 2) dargestellten Querkräfte und Drehmomente zeigen auffällige Peaks, die in zeitlichem Zusammenhang mit den Krafrichtungswechseln der Roboter stehen. Diese Wechsel, in Abbildung 4.15 (Lastfall 1) und 4.16 (Lastfall 2) gekennzeichnet durch orangefarbene Linien, treten an den Stellen auf, an denen die Prüfkraft von -5000 N auf +5000 N (bzw. umgekehrt) umkehren. Eine detaillierte Analyse der Kraft-, Weg- und Geschwindigkeitsverläufe in z-Richtung (siehe Abbildung 4.15 und 4.16) verdeutlicht, dass die Peaks stets innerhalb dieser Phasen der Krafrichtungswechsel auftreten. Die Ursache für dieses Verhalten liegt in der Programmierung der Regelung. Sobald der erste Roboter die Zielkraft von +/-5000 N erreicht, wird seine Regelung ausgesetzt, wodurch die Kraftregelung für diesen Roboter temporär unterbrochen wird. Währenddessen wird der zweite Roboter weiter reguliert, bis auch er die Zielkraft von +/-5000 N erreicht hat. Erst mit Erfüllung dieser Bedingung wird ein neuer Regelzyklus eingeleitet, und die Regelung für beide Roboter wird wieder aufgenommen. In den Phasen, in denen die Regelung des ers-

ten Roboters ausgesetzt ist, entstehen unregelte Querkräfte und Drehmomente, die zu den beobachteten Peaks führen. Die Abbildungen 4.15 und 4.16 zeigen weiterhin, dass in diesen Zeiträumen die Steigung des Weges und die Geschwindigkeit der Roboter in z-Richtung stark abnehmen, bis nahezu Stillstand erreicht ist. Dieses Verhalten lässt darauf schließen, dass die Roboter in diesen Momenten eine Art „Warteposition“ einnehmen, bis die Bedingungen für den nächsten Regelzyklus erfüllt sind.

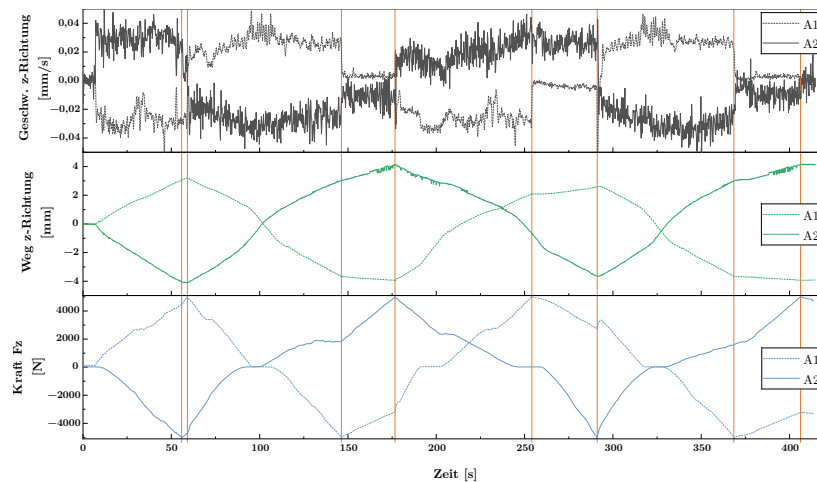


Abbildung 4.15.: Darstellung der Geschwindigkeit, des Weges und der Kraft in z-Richtung über der Zeit für Lastfall 1. Die markierten Krafrichtungswechsel (orange) zeigen Phasen, in denen die Roboter kurzzeitig in einer Warteposition verharren, wodurch die Geschwindigkeit abnimmt und Peaks in Querkräften und Drehmomenten entstehen.

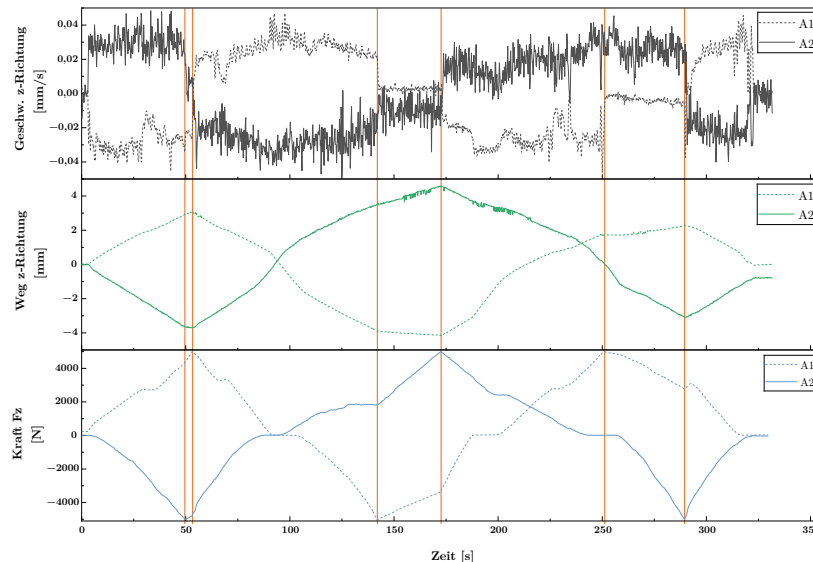


Abbildung 4.16.: Darstellung der Geschwindigkeit, des Weges und der Kraft in z-Richtung über der Zeit für Lastfall 2. Die markierten Krafrichtungswechsel (orange) zeigen Phasen, in denen die Roboter kurzzeitig in einer Warteposition verharren, wodurch die Geschwindigkeit abnimmt und Peaks in Querkräften und Drehmomenten entstehen.

Für den Lastfall 2, in dem zusätzlich eine quasistatische Druckkraft von -5000 N durch den Linearprüfzylinder aufgebracht wird, konnten in den Vergleich der Kraft-, Weg- und Geschwindigkeitsverläufe der Abbildungen 4.15 und 4.16 keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die unregelmäßigen Peaks der Querkraft- und Drehmomentverläufe werden geringfügig beeinflusst, abhängig von der Krafrichtung des Linearprüfzylinders. Die zusätzliche Belastung durch den Linearprüfzylinder hat somit keinen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Querkräfte oder Drehmomente, da die geregelten Verläufe unabhängig von dessen Einsatz weitgehend identisch sind. Dies demonstriert die Zuverlässigkeit und Präzision des Regelsystems, das auch unter Einwirkung zusätzlicher äußerer Belastungen stabile und reproduzierbare Prüfbedingungen gewährleistet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Peaks nicht auf eine Fehlfunktion der Regelung zurückzuführen sind, sondern auf einen Fehler im Programmcode, der das zeitweise Aussetzen der Kraftsteuerung in den Übergangsphasen verursacht. Die Regelung selbst arbeitet in den aktiven Phasen präzise und zuverlässig, was durch den abrupten Abfall der Querkräfte und Drehmomente nach jedem Krafrichtungswechsel belegt wird. Eine einfache Anpassung der Steuerungslogik im Programmcode wird eine kontinuierliche Regelung auch während der Übergangsphasen ermöglichen, wodurch die Ergebnisse verbessert und unerwünschte Querkräfte und Drehmomente zuverlässig minimiert werden können.

Die Multi-Roboter-Prüfung ermöglicht die Simulation realistischer Belastungsszenarien für komplexe Strukturen, ohne dass vollständige Systeme oder Prototypen erforderlich sind. Dadurch können Prüfungen frühzeitig und unabhängig von der Verfügbarkeit des Gesamtsystems durchgeführt werden. Zudem wurde erstmals eine Wechsellast in einer roboterbasierten Prüfung nachgewiesen. Das in vorangegangenen Versuchen entwickelte, auf externer Sensorik basierende Regelsystem wurde erfolgreich auf die Multi-Roboter-Prüfung übertragen und erlaubt die präzise Kontrolle von Querkräften und Drehmomenten. Dies erhöht die Flexibilität bei der Auswahl und Anpassung der Belastungsszenarien und erweitert die Möglichkeiten roboterbasierter Prüfungen.

4.2. Übergreifende Diskussion des roboterbasierten Prüfstandes

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aller vier durchgeführten Versuche zusammengeführt und im Kontext der übergeordneten Zielsetzung des roboterbasierten Prüfstandes analysiert. Dabei liegt der Schwerpunkt auf drei zentralen Aspekten:

Zunächst werden die Universalität und Flexibilität des Prüfstandes anhand der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf unterschiedliche Bauteile und Szenarien bewertet. Hierbei wird insbesondere die Anpassungsfähigkeit des Systems an die variierenden Testbedingungen betrachtet. Anschließend wird die Zuverlässigkeit und Stabilität des Systems untersucht, wobei die Konstanz der Regelung über verschiedene Prüfaufgaben sowie die Genauigkeit der ein-

gesetzten Sensorik und der Datenerfassung im Fokus stehen. Abschließend erfolgt ein Vergleich der verschiedenen Regelungsarten (Positions-, Kraft- und Drehmomentregelung), bei dem die Genauigkeit und Stabilität in den unterschiedlichen Versuchsszenarien gegenübergestellt wird.

4.2.1. Universalität und Flexibilität

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass der roboterbasierte Prüfstand eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Anpassung an unterschiedliche Bauteile und Belastungsszenarien aufweist. Unabhängig von der Geometrie oder Größe der Prüfobjekte konnten die gewünschten Belastungen durch die sensorgeführte Steuerung der Roboter präzise aufgebracht werden. Die Anpassung der Prüfbewegung und Prüfbedingungen an verschiedene Szenarien, wie etwa die Erzeugung verschiedener quasistatischer Belastungen bzw. Lastwechsel, wurde ohne umfangreiche Umbauten oder Änderungen an der Roboterzelle realisiert.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Flexibilität liegt in der Möglichkeit, eine Vielzahl von Belastungsfällen, darunter auch überlagerte Belastungen mit Querkräften und Drehmomenten, in einem einzigen Versuchsaufbau abzubilden. Dies ermöglicht eine effiziente Prüfung und Bewertung unterschiedlichster Komponenten aus verschiedenen Bereichen, ohne dass für jede Komponente ein separater Prüfstand benötigt wird.

Die Untersuchung der verschiedenen Prüfaufgaben zeigt, dass der roboterbasierte Prüfstand insbesondere bei Bauteilen mit komplexen Geometrien, wie der Automobilkomponente, oder bei flexiblen Bauteilen wie beispielsweise dem Snowboard, besonders geeignet ist. Während herkömmliche Prüfverfahren häufig an ihre Grenzen stoßen, wenn Bauteile asymmetrische Strukturen variierende Auflagepunkte oder unterschiedliches Materialverhalten aufweisen, kann der roboterbasierte Prüfstand diese Herausforderungen durch die simultane Bewegung und Regelung sowie der Bewegungsfreiheit beider Roboter erfolgreich meistern. Die Vielfalt der Testszenarien zeigt, dass die Roboterzelle durch ihrer Flexibilität universell eingesetzt werden kann. Ihr Grundaufbau ermöglicht die Anpassung an verschiedene Szenarien, ohne die Funktionalität zu beeinträchtigen.

Zusammenfassend wird gezeigt, dass die entwickelte Roboterzelle nicht nur als universeller Prüfstand für Bauteile unterschiedlichster Form und Größe geeignet ist, sondern auch eine zukunftsweisende Alternative zu konventionellen mechanischen Prüfmethoden darstellt. Damit ergeben sich neue Möglichkeiten für weitere Anwendungen in Forschung und Industrie.

4.2.2. Zuverlässigkeit und Stabilität

Die ausführliche Analyse der Versuche zeigt, dass das entwickelte Prüfstandsystem sowohl mechanisch als auch regelungstechnisch eine hohe Stabilität aufweist. Dies äußert sich in

mehreren Aspekten: der Präzision der aufgebrachten Kräfte und Drehmomente, der Robustheit der sensorgeführten Regelung sowie der Zuverlässigkeit der Sensorik und Datenverarbeitung während der Versuche.

In den Zugversuchen wurden konstante und präzise Kräfte im uniaxialen Belastungsszenario über den gesamten Versuchsverlauf hinweg aufgebracht. Die Regelabweichung der Querkräfte bei der Kraftregelung blieb dabei stets im einstelligen Newtonbereich (siehe Abbildung 4.3), was auf die hohe Genauigkeit der verwendeten Kraftregelung sowie den minimalen Drift und Schwankungen der eingesetzten Kraft-/Drehmomentsensoren hinweist. Selbst bei abrupten Änderungen der Kraftvorgaben, etwa beim Bruch der Probe, zeigte das System ein schnelles und stabiles Regelverhalten ohne Überspringen oder unerwünschte Verzögerungen. Das gleiche Verhalten zeigt sich für die Positionsregelung. Hier betrug die Regelabweichung unter 0,1 mm (siehe Abbildung 4.2). Dies spricht für die hohe Genauigkeit des Positionsregelungssystems und der hohen Messgenauigkeit der verwendeten stereoskopischen Kamera.

Auch bei nicht standardisierten Versuchen und auf Bauteilebene arbeitet das Regelungssystem zuverlässig und präzise. Bei allen drei Lastfällen der Fahrradrahmenprüfung wurden bei der Kraftregelung Querkräfte unter 3 N und bei der Positionsregelung eine Abweichung der Regelgröße unter 0,2 mm festgestellt (siehe Abbildung 4.10)

Bei den komplexeren Belastungsszenarien, wie der Snowboardprüfung, trat die Stabilität der Systemregelung besonders im Umgang mit überlagerten Belastungen zutage. Im drehmomentgeregelten Lastfall der reinen Biegung sowie der überlagerten Biegung und Torsion konnte bei den geregelten Drehmomenten konstant Werte unter 5 Nm erzielt werden (siehe Abbildung 4.11 und 4.12C). Bei der Positionsregelung wurden Positionsabweichungen in x- und y-Richtung von unter 0,3 mm und bei den drei Drehwinkeln von unter 0,2° erzielt. Die Echtzeitfähigkeit der Regelung wurde besonders bei der Snowboardprüfung deutlich, da das flexible Materialverhalten des Snowboards zu einer stetigen Veränderung seiner Position führt und somit besonders hohe Anforderungen an die Reaktionsfähigkeit des Regelsystems stellt.

Im Fall der Automobilkomponente, bei der eine sehr komplexe Geometrie und asymmetrische Auflagepunkte vorlagen, zeigte das System ebenfalls eine hohe Stabilität. Trotz der erhöhten Anforderungen durch die mögliche gegenseitige Beeinflussung der beiden Industrieroboter blieb die Synchronität der Bewegungen und die Regelungsfähigkeit beider Roboter konstant erhalten. Die Querkräfte sowie Drehmomente wurden abgesehen von den Peaks, verursacht durch einen fehlerhaften Programmcode, unter 30 N bzw. 10 Nm gehalten bei einer Prüfkraft von 5000 N.

Die Sensorik verzeichnete hierbei über alle Versuche hinweg nur minimale Drifts und Schwankungen in den erfassten Kraft- und Drehmomentwerten sowie eine durchgehend stabile Signalverarbeitung ohne spürbare Verzögerungen, was die hohe Präzision der Sensoren und die Zuverlässigkeit des Messsystems unterstreicht. Ein weiterer Aspekt der

Systemstabilität betrifft die Echtzeit-Datenverarbeitung und die Kommunikation zwischen der Sensorik, Aktorik und dem Regelsystem. Über alle Versuche hinweg blieb die Übertragungszeit für die Sensor-Feedback-Signale konstant, wodurch eine präzise Regelung ohne zeitliche Verzögerungen gewährleistet wurde. Die Systemarchitektur zeigte dabei keine signifikanten Leistungseinbußen, selbst bei hohen Datenaufkommen während der Testszenarien. Eine Einschränkung ergibt sich durch die Abtastrate der stereoskopischen Kamera, die lediglich 10 Hz beträgt, während der Kraft-/Drehmomentsensor eine Messfrequenz von 250 Hz aufweist. Da die Sensordatenverarbeitung über die RSI-Schnittstelle der Roboter eine Datenrate von 250 Hz erfordert, benötigt eine effiziente Datenverarbeitung Sensorik, die diese Frequenz ebenfalls unterstützt. Dennoch erwies sich die Positionsregelung als ausreichend präzise und zuverlässig für die durchgeführten Prüfungen und erfüllte zudem die Echtzeitanforderungen, die insbesondere an die Snowboardprüfung gestellt wurde. Sollten zukünftige Anwendungen eine höhere Datenverarbeitungsrate erfordern oder von ihr profitieren, besteht jedoch noch Optimierungspotenzial im Hinblick auf die eingesetzte Sensorik zur Positionsregelung.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass der entwickelte roboterbasierte Prüfstand sowohl bei standardisierten Prüfverfahren als auch bei realitätsnahen, komplexen Testszenarien eine hohe Funktionalität und Stabilität aufweist. Damit stellt es eine robuste Plattform für wissenschaftliche Untersuchungen dar, die auch zukünftigen Anforderungen gerecht werden kann.

4.2.3. Vergleich der Regelungsarten

Im Rahmen der Versuche wurde gezeigt, dass die Regelstrategien für Positions-, Kraft- und Drehmomentsteuerung zuverlässig und präzise arbeiten. Insbesondere bei der Positionsregelung wurde über alle Szenarien hinweg eine hohe Wiederholgenauigkeit erreicht. Die Abweichungen zwischen dem vorgegebenen und dem tatsächlich erreichten Weg lagen konstant innerhalb eines engen Toleranzbereichs von maximal 0,3 mm, unabhängig von der Art des Belastungsszenarios. Gleichzeitig zeigte sich jedoch, dass der positionsgeregelte Ansatz insbesondere bei Versuchen mit komplexen Geometrien, wie beispielsweise den Prüfungen am Fahrradrahmen, mit besonderen Herausforderungen verbunden war. Die unregelmäßigen und asymmetrischen Formen der Prüfvorrichtungen und Prüfobjekte erschwerten die Definition eines geeigneten Koordinatensystems erheblich. In diesem Kontext erwies sich die Positionsregelung als aufwendiger zu implementieren und teilweise weniger präzise in der Ausrichtung des Lastvektors im Vergleich zu kraftgeregelten Versuchen. Diese Problematik wurde in Kapitel 4.2 ausführlicher diskutiert. Die Positionsregelung zeigte klare Vorteile bei Anwendungen mit einfacher und symmetrischer Geometrie von Bauteilen und Prüfvorrichtungen, wie beispielsweise bei der Snowboardprüfung. Insbesondere bei Szenarien, in denen keine feste Verbindung zwischen Prüfvorrichtung und Prüfobjekt erforderlich oder ge-

wünscht ist, ermöglicht die Positionsregelung nicht nur eine präzise Durchführung, sondern macht solche Prüfungen überhaupt erst möglich.

Ein präziser und passgenauer Formschluss zwischen der Prüfvorrichtung und dem Prüfobjekt erwies sich als essenziell für eine hohe Regelgenauigkeit bei der Kraft- und Drehmomentsteuerung. Je passgenauer der Formschluss ausfällt, desto präziser können die Kräfte und Drehmomente während des Regelprozesses umgesetzt werden. Dies wurde insbesondere bei den Prüfungen am Fahrradrahmen deutlich, da die Prüfvorrichtungen speziell an die Geometrie des Rahmens angepasst wurden. Dieses Prinzip ist jedoch ebenso auf Prüfscenarien mit festen Schraubverbindungen, wie bei der Snowboardprüfung oder der Prüfung der Automobilkomponenten, übertragbar. Insgesamt wurden bei der Kraftregelung stabile Ergebnisse erzielt, wobei eine hohe Regelgenauigkeit erreicht wurde, selbst bei quasistatischen Lastwechseln.

Die Drehmomentregelung erwies sich als besonders effektiv bei komplexen Belastungszuständen wie überlagerten Lasten. Selbst bei hohen Anforderungen an die Drehmomentregelung konnten die Roboter präzise und stabil agieren. Dies zeigt die Eignung des entwickelten Regelsystems für die Durchführung anspruchsvoller Belastungsszenarien, bei denen die gleichzeitige Regelung mehrerer Parameter erforderlich ist und eine feste Verbindung zwischen Prüfvorrichtung und Prüfobjekt hergestellt werden kann.

Ein interessanter Vergleich ergab sich bei der Betrachtung von Lastfällen mit und ohne zusätzliche Belastung durch den Linearprüfzylinder. Die Ergebnisse zeigten, dass die zusätzliche Krafteinwirkung nur einen marginalen Einfluss auf die geregelten Querkraft- und Drehmomentverläufe hatte. Dies unterstreicht die Robustheit der Roboterregelung, die auch bei zusätzlichen externen Belastungen stabile Prüfbedingungen sicherstellt. Damit konnte gezeigt werden, dass eine zusätzliche Krafteinleitung über den Linearprüfzylinder möglich ist, ohne die Stabilität oder Präzision der roboterbasierten Steuerung zu beeinträchtigen.

Insgesamt konnte durch die vielseitigen Belastungsszenarien und Anwendungsfälle eine umfassende Belastungsprüfung unterschiedlicher Bauteile realisiert werden. Die Möglichkeit, Kraftvektoren präzise zu steuern und auf unterschiedliche Bauteilgeometrien anzupassen, unterstreicht die Eignung des Systems als universellen Prüfstand.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im abschließenden Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst, mit besonderem Fokus auf die vier Testszenarien und deren spezifische Stärken. Ziel ist es, einen umfassenden Überblick über den roboterbasierten Prüfstand zu geben, die damit verbundenen Herausforderungen einzuordnen und dessen Potenziale zu bewerten. Abschließend wird ein Ausblick auf mögliche Optimierungsmöglichkeiten sowie auf weiterführende Entwicklungsansätze gegeben.

5.1. Zusammenfassung	88
5.2. Ausblick	90

5.1. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Machbarkeit und Vielseitigkeit des roboterbasierten Prüfstandes für die mechanische Prüfung verschiedenster Komponenten – von standardisierten Proben bis hin zu komplexen Bauteilen – zu demonstrieren. Die Umsetzung der roboterbasierten Komponentenprüfung wurde in vier verschiedenen Anwendungen erfolgreich demonstriert: Bei Zugversuchen als typische Materialcharakterisierungsaufgabe, bei einem starren Fahrradrahmen, bei einem flexiblen Snowboard und bei einer Automobilkomponente. Dabei handelt es sich nur um Beispiele, die spezifische Anforderungen oder Problemstellungen validieren und ein breites Anwendungsspektrum repräsentieren. Besonders beeindruckend ist die Flexibilität des Systems. Es ermöglicht die Prüfung unterschiedlicher Bauteilgrößen, Materialverhalten und Geometrien des Prüfobjektes. Mit den sechs möglichen Freiheitsgraden können Industrieroboter alle denkbaren Prüfbewegungen ausführen. Um die roboterbasierte Prüfung zielführend umzusetzen, mussten verschiedene technische Herausforderungen gemeistert werden:

- Bei zusätzlich aufgebrachten externen Lasten ist die Positioniergenauigkeit der internen Robotersteuerung für die Anforderungen einer Bauteilprüfung nicht ausreichend genau. Abweichungen von der geplanten Prüfbewegung können zu unerwünschten Querkraften oder überlagerten Drehmomenten während der Prüfung führen.
- Die zu prüfenden Bauteile decken ein breites Spektrum an Materialverhalten ab, von elastisch und verformbar bis hin zu starr.
- Das Regelsystem muss auf nachgiebiges Materialverhalten ebenso reagieren können wie auf plötzlich auftretende Querkraften und Drehmomente, die mit einer Zykluszeit von 4 ms gemessen werden.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, wurden externe Sensoren wie Kraft-/Drehmomentsensoren und digitale Bildkorrelation (DIC) eingesetzt und in das bestehende Steuerungssystem in einem geschlossenen Regelkreis integriert. Diese Methode hat zudem den Vorteil, dass auch relativ geringe Geschwindigkeiten wie z. B. 5 mm/min erreicht werden können, die für die quasistatische Bauteilprüfung erforderlich sind und mit der Standard-Robotersteuerung nicht erreicht werden können. Die roboterbasierte Bauteilprüfung wurde anhand der bereits erwähnten vier Anwendungsfälle erfolgreich validiert. Abbildung 5.1 bietet eine Übersicht der vier Testszenarien und ihren jeweiligen Besonderheiten. Dabei handelt es sich um Beispiele, die spezifische Anforderungen oder Problemstellungen veranschaulichen und validieren und symbolisch für ein breiteres Anwendungsspektrum stehen. Im Folgenden wird näher auf die einzelnen Testszenarien eingegangen.

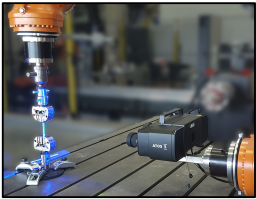
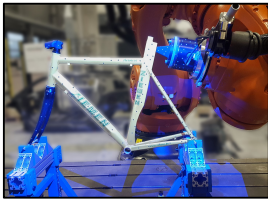
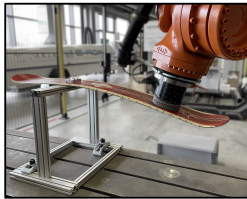
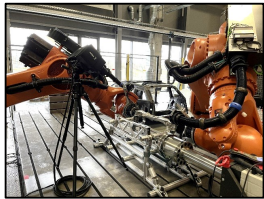
Uniaxiale Spannungszustände ohne Querkräfte  ▪ Zugversuche als Validierung ▪ Vergleich mit Universalprüfmaschine ▪ Möglichkeit der genauen absoluten Positionierung unter Last	Variation der Position des Lastvektors  ▪ Komplexe Geometrie ▪ Drei aufeinanderfolgende Druckprüfungen an verschiedenen Positionen ▪ Abprüfen eines Lastenheftes	Überlagerung von Lastfällen  ▪ Elastisches Bauteil ▪ Überlagerte Belastungen ▪ Biege- und Torsionsversuche ▪ Demonstration einer Echtzeit-Regelung des Lastvektors	Multi-Roboter Prüfung  ▪ Gleichzeitige Aufbringung mehrerer Lasten mit kooperierenden Robotern ▪ Wechselnde Zug- und Druckbelastung ▪ Abbilden eines realistischen Anwendungsszenarios ▪ Einbinden eines zusätzlichen Aktuators
--	--	--	--

Abbildung 5.1.: Zusammenfassung der vier Testszenarien und ihre jeweiligen Charakteristika gegenübergestellt.

Der erste Versuch diente dazu, die geforderte Genauigkeit der Bewegungsrichtung zu validieren und die sensorgeführte Steuerung mit der internen Robotersteuerung zu vergleichen. Ziel war es, mit einem Industrieroboter einen einachsigen Spannungszustand ohne Querkräfte zu erzeugen. Der genormte Zugversuch stellte den Anwendungsfall dar, der einmal roboterbasiert und zum Vergleich in einem klassischen Aufbau mit einer Universalprüfmaschine durchgeführt wurde. Neben der erfolgreichen Validierung konnte gezeigt werden, dass eine genaue Positionierung unter Last mit externen Sensoren möglich ist. Der Einfluss der verschiedenen Regelungsarten (Kraft- und Positionsregelung) wurde im Zusammenhang mit der einachsigen Belastung von Zugprüfkörpern evaluiert und in guter Übereinstimmung mit klassischen Zugversuchen an der Universalprüfmaschine gefunden.

Im zweiten Versuch wurde die Prüfaufgabe von der Proben- auf die Bauteilebene verlagert und damit die Komplexität der Geometrie erhöht. Ziel des Versuchs war es, eine Variation der Position des Lastvektors nachzuweisen. Dies wurde erreicht, indem Druckversuche an drei verschiedenen Stellen eines Fahrradrahmens positions- und kraftgeregelt durchgeführt wurden. Auf diese Weise wurde ein Lastenheft für ein unnachgiebiges Bauteil mit Hilfe einer roboterbasierten Prüfung erfolgreich überprüft.

Im Gegensatz dazu wurde im dritten Testszenario ein flexibles Bauteil getestet, wobei der Schwerpunkt auf der Komplexität des Lastvektors lag, um die Überlagerung von Lastfällen zu demonstrieren. Dies wurde durch die Überlagerung eines Biege- und Torsionsversuchs an einem Snowboard erreicht. Im positionsgeregelten Szenario der reinen Biegung wurde gezeigt, dass der Lastvektor in Echtzeit an die Verformung des Bauteils angepasst werden kann. Das bedeutet, dass der Kraftangriffspunkt und der Orthogonalwinkel des Kraftvektors zwischen Bauteil und Kraftvektor während der Prüfung unverändert bleiben. Die sensorgeführte Prüfbewegung erfüllt somit die spezifischen Anforderungen an die Prüfung eines Bauteils mit hoher Nachgiebigkeit.

Mit dem vierten Versuch kann zum einen ein realistisches Belastungsszenario für die Automobilkomponente simuliert werden, ohne dass das Gesamtfahrzeug auf einer Teststrecke gefahren werden muss, und ermöglicht somit eine frühzeitige Erprobung, ohne dass das Gesamtfahrzeug benötigt wird. Zum anderen wurde erstmals eine Wechsellast in einem derartigen Versuch umgesetzt. Das in den vorangegangenen Versuchen entwickelte, auf externer Sensorik basierende Regelsystem wurde erfolgreich auf den Multi-Roboter-basierten Versuch übertragen. Damit ist es möglich, die Querkräfte und Drehmomente auch in der Automobilkomponentenprüfung zu kontrollieren. Durch die Integration der beiden Industrieroboter in die sensorgeführte Steuerung wurde die Multi-Roboter-Prüfung erfolgreich demonstriert. Außerdem wurde der Linearprüfzylinder erfolgreich in die Prüfung integriert. Damit wird die Flexibilität bei der Wahl des Belastungsszenarios und damit der roboterbasierten Prüfung weiter erhöht.

5.2. Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen und erzielten Ergebnisse zeigen, dass der roboterbasierte Prüfstand ein hohes Potenzial für die flexible und präzise mechanische Prüfung von Bauteilen bietet. Verschiedene Weiterentwicklungsansätze können sowohl die Genauigkeit und Effizienz der Prüfmethoden als auch die Erweiterung des Anwendungsspektrums verbessern.

Ein wesentlicher Entwicklungsschritt betrifft die Automatisierung der Prüfprozesse und die Weiterentwicklung einer flexiblen, adaptiven Prüfvorrichtung, deren Konzepte bereits in Kapitel 3.6 vorgestellt wurden. Die zusätzliche Integration automatisierter Spannmechanismen erhöht die Effizienz des Prüfstandes und erweitert die Einsatzmöglichkeiten für unterschiedlichste Bauteilgeometrien. Ein zentraler Aspekt zukünftiger Entwicklungen ist zudem die vollständige Automatisierung des gesamten Prüfprozesses. Dies lässt sich durch eine spezialisierte Softwarelösung mit benutzerfreundlicher graphischer Oberfläche umsetzen. Diese führt das Prüfpersonal oder den Roboterbediener schrittweise durch die Testvorbereitung – von der CAD-Modellierung des Bauteils über die Definition der Prüfparameter bis zur automatischen Generierung von Bewegungsabläufen und der optimalen Positionierung auf dem Prüfstand. Durch eine solche softwaregestützte Automatisierung lassen sich nicht nur menschliche Fehler reduzieren, sondern auch die Wiederholbarkeit und Effizienz der Prüfabläufe erheblich steigern.

Ein zentraler Aspekt zukünftiger Arbeiten ist die weiterführende Validierung des Kraft-/Drehmomenten-Modells, das bereits in Kapitel 3.5 behandelt wurde. Durch eine größere Anzahl experimenteller Testpunkte und den Abgleich mit dem Kraftmodell KukaForceISO, können die fehlenden Punkte im Arbeitsraum der Roboter interpoliert werden. Damit entsteht ein präziseres Vorhersagemodell, das die maximal verfügbaren Kräfte und Drehmo-

mente im gesamten Arbeitsraum der Roboter beschreibt. Dies optimiert insbesondere die strategische Prüfobjektplatzierung auf dem Spannungsfeld sowie die Bahnplanung und genaue Positionierung der Roboter am Prüfobjekt.

Ein vielversprechender Ansatz ist der verstärkte Einsatz von Simulationsumgebungen zur Offline-Bahnplanung als Alternative zur sensorgeführten Regelung. Die Ergebnisse aus der Bachelorarbeit von Leo Raape [53] zeigen, dass verschiedene Anforderungen, Kriterien und Herausforderungen an die Simulationsumgebung definiert wurden. Dabei wurden die Simulationssoftwares KUKA.Sim, RoboDK und NVIDIA Isaac Sim verglichen. Nach einer sorgfältigen Abwägung der Stärken und Schwächen fiel die Entscheidung auf RoboDK als bevorzugte Simulationsumgebung für die Offline-Bahnplanung. NVIDIA Isaac Sim bietet eine der besten physikalischen Simulationen, ist jedoch wesentlich komplexer in der Handhabung und stößt bei der Simulation flexibler, nachgiebiger Körper an Grenzen. In der Bachelorarbeit von Tobias Thiele [54] wurde untersucht, inwiefern kraftgeregelte Bewegungen innerhalb von NVIDIA Isaac Sim realisiert werden können. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Simulation der Kraftregelung grundsätzlich möglich ist, jedoch noch keine Validierung mit einem realen Prüfaufbau oder einer echten Prüfung vorliegt. Höchstwahrscheinlich kommt die Simulation an ihre Grenzen, sobald flexible Bauteile oder nachgiebige Materialien geprüft werden, da das Materialverhalten weicher Körper nicht präzise vorhergesagt wird. [53, 54]

Zukünftige Entwicklungen könnten sich mit der Verbesserung dieser Simulationsmodelle befassen. Die Forschungsarbeit „ORBIT: A Unified Simulation Framework for Interactive Robot Learning Environments“ von M. Mittal et al. [55] stellt einen innovativen Ansatz vor, um Simulationsumgebungen für robotergestützte Lernprozesse weiterzuentwickeln. ORBIT nutzt NVIDIA Isaac Sim für realistische Simulationen, unterstützt jedoch zusätzlich rigide und deformierbare Körper, was eine Grundlage für genauere Materialmodellierungen bildet. Das Framework ermöglicht die Simulation und das Benchmarking komplexer Aufgaben wie Schranköffnen, das Falten von Textilien oder die Umstrukturierung von Räumen. Es bietet eine modulare Umgebung zur Generierung von Trainingsdaten und zur Entwicklung neuer Robotik-Anwendungen. Eine Erweiterung der Simulation um Modelle zur Vorhersage des Materialverhaltens, insbesondere für weiche Körper, kann hier einen wesentlichen Fortschritt darstellen. Forschungsergebnisse, beispielsweise aus der Arbeit „PokeFlex: A Real-World Dataset of Deformable Objects for Robotics“ von J. Obrist et al. [56], kann hierfür eine wertvolle Grundlage bieten. [55, 56]

Die Erweiterung des Prüfverfahrens von quasistatischen auf zyklische oder dynamische Belastungen stellt eine weitere Herausforderung dar. Zyklische Belastungstests bieten Potenzial, da Industrieroboter für den Dauerbetrieb ausgelegt sind. Dynamische Lasten erfordern jedoch eine präzise Steuerung, um schädliche Belastungsspitzen für Getriebe und Motoren der Roboter sowie das Prüfobjekt zu vermeiden. Die langfristige Belastbarkeit der Roboter unter

zyklischer und dynamischer Beanspruchung kann nur durch experimentelle Untersuchungen verlässlich bestimmt werden.

Neben etablierten Regelungsstrategien auf Basis von Kraft-, Drehmoment- und Positionsregelung kann zukünftig eine Dehnungsregelung mittels digitaler Bildkorrelation (DIC) erprobt werden. Diese Methode ermöglicht es, gezielt einen bestimmten einachsigen oder multiaxialen Spannungszustand im Prüfobjekt zu erzeugen. Die Arbeit von X. Fayolle „Controlling Testing Machines with Digital Image Correlation“ [32] beschreibt einen möglichen Ansatz zur Umsetzung an Prüfmaschinen. Darüber hinaus bietet die Integration hybrider Regelungsmethoden, die Kraft-/Drehmomentsensorik mit optischen Systemen wie 3D-Messsystemen kombiniert, neue Potenziale. Dies kann eine dynamischere Anpassung der Prüfvorgänge ermöglichen, indem beispielsweise optisch erkannte Abweichungen unmittelbar durch eine angepasste Kraft- und Bewegungssteuerung kompensiert werden. Zusätzlich könnten KI-gestützte Algorithmen zur Optimierung des Prüfablaufs beitragen, indem sie aus vorherigen Tests lernen und Bewegungsabläufe effizienter gestalten. Ein adaptives Regelungssystem mit selbstlernenden Mechanismen kann so die Präzision und Effizienz der Prüfungen weiter verbessern.

Ein weiteres Entwicklungsfeld ist die Erschließung neuer Anwendungsbereiche außerhalb der bereits untersuchten vier Testszenarien. Besonders vielversprechend erscheint der Einsatz in der Medizintechnik oder der additiven Fertigung, da hier der Fokus auf individuellen oder kundenspezifischen Produkten (oftmals Losgröße 1) liegt. Insbesondere für medizinische Produkte wie Prothesen oder Orthesen eignet sich die roboterbasierte Prüfung, da diese eine hohe Variantenvielfalt aufweisen und komplexe Lastszenarien abbilden müssen, ohne dabei extreme Kräfte zu erfordern. In der Masterarbeit von Felix Goppel [57] wurde bereits eine Orthese roboterbasiert getestet. Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes kann Beinprothesen einbeziehen, indem reale Gehbewegungen mit 3D-Messsystemen erfasst und in Roboterbewegungen zur realitätsnahen Prüfung übertragen werden. Dies ersetzt Feldversuche mit realen Personen durch effizientere und kostengünstigere Laborversuche.

Die wirtschaftliche Betrachtung des Prüfstandes spielt langfristig eine zentrale Rolle. In der Masterarbeit von Alexandra Pabst [58] wurde ein Wirtschaftlichkeitsmodell entwickelt, das eine Bewertung der ökonomischen Erfolgsaussichten ermöglicht. Das Modell wurde bereits anhand eines Anwendungsbeispiels aus der Medizintechnik erprobt, um wirtschaftliche Potenziale zu evaluieren. Die Analyse zeigt, dass wirtschaftlicher Erfolg realisiert werden kann, wenn wesentliche Kundenanforderungen erfüllt sind – dazu gehören eine ausreichend hohe Prüfkraft, die Möglichkeit zur Durchführung spezifizierter Lastfälle und die Zugänglichkeit der relevanten Krafteinleitungspunkte. Eine Weiterentwicklung dieses Modells könnte dazu beitragen, Marktpotenziale gezielter zu quantifizieren und wirtschaftlich attraktive Anwendungsbereiche systematisch zu erschließen. [58]

Die bisherigen Erkenntnisse zeigen, dass der roboterbasierte Prüfstand ein vielseitig einsetzbares und zukunftsorientiertes Prüfsystem darstellt. Die Weiterentwicklung in den Bereichen simulationsgestützte Bahnplanung, adaptive Prüfaufbauten, erweiterte Regelungsstrategien und neue Anwendungsfelder kann das System weiter optimieren und seine Einsatzmöglichkeiten erheblich erweitern.

A. Anhang

Der vorliegende Anhang zeigt ergänzende technische Dokumentationen, die für diese Arbeit als relevant angesehen werden. Dazu gehören drei technische Zeichnungen sowie ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit den Rohdaten der Zugversuche. Die Abbildungen sind in der nachfolgenden Übersicht aufgeführt.

A.1. Technische Zeichnung Roboteranlage	96
A.2. Technische Zeichnung Adapterplatte	97
A.3. Technische Zeichnung Zugprobe	98
A.4. Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Zugversuche	99

A.1. Technische Zeichnung Roboteranlage

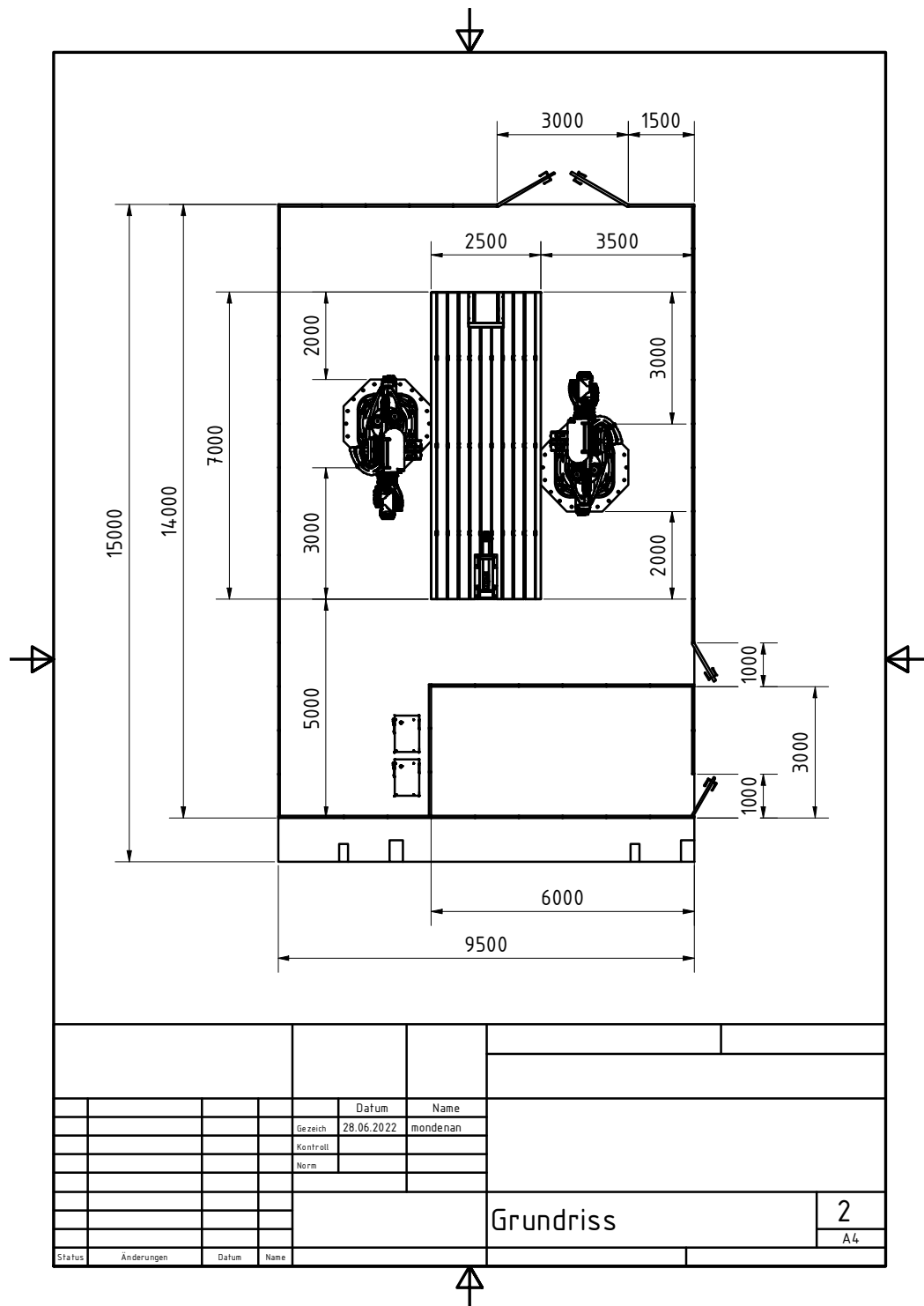


Abbildung A.1.: Technische Zeichnung der kompletten Roboteranlage, erstellt von Dr.-Ing. Andreas Monden und Tobias Strobl.

A.2. Technische Zeichnung Adapterplatte

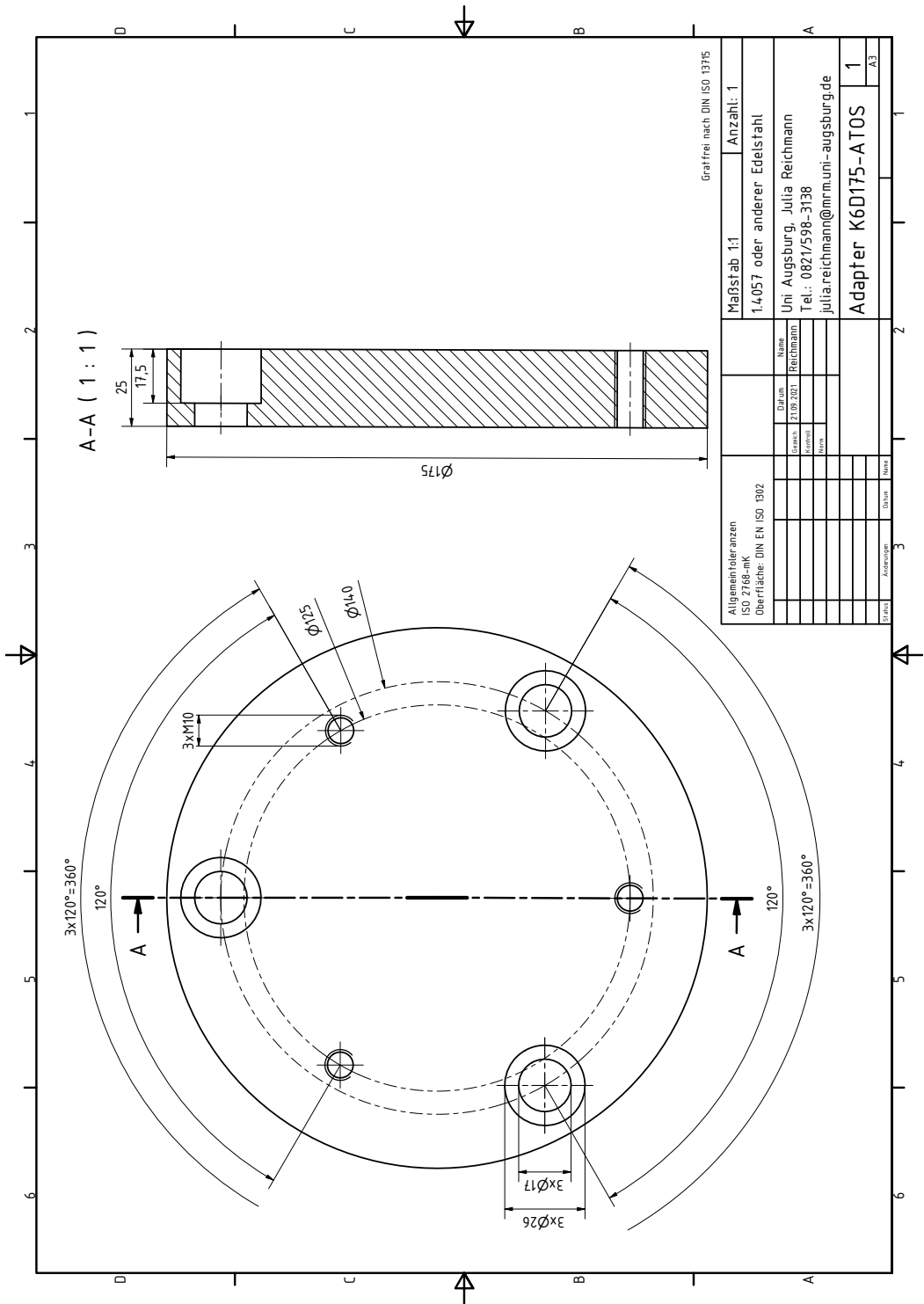


Abbildung A.2.: Technische Zeichnung der Adapterplatte für den Roboterflansch, gefertigt aus Edelstahl oder glasfaserverstärktem Kunststoff.

A.3. Technische Zeichnung Zugprobe

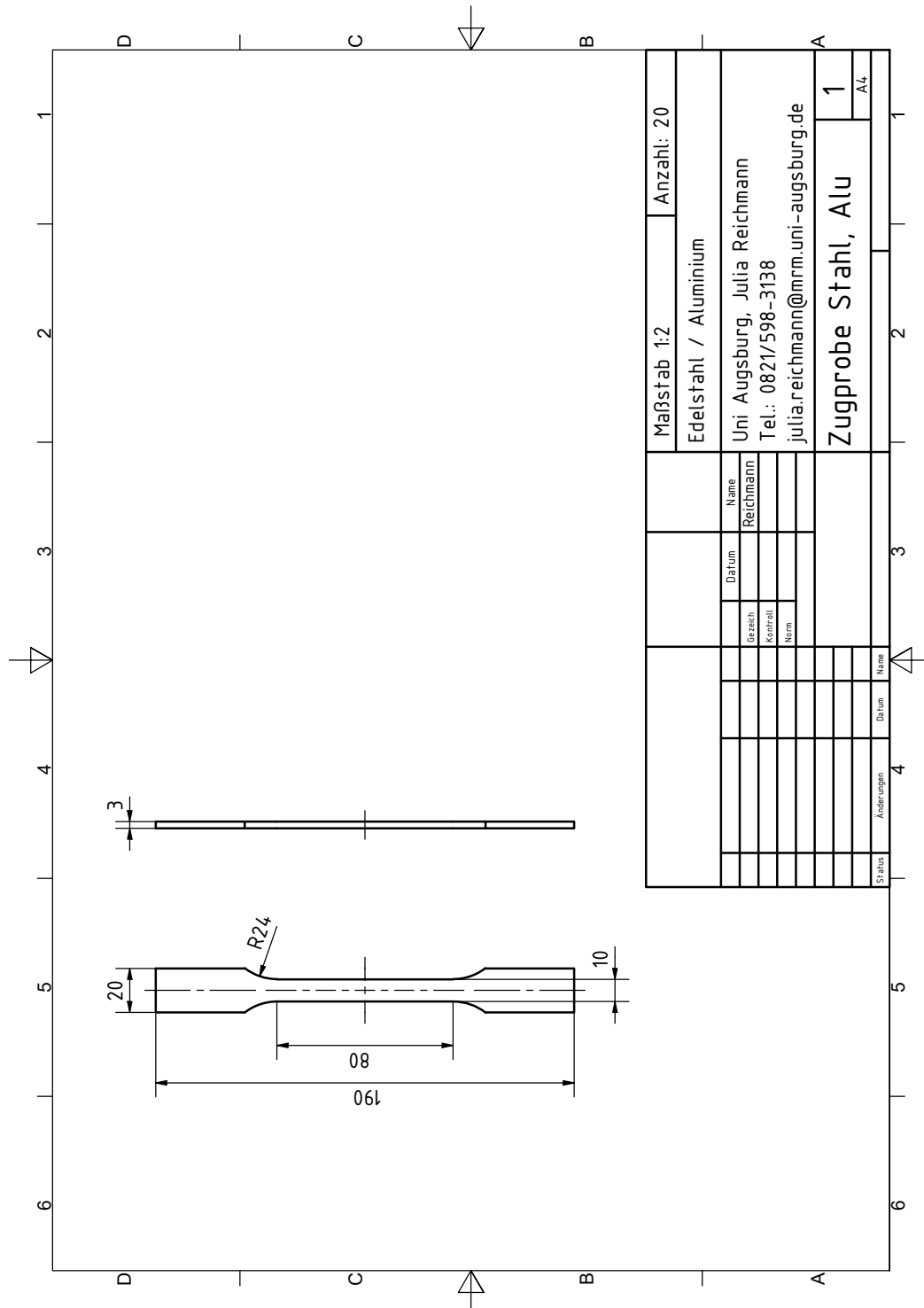


Abbildung A.3.: Technische Zeichnung der Zugprobe aus Edelstahl X5CrNi18-10.

A.4. Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Zugversuche

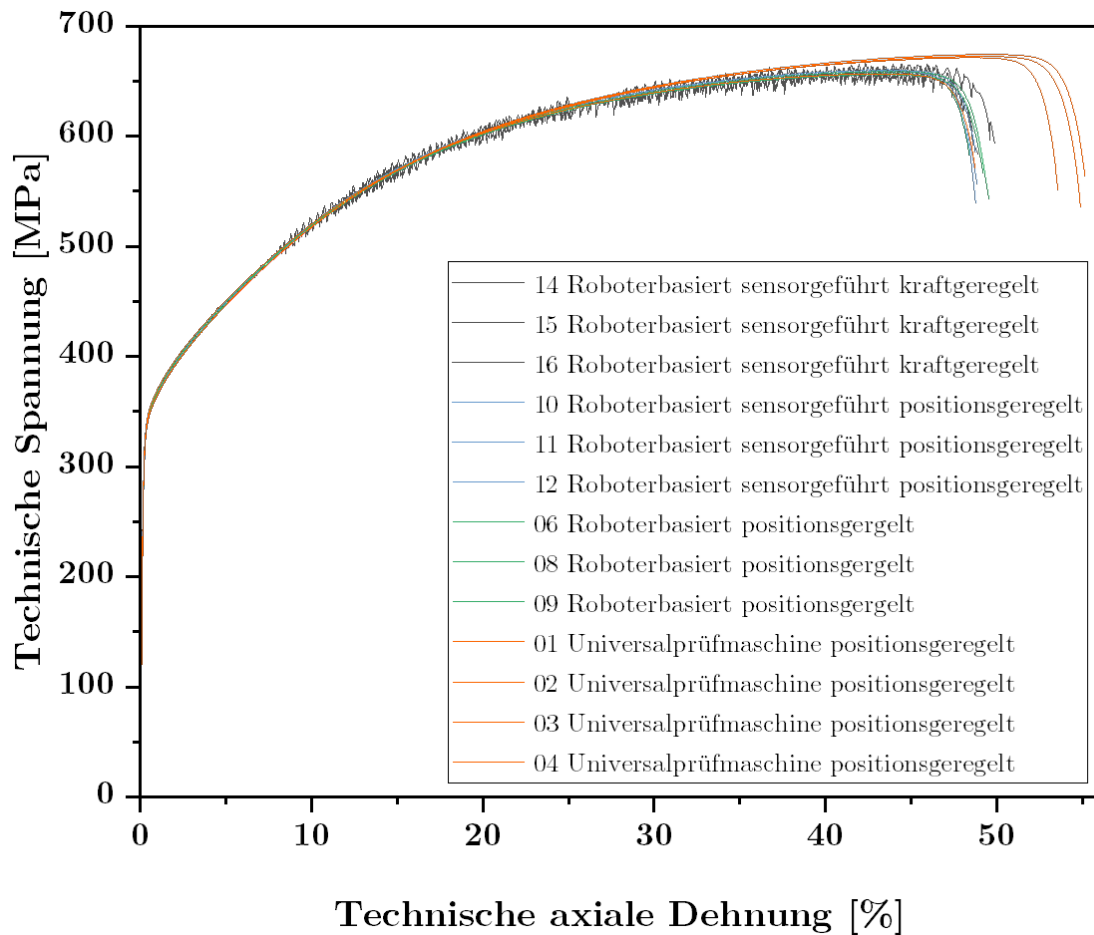


Abbildung A.4.: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Zugversuche (Rohdaten). Sensorgeführte Kraft- und Positionsregelung sowie Positionsregelung gemäß der internen Robotersteuerung und an der Universalprüfmaschine. Bei den roboterbasierten Zugversuchen wurden jeweils drei Proben getestet. Für den Zugversuch im Prüflabor wurden vier Proben betrachtet.

Literaturverzeichnis

- [1] W. Weißbach. *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung: Mit 300 Tafeln ; [Stähle, Gußeisen nach DIN EN-Norm ; Werkstoffkurzzeichen]*. Viewegs Fachbücher der Technik. Vieweg, Braunschweig u.a., 12., vollst. überarb. u. erw. Aufl. edition, 1998.
- [2] K. Schiebold. *Zerstörende Werkstoffprüfung: Mechanisch-technologische Verfahren*. Springer Berlin Heidelberg and Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 1st ed. 2018 edition, 2018.
- [3] R. Gomeriger, R. Kilgus, V. Menges, S. Oesterle, T. Rapp, C. Scholer, A. Stenzel, A. Stephan, F. Wieneke. *Tabellenbuch Metall*. Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe. Verlag Europa-Lehrmittel · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, Haan-Gruiten, 48., neu bearbeitete und erweiterte Auflage edition, 2019.
- [4] H.-J. Bargel, G. Schulze, editor. *Werkstoffkunde*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg and Imprint: Springer, Berlin, Heidelberg, 11th ed. 2012 edition, 2012.
- [5] U. P. Breuer. *Commercial Aircraft Composite Technology*. Springer International Publishing and Imprint: Springer, Cham, 1st ed. 2016 edition, 2016.
- [6] E. Roos, K. Maile, M. Seidenfuß. *Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. Springer Berlin Heidelberg and Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 6th ed. 2017 edition, 2017.
- [7] M. Paulweber, K. Lebert. *Mess- und Prüfstandstechnik: Antriebsstrangentwicklung · Hybridisierung · Elektrifizierung*. Der Fahrzeugantrieb. Springer Fachmedien Wiesbaden and Imprint: Springer Vieweg, Wiesbaden, 1st ed. 2014 edition, 2014.
- [8] T. Wagner, U. Oligschläger, B. Biermann, P. Stommel. Prüfstandstechnik: Von der Anforderung zur Lösung. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 64(10):806–810, 2003. <https://doi.org/10.1007/BF03227127>.
- [9] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo. *Robotics: Modelling, planning and control*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer London and Imprint: Springer, London, 1st ed. 2009 edition, 2009.

- [10] M. Haun. *Handbuch Robotik: Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg and Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2nd ed. 2013 edition, 2013.
- [11] J. Angeles. *Fundamentals of robotic mechanical systems: Theory, methods, and algorithms*. Mechanical Engineering Series. Springer, Cham u.a., 4. ed. edition, 2014.
- [12] ISO 8373:2021(en). Robots and robotic devices - Robotics - Vocabulary. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-3:v1:en>, November 2021. Zugriff am: 14.02.2025.
- [13] J. Mareczek. *Grundlagen der Roboter-Manipulatoren – Band 1: Modellbildung von Kinetik und Dynamik*. Springer Berlin Heidelberg and Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 1st ed. 2020 edition, 2020.
- [14] Carl Zeiss GOM Metrology GmbH. Techguide: Get Started: ARAMIS. https://techguide.zeiss.com/en/gom-software-2022/article/general_get_started_data_aquisition_3d_testing.html, 2022. Zugriff am: 17.02.2025.
- [15] KUKA AG. KUKA.ForceTorqueControl. <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/software/applikationssoftware/kuka-forcetorquecontrol>, 2025. Zugriff am: 17.02.2025.
- [16] R. Damaševičius, R. Maskeliūnas, G. Narvydas, R. Narbutaitė, D. Połap, M. Woźniak. Intelligent automation of dental material analysis using robotic arm with jerk optimized trajectory. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11(12):6223–6234, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02605-8>.
- [17] P. B. Khoi, H. T. Hai, T. M. Thuy. An error compensation controller for milling robots. *Vietnam Journal of Mechanics*, 45(2):105–116, 2023. <https://doi.org/10.15625/0866-7136/16979>.
- [18] C. Ji, J. K. Na, Y.-S. Lee, Y.-D. Park, M. Kimchi. Robot-assisted non-destructive testing of automotive resistance spot welds. *Welding in the World*, 65(1):119–126, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-01002-1>.
- [19] P. Wang, X. Dong, Y. Yang, Y. Cheng. Robot-assisted trajectory planning method for ndt. In *2023 IEEE 6th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, pages 1–6, 2023. <https://doi.org/10.1109/ICPS58381.2023.10128074>.
- [20] M. Gupta, M. A. Khan, B. Ravi, R. M. Singari. Advances in applications of non-destructive testing (ndt): A review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(2):2286–2307, 2022. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1909332>.

- [21] C. Mineo, Y. Javadi. Robotic non-destructive testing. *Sensors*, 22(19), 2022. <https://doi.org/10.3390/s22197654>.
- [22] ZwickRoell GmbH & Co. KG. Roboter-Prüfsystem 'roboTest R'. <https://www.zwickroell.com/de/produkte/automatisierte-pruefsysteme/roboter-pruefsystem-robotest-r/#c3679>, 2025. Zugriff am: 18.02.2025.
- [23] KUKA AG. KUKA OccuBot: Das intelligente Testsystem. https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/ready2_use/occubot, 2025. Zugriff am: 18.02.2025.
- [24] Intelligent Autonomous Systems 7, editor. *Occubot VI - An Intelligent Robot System for Seat Testing Applications*. IOS Press, 2002.
- [25] F. Beeh, T. Längle, H. Wörn, T. O'Bannon, J. Lentz, B. Schnoor. Occubot vi - industriero-boter als intelligentes sitztestsystem. pages 23–27, 2000.
- [26] D. Krause, B. Plaumann, T. Gumpinger, H. Jonas, editor. *Flexible Positionierung von modularen Kabinenmonumenten durch innovative Anbindungen in Leichtbauweise*, 2011.
- [27] M. Nierenberger, M. Poncelet, S. Pattofatto, A. Hamouche, B. Raka, J. M. Virely. Multiaxial testing of materials using a stewart platform: Case study of the nooru-mohamed test. *Experimental Techniques*, 38(2):74–83, 2014. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00807.x>.
- [28] K. Alemzadeh, D. Raabe. Prototyping artificial jaws for the bristol dento-munch robo-simulator; 'a parallel robot to test dental components and materials'. In *2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pages 1453–1456, 2007. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4352574>.
- [29] M. Kebbach, R. Grawe, A. Geier, E. Winter, P. Bergschmidt, D. Kluess, D. D'Lima, C. Woernle, R. Bader. Effect of surgical parameters on the biomechanical behaviour of bicondylar total knee endoprostheses – a robot-assisted test method based on a musculoskeletal model. *Scientific Reports*, 9(1):14504, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50399-3>.
- [30] M. Poncelet, J. Le Flohic, V. Parpoil, H. Leclerc, B. Raka, J. M. Virely, editor. *A 6 DOF testing machine controlled by digital image correlation: An experimental setup for new Nooru-mohamed tests*, volume FraMCoS-8, 1801-1807, 2013.
- [31] J. Le Flohic, V. Parpoil, S. Bouissou, M. Poncelet, H. Leclerc. A 3d displacement control by digital image correlation for the multiaxial testing of materials with a stewart platform. *Experimental Mechanics*, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11340-013-9837-z>.

- [32] X. Fayolle, S. Calloch, F. Hild. Controlling testing machines with digital image correlation: Fayolle, x., calloch, s., & hild, f. (2007). controlling testing machines with digital image correlation. *experimental techniques*, 31(3), 57-63. 31(3):57–63, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2007.00152.x>.
- [33] J. Hanke, C. Eymüller, J. Reichmann, A. Trauth, M. Sause, W. Reif. Software-defined testing facility for component testing with industrial robots. In *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pages 1–8, 2022. <https://doi.org/10.1109/ETFA52439.2022.9921625>.
- [34] J. Hanke, C. Eymüller, A. Poeppel, J. Reichmann, A. Trauth, M. Sause, W. Reif. Sensor-guided motions for robot-based component testing. In *2022 Sixth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, pages 81–84, 2022. <https://doi.org/10.1109/IRC55401.2022.00021>.
- [35] J. Reichmann, C. Eymüller, J. Hanke, A. Trauth, N. Prakash, M. G. R. Sause, Markus. Flexible multi-robot mechanical component testing methodology. *40th Anniversary of the IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA@40), Rotterdam, Netherlands*, 2024.
- [36] J. Reichmann, J. Hanke, C. Eymüller, A. Trauth, W. Reif, M. G. R. Sause. Development of a robot-based test bench for the destructive testing of components. *Journal of Testing and Evaluation*, 53(1), 2025. <https://doi.org/10.1520/JTE20240091>.
- [37] Neue Hexapod-Großprüfanlage an der TU Hamburg-Harburg: Institut für Produktionstechnik und Konstruktionstechnik (PTK). *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 107(9):591–592, 2012. <https://doi.org/10.3139/104.012090>.
- [38] ISO 9283:1998. Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods, April 1998.
- [39] KUKA AG. KR 1000 titan. <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industrieroboter/kr-1000-titan>, 2025. Zugriff am: 17.02.2025.
- [40] GOM GmbH. ATOS User Manual Hardware: ATOS 5.
- [41] KUKA AG. KUKA.RobotSensorInterface. https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/software/applikationssoftware/kuka_robotsensorinterface, 2025. Zugriff am: 17.02.2025.
- [42] M. Filipenko, A. Poeppel, A. Hoffmann, W. Reif, A. Monden, M. G. R. Sause. Virtual commissioning with mixed reality for next-generation robot-based mechanical component testing. In *ISR 2020: 52th International Symposium on Robotics in conjunction with: automatica December 9 – 10, 2020, Online-Event*. 2020.

- [43] J. Hanke, M. Stueben, C. Eymüller, M. Müller, A. Poeppel, W. Reif. Casp: Computer aided specimen placement for robot-based component testing. In *Proceedings of the 20th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, pages 374–382. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 11/13/2023 - 11/15/2023. <https://doi.org/10.5220/0012155000003543>.
- [44] Zimmer Group. 2-Backen-Parallelgreifer Serie GPP5000. [https://www.zimmer-group.com/de/produkte/komponenten/handhabungstechnik/2-backen-parallelgreifer/serie-gpp5000#/,](https://www.zimmer-group.com/de/produkte/komponenten/handhabungstechnik/2-backen-parallelgreifer/serie-gpp5000#/) 2025. Zugriff am: 21.02.2025.
- [45] SMW-Autoblok Spannsysteme GmbH. IMG Kraftspanner. https://www.smwautoblok.com/wp-content/uploads/sites/19/2023/05/IMG_stationary_DE.pdf, 2025. Zugriff am: 21.02.2025.
- [46] H. Choi, M. Koç. Design and feasibility tests of a flexible gripper based on inflatable rubber pockets. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13):1350–1361, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.10.009>.
- [47] J. R. Amend, E. Brown, N. Rodenberg, H. M. Jaeger, H. Lipson. A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(2):341–350, 2012. <https://doi.org/10.1109/TR0.2011.2171093>.
- [48] Carbon Fiber Nylon Fractal Vise. <https://plasmatio.com/products/carbon-infused-nylon-fractal-vise>, 2025. Zugriff am: 25.02.2025.
- [49] Stefan Holzer Feinmechanik GmbH & Co. KG. Das HTC System. <https://www.holzer-feinmechanik.de/htc-werkzeugwechsler>, 2025. Zugriff am: 21.02.2025.
- [50] E. Jones, M. Iadicola, R. Bigger, B. Blaysat, C. Boo, M. Grewer, J. Hu, A. Jones, M. Klein, K. Raghavan, P. Reu, T. Schmidt, T. Siebert, M. Simenson, D. Turner, A. Vieira, T. Weikert. A Good Practices Guide for Digital Image Correlation. https://idics.org/guide/DICGoodPracticesGuide_PrintVersion-V5h-181024.pdf. Zugriff am: 17.02.2025.
- [51] J. Winderl. *Testvorbereitung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Testvorbereitung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Rahmen der roboterbasierten Komponentenprüfung*. Bachelorarbeit, Universität Augsburg, 10.05.2023.
- [52] Batz+Burgel GmbH. Werkstoffdatenblatt: V2A (1.4301, X5CrNi18-10). https://batz-burgel.com/wp-content/uploads/data-de/BB_V2A.pdf, September 2019. Zugriff am: 17.02.2025.
- [53] L. Raape. *Einsatz von Simulationsumgebungen im Bereich der roboterbasierten Komponentenprüfung für die Offline-Bahnplanung*. Bachelorarbeit, Universität Augsburg, 25.04.2024.

- [54] T. Thiele. *Simulation von kraftgeregelten Bewegungen von Industrierobotern*. Bachelorarbeit, Universität Augsburg, 17. Januar 2023.
- [55] M. Mittal, C. Yu, Q. Yu, J. Liu, N. Rudin, D. Hoeller, J. L. Yuan, R. Singh, Y. Guo, H. Mazhar, A. Mandlekar, B. Babich, G. State, M. Hutter, A. Garg. Orbit: A unified simulation framework for interactive robot learning environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(6):3740–3747, 2023. <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3270034>.
- [56] J. Obrist, M. A. Zamora Mora, H. Zheng, R. Hinchet, F. Ozdemir, J. J. Zarate, R. K. Katzschmann, S. Coros, editor. *PokeFlex: A Real-World Dataset of Deformable Objects for Robotics*, 2025.
- [57] F. M. Goppel. *Vergleichende Betrachtung konventioneller Orthesenfertigung mit 3D gedruckten CFK-Strukturen*. Masterarbeit, Universität Augsburg, 30.09.2024.
- [58] A. Pabst. *Wirtschaftlichkeitsbewertung einer roboterbasierten Bauteilprüfung*. Masterarbeit, Universität Augsburg, 15.11.2023.

Abbildungsverzeichnis

2.1. Einteilung der zerstörenden Prüfverfahren, eigene Darstellung nach [2].	9
2.2. Die sechs wesentlichen Beanspruchungsarten bei mechanischen Prüfverfahren, eigene Darstellung nach [3].	9
2.3. Spannungs-Dehnungs-Kurve eines Werkstoffes mit und ohne ausgeprägter Streckgrenze, in Anlehnung an [6].	13
2.4. Prüfpypamide, eigene Darstellung nach [5].	14
2.5. Generelle Struktur eines Prüfstandes, eigene Darstellung nach [7].	16
3.1. Aufbau der roboterbasierten Komponentenprüfung [36].	32
3.2. Arbeitsbereich und Platzierung der Industrieroboter.	35
3.3. Montage Kraft-/Drehmomenten Sensor.	36
3.4. Überblick über die verwendeten Regelungsarten bei der roboterbasierten Prüfung.	38
3.5. Überblick Datenfluss [36].	40
3.6. Standardisierter roboterbasierter Prüfprozess, in Anlehnung an [33].	41
3.7. Prüfablauf eines roboterbasierten Prüfprozesses, in Anlehnung an [36].	43
3.8. Versuchsaufbauten zur Ermittlung experimenteller Kraftwerte zur Validierung der KukaForceISO Software.	44
3.9. Vier Konzepte für flexible Prüfvorrichtungen.	49
3.10. Versuchsaufbau: Uniaxiale Spannungszustände ohne Querkräfte [36].	51
3.11. Versuchsaufbau: Variation der Lastvektor Position [36].	52
3.12. CAD-Modelle der drei Prüfvorrichtungen für den Fahrradrahmen.	53
3.13. Versuchsaufbau: Überlagerung von Lastfällen [36].	54
3.14. Versuchsaufbau Multi-Roboter Prüfung [35].	55
3.15. Darstellung der Lastfälle bei der Prüfung eines Hilfsrahmens (Automobilkomponente).	57
3.16. CAD-Modelle der drei Prüfvorrichtungen für den Hilfsrahmen.	57
4.1. Zugversuche: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [36].	61
4.2. Zugversuche: Positionsabweichung der verschiedenen Regelungsarten [36]. . . .	63
4.3. Zugversuche: Querkräfte der verschiedenen Regelungsarten [36].	64

4.4. Fahrradrahmenprüfung Lastfall 1: Vergleich Positionsregelung und Kraftregelung.	66
4.5. Fahrradrahmenprüfung Lastfall 1: Kraft und Abweichung in x-, y- und z-Richtung für die Kraft- und Positionsregelung.	67
4.6. Fahrradrahmenprüfung Lastfall 2: Vergleich Positionsregelung und Kraftregelung [36].	68
4.7. Fahrradrahmenprüfung Lastfall 2: Kraft und Abweichung in x-, y- und z-Richtung für die Kraft- und Positionsregelung.	69
4.8. Fahrradrahmenprüfung Lastfall 3: Vergleich Positionsregelung und Kraftregelung.	70
4.9. Fahrradrahmenprüfung Lastfall 3: Kraft und Abweichung in x-, y- und z-Richtung für die Kraft- und Positionsregelung.	71
4.10. Regelgrößen der Weg- und Kraftregelung für alle Lastfälle der Fahrradrahmenprüfung.	73
4.11. Snowboardprüfung reine Biegebelastung: Vergleich der Regelgrößen Positionsregelung und Drehmomentregelung [36].	75
4.12. Snowboardprüfung überlagerte Biege -und Torsionsbelastung: Abbildung der Drehmomentregelung [36].	76
4.13. Multi-Roboter Prüfung Lastfall 1: Abbildung der Kraft- und Drehmomentverläufe. 78	
4.14. Multi-Roboter Prüfung Lastfall 2: Abbildung der Kraft- und Drehmomentverläufe. 80	
4.15. Multi-Roboter Prüfung Lastfall 1: Geschwindigkeit, Weg und Kraft in z-Richtung über die Zeit.	81
4.16. Multi-Roboter Prüfung Lastfall 2: Geschwindigkeit, Weg und Kraft in z-Richtung über die Zeit.	81
5.1. Zusammenfassung der vier Testszenarien.	89
A.1. Technische Zeichnung der Roboteranlage	96
A.2. Technische Zeichnung der Adapterplatte	97
A.3. Technische Zeichnung der Zugprobe	98
A.4. Zugversuche: Spannungs-Dehnungs-Diagramm	99

Tabellenverzeichnis

3.1. Vorhandene ATOS 5 Objektive: MV 1000, 700, 170, eigene Darstellung nach [40].	37
3.2. Tabelle zur Validierung des Kraftmodells KukaForceISO.	45
4.1. Zugversuche: Vergleich der Materialkennwerte [36].	62