

**Bernd Henfling, Gerd Blindenhöfer, Reiner Coburger,
Karsten Günther und Jean Pierre Bergmann**

**AWUSYS - Entwicklung eines hochpräzisen und
zeiteffizienten industriellen Auswuchtsystems**

**Fertigungstechnik –
aus den Grundlagen für die Anwendung**
Schriften aus der Ilmenauer Fertigungstechnik

Herausgegeben von
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jean Pierre Bergmann
(Technische Universität Ilmenau).

Band 1

AWUSYS

„Entwicklung eines hochpräzisen und
zeiteffizienten industriellen Auswuchtsystems“

Bernd Henfling, Gerd Blindenhöfer,
Reiner Coburger, Karsten Günther
und Jean Pierre Bergmann



Universitätsverlag Ilmenau

2014

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Autoren:

Bernd Henfling	ICOM Automation GmbH
Gerd Blindenhöfer	Schindler Handhabetechnik GmbH
Reiner Coburger	WVN GmbH
Karsten Günther	TU Ilmenau / FG Fertigungstechnik
Jean Pierre Bergmann	TU Ilmenau / FG Fertigungstechnik

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISSN 2199-8159 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-86360-106-5 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014100108

Förderhinweis

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) in der Fördermaßnahme „KMU-innovativ“ (Förderkennzeichen: 02PK2249) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



BETREUT VOM



Angaben zur Förderung:

Förderkennzeichen: 02PK2249

Laufzeit: 01.06.2012 – 31.05.2014

Danksagung

Diese Arbeit wurde mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderprogramms „KMU-Innovativ“ unterstützt.

Für diese Förderung sei gedankt.

Inhalt

1. KURZBESCHREIBUNG	1
2. EINLEITUNG	2
3. STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK	4
3.1 Definition des Begriffs „Unwucht“	4
3.2 Anforderungen an die Auswuchtmaschine	6
3.3 Maßnahmen zur Unwuchtkorrektur	8
3.4 Bisherige Defizite	10
4. ZIEL DES VERBUNDPROJEKTES	11
5. METHODISCHER ANSATZ UND PROJEKTAUFBAU	13
6. MESSTECHNISCHE UND KONSTRUKTIVE KONZEPTION	15
6.1 Auslegung der Sensortechnik	15
6.2 Maßnahmen zur Minimierung äußerer Störeinflüsse	18
6.3 Konstruktive Umsetzung von Referenzierungsstrategien	21
6.4 Fazit	25
7. SOFTWAREARCHITEKTUR UND ALGORITHMEN	26
7.1 Kreuzkorrelation als Rechenbasis	26
7.2 Ansatz zum Filtern von Störungen	29
7.3 Neuartige Auswertemethoden zur Unwuchtkorrektur	30
7.4 Sonderextrapolation unter Berücksichtigung verbotener Zonen	32
7.5 Fazit	35

8. RECHNERGESTÜTZTER VERSUCHSSTAND	36
8.1 Konstruktive Auslegung und Montage	36
8.1.1 Konstruktive Auslegung der Bohrstation	38
8.1.2 Entkopplung von Bearbeitungs- und Wuchtstation	43
8.1.3 Konstruktive Auslegung des Handlingsystems	45
8.1.4 Darstellung des Sicherheitskonzepts	46
8.2 Entwicklung der Messtechnik-Hardware	50
8.3 Entwicklung der Bediener-Interface	52
8.4 Fazit	56
9. ENTWICKLUNG VON AUF- UND ABTRAGSTRATEGIEN	57
9.1 Definition und Aufgabe der Verfahren	57
9.2 Prozessentwicklungen zum Masseabtrag	58
9.2.1 Versuchsvorbereitung und -durchführung	58
9.2.2 Ergebnisse	64
9.3 Prozessentwicklungen zum Masseauftrag	78
9.3.1 Versuchsvorbereitung und –durchführung	78
9.3.2 Ergebnisse	83
9.4 Allgemeingültige Algorithmen zur Unwuchtkorrektur	91
9.5 Fazit	94
10. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	95
11. LITERATURVERZEICHNIS	97

1. Kurzbeschreibung

Im Rahmen des Projektes „Awusys“ erfolgte die disziplinübergreifende Entwicklung eines hochpräzisen und zeiteffizienten industriellen Auswuchtsystems, welches neben der Unwuchtbestimmung zeitgleich Unwuchtkorrekturen mit höchster Genauigkeit umsetzen kann. Im Vergleich zu bestehenden Systemen sollte eine Genauigkeit bei der Unwuchtbestimmung von üblicherweise +/- 0,1 g auf +/- 0,01 g umgesetzt werden. Selbiges galt für den notwendigen Masseauf- und Masseabtrag, der mit einer Genauigkeit im 1/100 Bereich realisiert werden sollte.

Die Entwicklung eines derartigen Systems wurde durch die Erarbeitung und Entwicklung unterschiedlicher Ansätze aus den Bereichen der Konstruktion, der Softwaretechnik, der Messtechnik, der Handhabetechnik und der Fertigungstechnik erfolgreich umgesetzt und in Form eines rechnergestützten Versuchsstandes zusammengeführt. Das Projektziel wurde erreicht.

2. Einleitung

Die Anforderungen an Auswuchtaufgaben im industriellen Umfeld haben insbesondere in der Serienfertigung in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Grund hierfür ist, dass auftretende Unwuchten die technisch umsetzbaren Drehzahlen von einzusetzenden Rotoren begrenzen, da die auftretenden Fliehkräfte quadratisch mit der Drehzahl zunehmen. Das Beseitigen von Unwuchten an rotierenden Bauteilen ist demzufolge von hoher technischer und wirtschaftlicher Relevanz, um die Leistungsfähigkeit und Effizienz entsprechender Baugruppen stetig zu erhöhen. So müssen unter anderem Turbolader höchsten Ansprüchen standhalten, was Drehzahlen von über 290.000 U/min, bei kleinsten Abmessungen und Leichtbauanforderungen, gleichkommt.

Die Herausforderung liegt nicht nur in der Fertigung von Bauteilen mit immer engeren Toleranzen. Eine wesentliche Aufgabenstellung liegt auch in der Entwicklung hochpräziser Messsysteme zur Detektion der Unwuchten, um schließlich den erforderlichen Masseauf- bzw. Masseabtrag mit hoher Genauigkeit realisieren zu können. Aus wirtschaftlichen Gründen soll dies mit hoher Taktzeit unter industriellen Bedingungen erfolgen.

Die Realisierung derartiger hochpräziser Messsysteme macht eine Vielzahl besonderer Anforderungen und Entwicklungsmaßnahmen notwendig. Dies beinhaltet zum einen rein konstruktive Maßnahmen zur Verringerung der äußeren Störeffekte, die die Güte der Korrektur beeinträchtigen. Zu nennen sind beispielsweise das Spiel der Lager, sowie Schwingungen des Mess- bzw. Anregungssystems selbst. Weiterhin müssen die Messtechnik und die mathematische Auswertung noch präziser gestaltet werden, um minimale Unwuchten zuverlässig detektieren zu können. Nicht zuletzt müssen derartige Unwuchten mit der entsprechenden Genauigkeit durch das Auf- oder Abtragen von Masse beseitigt bzw. auf einen Minimalwert reduziert werden.

Den steigenden Anforderungen an die Auswuchttechnik wird bislang nur im begrenzten Maße Rechnung getragen. So sind die derzeit kommerziell erhältlichen Auswuchtssysteme extrem standardisiert, wobei den zunehmenden

Marktanforderungen nach Miniaturisierung und Gewichtsreduktion nicht ausreichend Rechnung getragen wird. Im Wesentlichen sind die aktuellen rechen-, fertigungs- und handhabungstechnischen Lösungen auf die für industriereife Systeme typischen Restunwuchten zwischen 0,1 - 0,5 g*mm/kg zugeschnitten, sodass der Entwicklungstrend nicht ausreichend beachtet wird. Darüber hinaus berücksichtigen solche Systeme nicht in vollem Maße die Nachbearbeitung zur Beseitigung der Unwucht, die im gleichen System durch Ab- oder Auftragen ausgeführt werden können.

Als Grund ist wohl die Komplexität bei der Weiterentwicklung und Interaktion der unterschiedlichen Technologien und Themenfelder zu nennen. So ist, angefangen von der elektronisch-messtechnischen Umsetzung über die konstruktiv-technischen Realisierung bis hin zu den informationstechnischen Erfordernissen, ein hoher Innovationsaufwand erforderlich. Dies beinhaltet nicht zuletzt die hohen Genauigkeitsanforderungen beim Masseausgleich, d. h. der eigentlichen Unwuchtkorrektur, sowie dem teilweise schwierigen Handling der Bauteile.

Gerade die aktuelle Marktanforderung ist allerdings eine halb- bzw. vollautomatische, hochpräzise Auswuchteinheit, die die komplexen Anforderungen an das automatisierte Einrichten, Steuern, Bedienen und Visualisieren erfüllt. Dies ist heute nicht auf dem Markt erhältlich und durch ein Einzelunternehmen nur schwer zu realisieren.

Hier setzt das Projekt „Awusys“ an. Durch die eng vernetzte und interdisziplinäre Zusammenarbeit dreier KMUs und einer Forschungsstelle aus den Bereichen Konstruktion, Softwaretechnik, Messtechnik, Handhabetechnik und Fertigungstechnik wurde ein derartiges Komplettsystem für Hochpräzisionsanwendungen entwickelt.

3. Stand der Wissenschaft und Technik

Auf die Besonderheiten und Methodik des Auswuchtens wird in der wissenschaftlichen Literatur tiefgründig eingegangen [1] – [11]. Im Folgenden wird nochmals der Begriff der Unwucht, die Anforderungen an ein Auswuchtsystem und die Maßnahmen zur Unwuchtkorrektur erläutert.

3.1 Definition des Begriffs „Unwucht“

Eine Unwucht erzeugt bei einem sich drehenden Rotor eine Fliehkraft, welche dessen Laufruhe stört und sich somit negativ auf die Leistungsfähigkeit, Effizienz und Lebensdauer auswirkt. Hierbei nimmt die Fliehkraft F linear mit der Unwucht U und quadratisch mit der Drehzahl ω zu [1].

$$F = U \cdot \omega^2$$

Durch die Unwucht eines rotierenden Körpers wird dessen Schwerpunkt aus der Drehachse um einen vektoriellen Betrag in Richtung der Fliehkkräfte verlagert, wodurch Schwingkräfte bzw. Schwingbewegungen auf die Lager übertragen werden, siehe Abbildung 1. Dieser Abstand wird Restexzentrizität e oder Schwerpunktverlagerung genannt. Hierbei ist die Unwucht ein Maß, welches angibt, wieviel unsymmetrisch verteilte Masse in radialer Richtung von der Drehachse entfernt ist und wird in der Regel in [gmm] angegeben. Sie ergibt sich aus dem Produkt aus Restexzentrizität e und Unwuchtmasse m .

$$\vec{U} = m \cdot \vec{e}$$

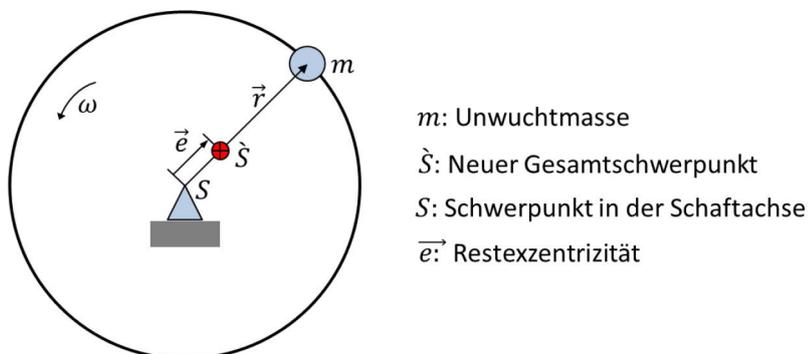


Abbildung 1: Darstellung der unwuchtbedingten Schwerpunktverlagerung (in Anlehnung an [1])

Grundsätzlich ist der Charakter der Unwucht in drei unterschiedliche Arten zu unterscheiden, siehe Abbildung 2.

Bei der statischen Unwucht sind der Betrag und die Richtung der vorherrschenden Unwuchten identisch. Bei einem frei drehbaren Rotor würde die Unwuchtmasse nach unten wandern und der Rotor auspendeln. Diese Unwucht wirkt also ohne Rotation und kann in der Schwerpunktebene, in Form von Masseauftrag bzw. –abtrag, ausgeglichen werden.

Wirken an einem Rotor zwei Unwuchten mit dem gleichen Betrag, jedoch in ihrer Winkellage um 180° versetzt, üben die beiden Unwuchten eine Momentenunwucht aus. Diese kann nur unter Rotation festgestellt werden. Deren Korrektur erfordert ein Gegenmoment, welches in den vorgegebenen Ausgleichsebenen durch Masseauftrag oder –abtrag vorgenommen wird.

Beim realen Rotor liegt eine dynamische Unwucht vor, die sich aus einer Überlagerung von statischer Unwucht und Momentenunwucht ergeben. Diese lassen sich durch zwei resultierende Unwuchten in zwei beliebigen Ebenen ersetzen. Wie bei der Momentenunwucht sind für die Korrektur zwei Ausgleichsebenen mit definiertem Masseauftrag bzw. –abtrag erforderlich.

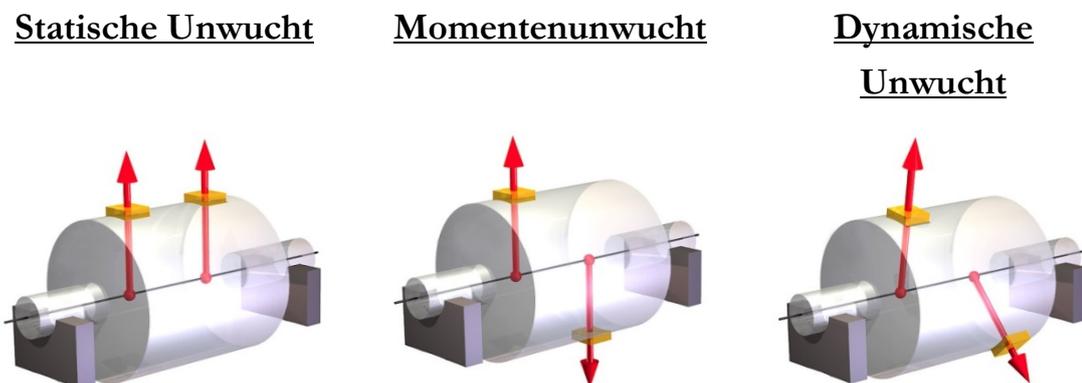


Abbildung 2: Schematische Darstellung der drei Unwuchtarten [11]

Weiterführend ist bei nachgiebigen Rotoren der Unwuchtzustand drehzahlabhängig. Bei starren Rotoren, worauf der Großteil der Anwendungen beruht, verändert sich der Unwuchtzustand bis zur Betriebsdrehzahl nur unwesentlich und kann demzufolge bei einer beliebigen Drehzahl ermittelt

werden [1]. Die Auslegung der Auswuchtmaschine im Rahmen des Projektes „Awusys“ basierte auf dem starren Rotor.

3.2 Anforderungen an die Auswuchtmaschine

Die zuverlässige Bestimmung der auftretenden Unwucht an einem Rotor macht die Minimierung der äußeren Störeinflüsse notwendig. Dies erfordert eine optimierte Abstimmung der Mechanik, der Antriebstechnik, der Messtechnik und der Softwaretechnik.

Bei der Messung der Unwuchten werden bereits vom Lager kommende Störsignal aus dem Maschinengestell (Eigenschwingungen) erfasst. Folglich ist das Signal zur Beschreibung der Unwucht schon so mit Fehlerquellen behaftet, dass eine effektive Korrektur kaum möglich ist. Ein wesentlicher Ansatz bei der Auslegung hochpräziser Auswuchtssysteme ist also zunächst, von den Lagern herrührende Störsignale auf einen Minimalwert zu reduzieren [12] – [24]. In diesem Zusammenhang sind neben den klassischen Lagersystemen (Tragrollenlager, Prismenlager und Gleitlager) reiblose magnetische Systeme Gegenstand der aktuellen Forschung. Weitere Ansätze zur Minimierung der Einflüsse aus dem Maschinengestell belegen, dass die viskoelastischen Eigenschaften von Elastomeren sehr gute Dämpfungseigenschaften zur Folge haben [19] – [24]. Dies betrifft insbesondere die Kompensation niedrig- und hochfrequenter Schwingungen.

Zur Signalerfassung der Rotorunwucht an den aufliegenden Lagern werden als Stand der Technik mechanisch-elektrische Wandler (Weg- bzw. Kraftaufnehmer) eingesetzt, die nur eine punktuelle Aussage über die Exzentrizität an einer zu bestimmenden Stelle ermöglichen. Diese Vorgehensweise erfordert einen Kompromiss zwischen Anzahl der Sensoren und Feinheit der Messung, sodass ein relativ großer Fehler in der Bestimmung auftreten kann. Der zunehmende Einsatz weiterer Sensorsysteme im Maschinenbau auf kraftmessender Basis, wie beispielsweise Piezosensoren, erfordert fest gespannte Lager. Entscheidend für die Qualität sind hier jedoch die Anordnung der Sensoren in der Spanneinrichtung und die Kraftlinien

zwischen Rotor und Stator. So können beispielsweise Sensoren gegenphasig angeordnet werden, um Störsignale zu eliminieren.

Erkenntnisse und Erfahrungen zu einer derartigen Vorgehensweise bei Auswuchtsystemen sind in der Literatur nicht bekannt, auch wenn hierdurch die mechanische Fehlerquelle minimiert werden kann. Ebenso wenig liegen Erkenntnisse zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit mechanisch-elektrischer Wandler zur Signalverarbeitung vor. Die Kenntnis reduziert sich auf die praktische Erfahrung weniger und auf diesem Gebiet spezialisierter Unternehmen [25] – [32].

Die hochpräzise Messung, Verarbeitung und Auswertung der messtechnisch erfassten Daten erfordert schließlich die rechen- und softwaretechnische Eliminierung der übertragenen Störeinflüsse. In der mathematischen und rechentechnischen Aufbereitung muss insbesondere Folgendes berücksichtigt werden:

- Regeln und Filtern von mechanischen, messtechnischen und steuerungstechnischen Störeinflüssen, um die relevanten Ergebnisse zum Rotorverhalten extrahieren und analysieren zu können.
- Ermittlung des erforderlichen Masseauftrags bzw. –abtrags in Abhängigkeit der detektierten Unwucht und der Position der Ausgleichsebenen
- Umwandlung des notwendigen Unwuchtausgleichs in einen CNC-Datensatz, wodurch die Nachbearbeitung und Kontroll-Messung ermöglicht werden.

Auswuchtsysteme, die einen automatisierten Unwuchtausgleich unmittelbar nach der Unwuchtmessung ermöglichen sind nur geringfügig bekannt. Im Wesentlichen betrifft dies Sonderanwendungen aus dem Automobilbau, der Werkzeugtechnik (Feinwerktechnik) und der Luft- und Raumfahrttechnik (Turbinen). In der Regel erfolgt im Messsystem eine Markierung der auszuwuchtenden Position. Die Unwuchtkorrektur erfolgt schließlich in einer abgeschotteten und dafür vorgesehenen Einheit.

3.3 Maßnahmen zur Unwuchtkorrektur

Bei der Durchführung der Unwuchtkorrektur erfolgt die Verlagerung der Massenträgheitsachse hin zur Rotorachse durch das Aufbringen oder Abtragen von Masse in den dafür vorgesehenen Ausgleichsebenen. Welche Ausgleichsart dafür gewählt wird hängt vor allem von der Bearbeitbarkeit des Rotors ab. Weiterhin kommt der Bearbeitungszeit bei der Unwuchtkorrektur eine entscheidende Rolle zu, da diese im Serieneinsatz die Zeit je Auswuchtlauf bzw. die Taktzeit bestimmt.

In der Praxis hat sich bei der Korrektur geringer Unwuchten das Bohren bzw. Fräsen durchgesetzt. Über die Dichte des Rotorwerkstoffs und dem Fräser- bzw. Bohrerdurchmesser wird schließlich ein definierter Masseabtrag ermöglicht. Die Wirkmechanismen des Abtragens mit geometrisch bestimmter Schneide sind hinreichend bekannt [33], explizit für das Auswuchten liegen in der wissenschaftlichen Literatur allerdings keine Untersuchungen vor. Es ist anzunehmen, dass die hinterlegten Algorithmen bislang nur die theoretische Materialdichte berücksichtigen. Fehler, die bei der praktischen Umsetzung des Auswuchtprozesses, z.B. durch Besonderheiten des Fräswerkzeuges oder der Fräsmaschine entstehen, werden hingegen nicht berücksichtigt. Jedoch würde gerade die Berücksichtigung derartiger Fehlerquellen Unwuchtgenauigkeiten im 1/100 - oder 1/1000g – Bereich ermöglichen.

Anderweitig wissenschaftlich untersuchte Prozesse zur Unwuchtkorrektur sind laser- oder erosionsbasierte Abtragverfahren [34] – [38]. Aufgrund der notwendigen Sicherheitstechnik oder Abtraggeschwindigkeit spielen derartige Prozesse für serielle Anwendungen nur eine untergeordnete Rolle.

Die Korrektur der Unwucht kann auch in Form eines Masseauftrages erfolgen. Diese werden allerdings bei Auswuchtaufgaben mit hoher Taktzeit nur geringfügig bzw. gar nicht umgesetzt. Jedoch bieten gerade lichtbogenbasierte Auftragschweiß- bzw. Auftragslötprozesse das Potenzial, einen definierten Masseauftrag mit hohem Automatisierungsgrad zu realisieren. Voraussetzung dabei ist, dass die thermische Beeinflussung des Grundwerkstoffs auf ein Minimum reduziert wird, um Bauteileigenschaften nicht negativ zu beeinflussen.

In diesem Zusammenhang ist in den geregelten, energiereduzierten Kurzlichtbogentechnologien sowie im Mikro-Plasma-Löten ein hohes Potenzial zu sehen. Gegenwärtige Forschungsvorhaben machen sich deren geringen Energieeintrag für Anwendungen im Dünoblechbereich, sowie für die Realisierung aufmischungsarmer Auftragschweißungen zu Nutze [39] – [50]. Das Auftragen einer definierten Masse bei geringer Energieeinbringung und gleichzeitig hoher Taktzeiten fand hingegen noch keine Berücksichtigung. Der Weiterentwicklung dieser Auftragstrategien für Anwendungen im Bereich der Unwuchtkorrektur war ein wesentliches Ziel im Projekt Awusys.

Für die Entwicklung eines hochpräzisen Auswuchtsystems für serielle Anwendungen ist es demzufolge erforderlich, masseauf- bzw. masseabtragende Strategien zur hochpräzisen Verringerung der Korrekturunwucht zu entwickeln und zu optimieren. Im Rahmen des Projektes unterlagen dabei folgende Verfahren einer genaueren Betrachtung:

- Fräsen
- Bohren
- Metall-Schutzgas-Löten mittels geregelter Kurzlichtbogentechnologie
- Mikro-Plasma-Auftraglöten

Die Erkenntnisse sollten schließlich in einer Datenbank eingebunden werden, die die automatisierte Prozessfolge bzw. Prozessschleife „Auswuchten → Wahl des Korrekturverfahrens → Unwuchtkorrektur“ unterstützt.

Für die umfassende Entwicklung eines Auswuchtsystems mit nachgeschalteter Unwuchtkorrektur ist also ein ganzheitlicher Ansatz aus den Fachgebieten Messtechnik, Informatik, Fertigungstechnik und Handhabetechnik erforderlich.

3.4 Bisherige Defizite

Ausgehend vom Stand der Technik ergeben sich folgende Defizite, denen für die Entwicklung eines hochpräzisen Auswuchtsystems nachgegangen werden muss.

- Die Entwicklung eines hochpräzisen Auswuchtsystems erfordert konstruktive Maßnahmen, die externe Schwingungen neutralisieren bzw. kompensieren. In der wissenschaftlichen Literatur liegen Kenntnisse zu derartigen Systemlösungen vor. Eine praxisgerechte Umsetzung wurde bislang noch nicht realisiert.
- Die praktische Messung der Unwucht erfolgt über an den Lagerstellen angebrachte Weg- und Kraftmesssensoren. Stand der Technik ist die Anbringung eines Sensors pro Lagerstelle. Die Entwicklung eines hochpräzisen Auswuchtsystems erfordert jedoch mehrere Sensoren pro Ebene mit gegenphasiger Verschaltung zum Eliminieren von Rauschen, aber auch zur Signalverstärkung.
- Bisherige Auswuchtsysteme liegen in der Regel rein isoliert betrachtet vor. Die Unwuchtkorrektur erfolgt ausserhalb der Messzelle bzw. des Auswuchtsystems. Systeme, die eine Kombination aus Auswuchten und Unwuchtkorrektur ermöglichen, liegen nur in begrenztem Maße vor, insbesondere bedingt durch die Komplexität der Handhabetechnik.
- Für das hochpräzise Bohren bzw. Fräsen sind nicht nur die theoretischen Materialdichten zu berücksichtigen, sondern auch Ungenauigkeiten, die von der Maschine und dem Werkzeug herrühren. Aus dem Stand der Technik ist hierzu nichts bekannt.
- Es liegen keine Erkenntnisse zur Masseauftrag- und Positioniergenauigkeit lichtbogenbasierter Auftragstrategien vor. Diese besitzen ein hohes Potenzial für die Umsetzung hochpräziser Unwuchtkorrekturen mit hoher Taktzeit, wurden für das Auswuchten bislang allerdings noch nicht betrachtet und untersucht.

4. Ziel des Verbundprojektes

Ziel des Vorhabens AWUSYS ist die disziplinübergreifende Entwicklung eines hochpräzisen und zeiteffizienten industriellen Systems, welches entsprechend Abbildung 3 die Unwucht bestimmt, Daten verarbeitet und Voraussetzungen für Korrekturen direkt vor Ort ableiten kann. Für kleine Rotoren mit einem Gewicht zwischen 100 – 300g wird eine Verbesserung in der Bestimmung der Unwucht von heute üblicherweise etwa $\pm 0,1$ g auf $\pm 0,01$ g angestrebt. Selbiges gilt für den notwendigen Masseauf- und Masseabtrag, der mit einer Genauigkeit im 1/100 Bereich umgesetzt bzw. realisiert werden soll.

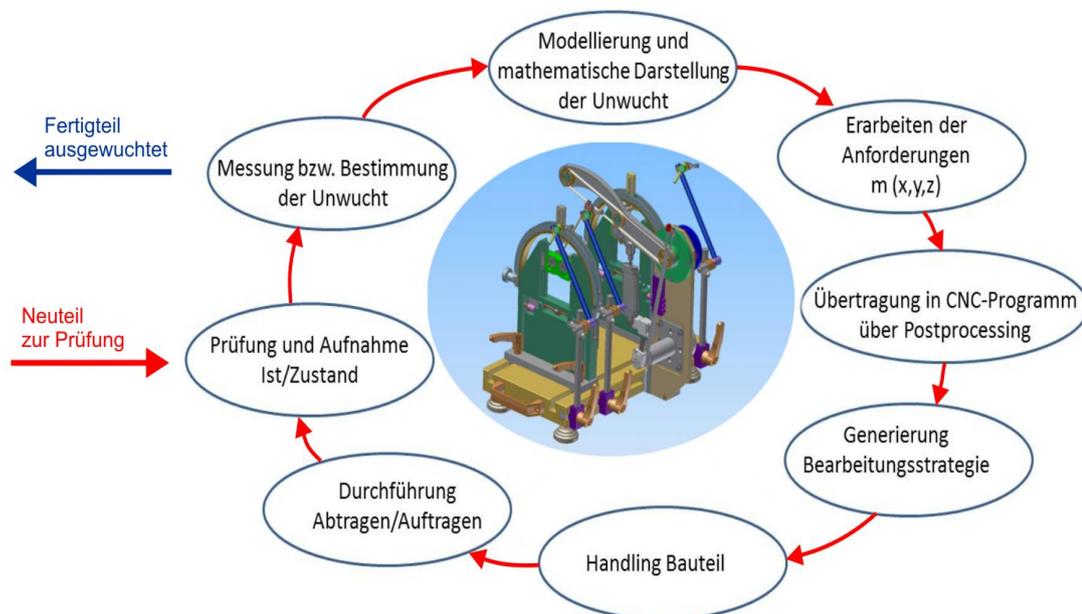


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines vollautomatischen Auswuchtprozesses

Die Entwicklung macht die Erarbeitung unterschiedlicher Ansätze erforderlich. Zum einen ist der Einsatz, die Positionierung und die Anordnung der Sensoren zur Aufnahme der Unwucht dahingehend zu optimieren, um die Güte des Signals hinsichtlich Stör- und Übertragungseffekte zu verbessern.

Zum anderen muss die rechentechnische und mathematische Behandlung der Daten verfeinert werden, um Störeffekte direkt herauszufiltern.

Weiterhin ist die Auslegung des mechanischen Maschinenkonzeptes vollständig zu erneuern. Dies betrifft insbesondere die Lagerung der zu messenden Bauteile im Bezug zu den kraftmessenden Sensoren, um die auftretende Exzentrizität des Rotors genauestens bestimmen zu können.

Schließlich soll die Entwicklung und Implementierung hochpräziser Masseauf- und Masseabtragstrategien eine hochpräzise Korrektur der detektierten Unwucht ermöglichen, um die Effizienz des Bauteils im Einsatz zu steigern.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Teilziele:

- Entwicklung eines einfachen, hochpräzisen messtechnischen und konstruktiven Konzeptes zur Aufnahme von Unwuchten.
- Effektive rechentechnische Algorithmen sowie Softwarearchitektur zur Behandlung und Auswertung der detektierten Daten.
- Auslegung und Aufbau eines qualifizierten rechnergestützten Versuchstandes zur Optimierung des Gesamtsystems.
- Entwicklung einfacher und hochpräziser Strategien für das Auftragen und Abtragen von Masse zur Korrektur der detektierten Unwuchten.

Folgende Systemeigenschaften haben sich die Projektpartner als Ziel gesetzt.

Kriterien	Stand der Technik	Zielsetzung
Sensorik	Weg- oder Kraftmessung mit einem Sensor	Piezoelektrische Kraftmessung mit 2 bis 4 Sensoren
Messauflösung	12 – 14 Bit	16 – 24 Bit
Absolute Rotormassen	500g – 20kg	50g – 10kg
Auflösung Fehlmassen	0,1g	0,01g
Restunwucht	0,1gmm	0,01gmm
Korrektur der Unwucht	0,1g	0,01 – 0,001g

Tabelle 1: Systemeigenschaften des zu entwickelnden Auswuchtsystems und Gegenüberstellung zum Stand der Technik

5. Methodischer Ansatz und Projektaufbau

Entsprechend Tabelle 1 liegt dem Vorhaben methodisch die Reduzierung der Messungenauigkeiten um zumindest eine Größenordnung gegenüber dem heutigen Stand zugrunde.

Der hierfür notwendige Entwicklungsaufwand setzt sich zusammen aus

- konstruktiv-technologischen Elementen zur schwingungsarmen Führung und Handhabung der Rotoren.
- der Entwicklung der Mess- und Sensortechnik zur hochpräzisen Detektion von Unwuchten mit minimalster Fehlergüte.
- der Entwicklung von messtechnischen Hard- und Softwareelementen zur Messsignalerfassung, -wandlung und -verarbeitung.
- der Entwicklung von Strategien zum fertigungstechnischen Korrigieren der Unwuchten mit hoher Taktzeit.
- der Entwicklung eines automatisierten Auswuchtsystems mit implementierter Unwuchtkorrektur.

Entsprechend sind auch der Aufbau und die Zusammenstellung der Arbeit gewählt:

1) Messtechnische und konstruktive Konzeption

Es wurde ein konstruktives Konzept entwickelt, um die Systemeigenschwingungen zu minimieren, so dass die tatsächlichen Unwuchtkräfte möglichst unverfälscht an den Messsensoren ankommen. Speziell der Ein- und Aufbau der Sensoren an der Messstelle, d.h. „ohne Spiel“ und unter Vermeidung signifikanter Störkräfte durch Quer- und Scherkräfte, spielt dabei eine tragende Rolle. Selbiges gilt für die exakte Nullpunkterkennung beim Auswuchtvorgang zur Erzielung höchster Reproduzierbarkeiten.

2) Algorithmen und Softwarearchitektur

Die Unterdrückung äußerer Störeinflüsse erfolgte zudem rechentechnisch über die Entwicklung entsprechender Algorithmen. Neben dem Verfahren der Kreuzkorrelation wurden die Potenziale der Fourier-Transformation untersucht. Weiterführend erfolgte die mathematisch-rechentechnische Umsetzung von Extrapolationsverfahren zur Unwuchtkorrektur unter Berücksichtigung verbotener Zonen. Entsprechende Algorithmen wurden schließlich in Programmmodule zur Bedienung der Auswuchtanlage eingebunden und in einer Bedienersoftware zusammengefasst.

3) Entwicklung von Auf- und Abtragstrategien

Betrachtet wurden die Abtragverfahren Bohren und Fräsen, sowie die Auftragverfahren MSG-Löten und Mikro-Plasma-Löten. Grund hierfür ist deren hoher Automatisierungsgrad. Diese wurden hinsichtlich ihrer Masseauftrag- und Positioniergenauigkeit bewertet und optimiert, wobei eine Masseauftraggenauigkeit im Bereich 1/1000 g angestrebt wurde. Die Allgemeingültigkeit des verwendeten Verfahrens wird in Form von Algorithmen festgehalten.

4) Qualifizierter und rechnergestützter Versuchsstand

In den rechnergestützten Versuchsstand wurden schließlich alle Erkenntnisse aus Konstruktions-, Mess- und Sensortechnik eingebunden. Der Schwerpunkt liegt in der konstruktiven Auslegung der Bohr- und Auswuchteinheit, sowie in der komplexen Handhabetechnik.

6. Messtechnische und konstruktive Konzeption

6.1 Auslegung der Sensortechnik

Zur Bestimmung der Unwucht eignen sich prinzipiell kraft- oder wegmessende Verfahren. Der Einsatz wegmessender Verfahren ist an spezielle konstruktive und messtechnische Vorgaben gebunden (die Auslenkung muss „sichtbar“ sein). Prinzipiell sind heute lasergestützte Verfahren auch bei kleinen Auslenkungen denkbar. Jedoch ist der maschinenbauliche und apparatetechnische Aufwand erheblich. Darüber hinaus bestehen erhöhte sicherheitstechnische Anforderungen. Innerhalb von AWUSYS wurden kraftmessende Verfahren betrachtet und dabei Piezosensoren als ideale Messaufnehmer für Kräfte ausgewählt. Die Eigenschaft, einwirkende Kräfte als Spannungssignal abgreifen zu können, machen diese Sensoren zum idealen Medium für diesen Einsatzzweck.

Entscheidendes Kriterium für die Qualität der Messung und die erreichbare Auflösung hinsichtlich der mechanischen Einwirkung ist dabei die Wirkrichtung der erfassten Kräfte. Um mit einem Piezosensor reproduzierbare, durch die Unwucht erzeugte Kräfte zu messen, muss sichergestellt werden, dass nur die relevanten umgeleiteten Radialkräfte einwirken und keine Querkräfte auftreten. Abbildung 4 zeigt das konstruktive Prinzip zum Erreichen dieses Ziels. Durch die Kugelaufnahmen des Sensors zwischen der krafteinleitenden Mechanik kommen nahezu nur senkrecht zur (hier rot dargestellten) Wirkfläche des Sensors eingeleitete Kräfte zum Tragen.

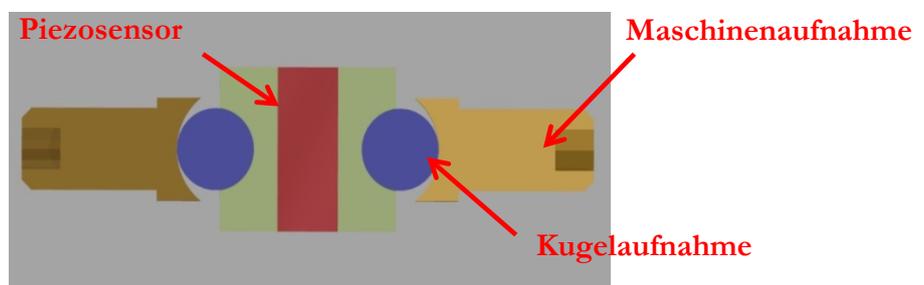


Abbildung 4: Prinzipdarstellung der Montage der Piezosensoren

Hinsichtlich der Anzahl der relevanten Messstellen erfolgten im FuE-Projekt umfangreiche Untersuchungen, wobei insbesondere eine 1-Sensor und eine 2-

Sensor-Anordnung (gegenphasig verschaltete Sensoren) ausgeführt und untersucht wurden. Für beide Einbauvarianten hat WVN drei Prototypen entwickelt, gebaut und diese für Versuche zur Messelektronik zur Verfügung gestellt. Ziele waren:

- Erkenntnisse zur optimalen Anzahl von Sensoren
- Erkenntnisse zur Einbaulage bzgl. Winkel und Abstand zur Auswuchtebene.

Abbildung 5 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau einer industriellen Auswuchtanlage (Stator, Sensoren, schwingender Teil mit Prüfling). Um die Wirkung eines Einfach- und Doppelsensorsystems zu erproben, wurden die dargestellten Aufbauten entsprechend realisiert.

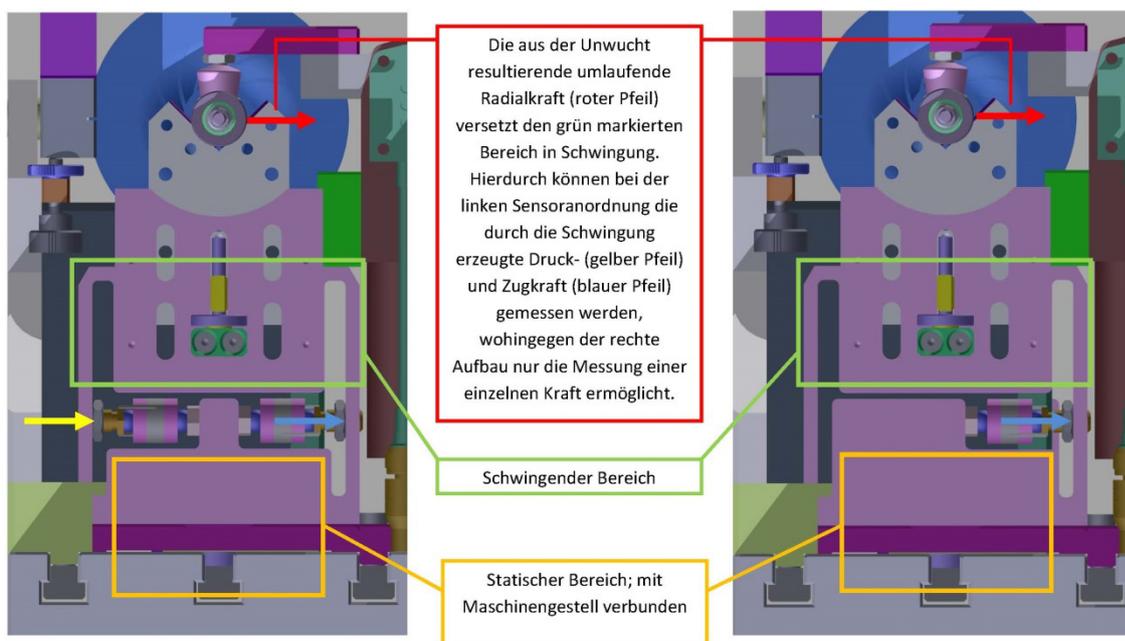


Abbildung 5: Montage als 2-Sensor (links)- und 1-Sensor-Anordnung (rechts)

Bei der Doppelsensoranordnung wird die identische, durch die Unwucht erzeugte Kraft in beide Sensoren eingeleitet. Durch entsprechenden gegenphasigen Signalabgriff addieren sich die Nutzsignale, während die Störsignale zumindest teilweise eliminiert werden.

Abbildung 6 verdeutlicht die Unterschiede in der Signalerfassung zwischen einer 1-Sensor (oben) und einer 2-Sensor-Anordnung (unten). Hierbei führt der Einsatz von zwei Sensoren zu einer Verdopplung der Signalamplitude bei

gleicher Verstärkung, wobei die Amplitude ohne Messung (Rauschen) fast auf gleichem Niveau bleibt.

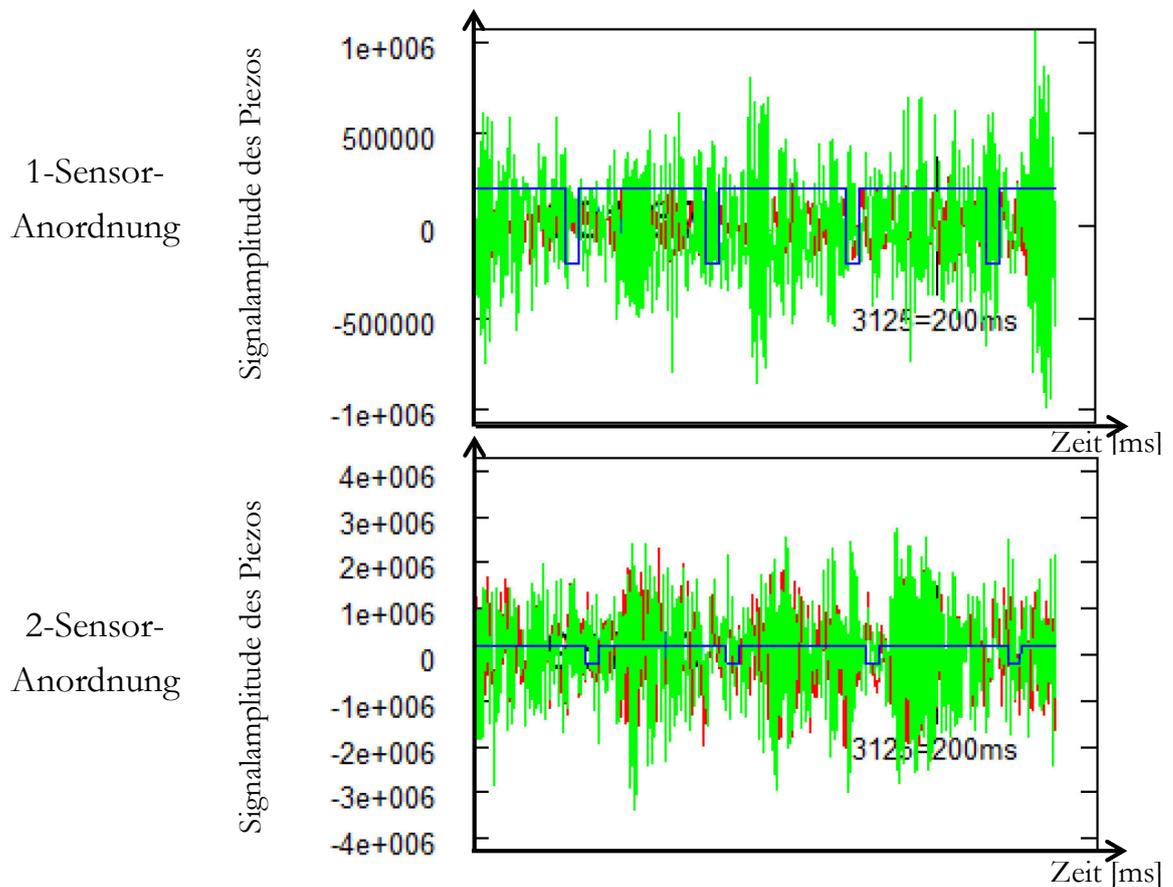


Abbildung 6: Vergleich der 1-Sensor- und 2-Sensor-Anordnung

Die ideale Addition der Nutzsignale wird erreicht, wenn entsprechend Abbildung 5 beide Sensoren bzgl. der wirkenden Druck- (gelber Pfeil) und Zugkräfte (blauer Pfeil) genau antiparallel bzw. bezüglich der Ableitung (roter Pfeil) am Prüflingsrotor um 180° versetzt montiert werden.

Davon abgeleitet wurde die Entscheidung, für die Prototypen jeweils 2-Sensor-Anordnungen um 180° versetzt je Auswuchtebene zu implementieren.

Die 2-Sensor-Anordnung wurde sowohl im Versuchstand von WVN sowie im rechnergestützten Versuchstand von Schindler umgesetzt, siehe Abbildung 7.

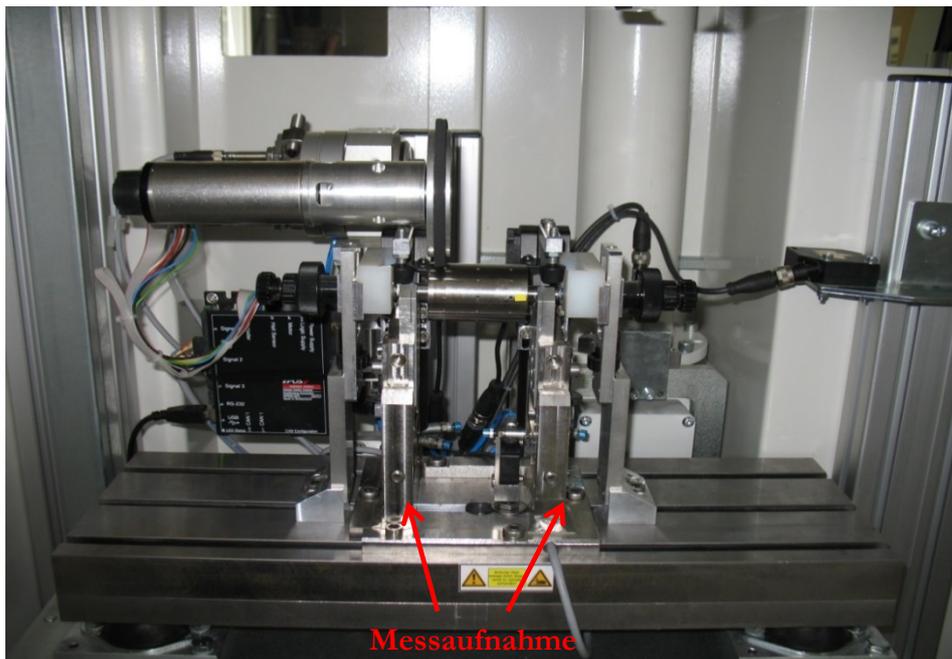


Abbildung 7: Unwucht-Messmaschine mit zwei Messstellen in den jeweiligen Lagern

6.2 Maßnahmen zur Minimierung äußerer Störeinflüsse

Hinsichtlich der mechanischen Toleranzen und Messgenauigkeiten waren Montagestrategien festzulegen, die Fehlmessungen aufgrund äußerer Störeinflüsse möglichst ausschlossen. Als Unternehmen mit einer starken Ausrichtung auf dem Lehrenbau (reproduzierbare Fertigungsgenauigkeiten im 1/100 Bereich) konnte hier die Fa. WVN wesentliche Erfahrungen einbringen und speziell die mechanische Adaption der Sensoren optimieren.

Hinzu kam die Entwicklung konstruktiver Konzepte zur Minimierung äußerer, mechanischer Störeinflüsse. Hierbei hat sich herauskristallisiert, dass insbesondere die Eigenschwingungen des Versuchsstandes und des Rotorantriebes maßgebliche Störfaktoren darstellen.

Zur Kompensation der Eigenschwingungen des Versuchsstandes wurde auf Elastomerdämpfungen zurückgegriffen, die entsprechend Abbildung 7, unter dem Maschinenbett installiert wurden. Zur Untersuchung des Dämpfungsverhaltens wurden Vibrationsversuche vorgenommen, wobei die Schwingungen unter dem Maschinenbett sowohl mit als auch ohne Dämpfung eingeleitet

wurden. Die Schwingungsamplitude und Frequenz der Vibrationsversuche war dabei durchweg identisch.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt. Eine Vibration ohne Dämpfung wurde von Piezosensoren sehr stark aufgenommen, während die Signalamplitude mit Dämpfungselementen um den Faktor 10 geringer im Ausschlag war. Dieser Versuch wurde auch mit anderen Frequenzen und Stößen, mit gleicher Erkenntnis, durchgeführt. Die Dämpfer verringern somit die von außen eingeleiteten, mechanischen Schwingungen um den Faktor 10.

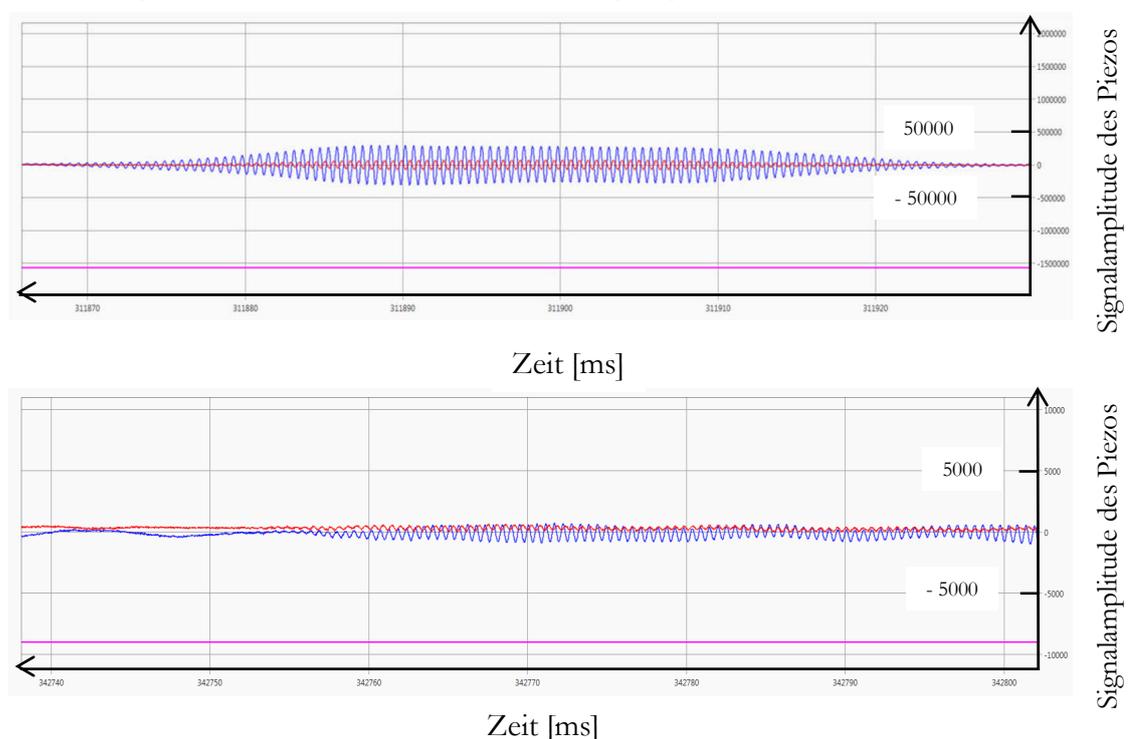


Abbildung 8: Ergebnisse der Vibrationsversuche, die unter dem Maschinenbett mit (oben) und ohne Dämpfungselement (unten) eingeleitet wurden

Als eine weitere externe Störquelle kristallisierte sich der Rotorantrieb heraus. Dies galt insbesondere für den zu Beginn des Projektes eingesetzten Zahnriemenantrieb, siehe Abbildung 9 (oben). Versuche, die Störquellen mit anderen Rundriemenmaterialien bzw. deren Anordnung (zweifach) weiter zu minimieren, waren dabei nicht erfolgreich. Besondere Schwierigkeiten traten durch das „Wandern“ des Auswuchtkörpers während der Rotation auf. Durch eine separate Auflagehöhenfeinjustage und einer einstellbaren Riemenantriebsrichtung wurde dieses Problem gelöst.

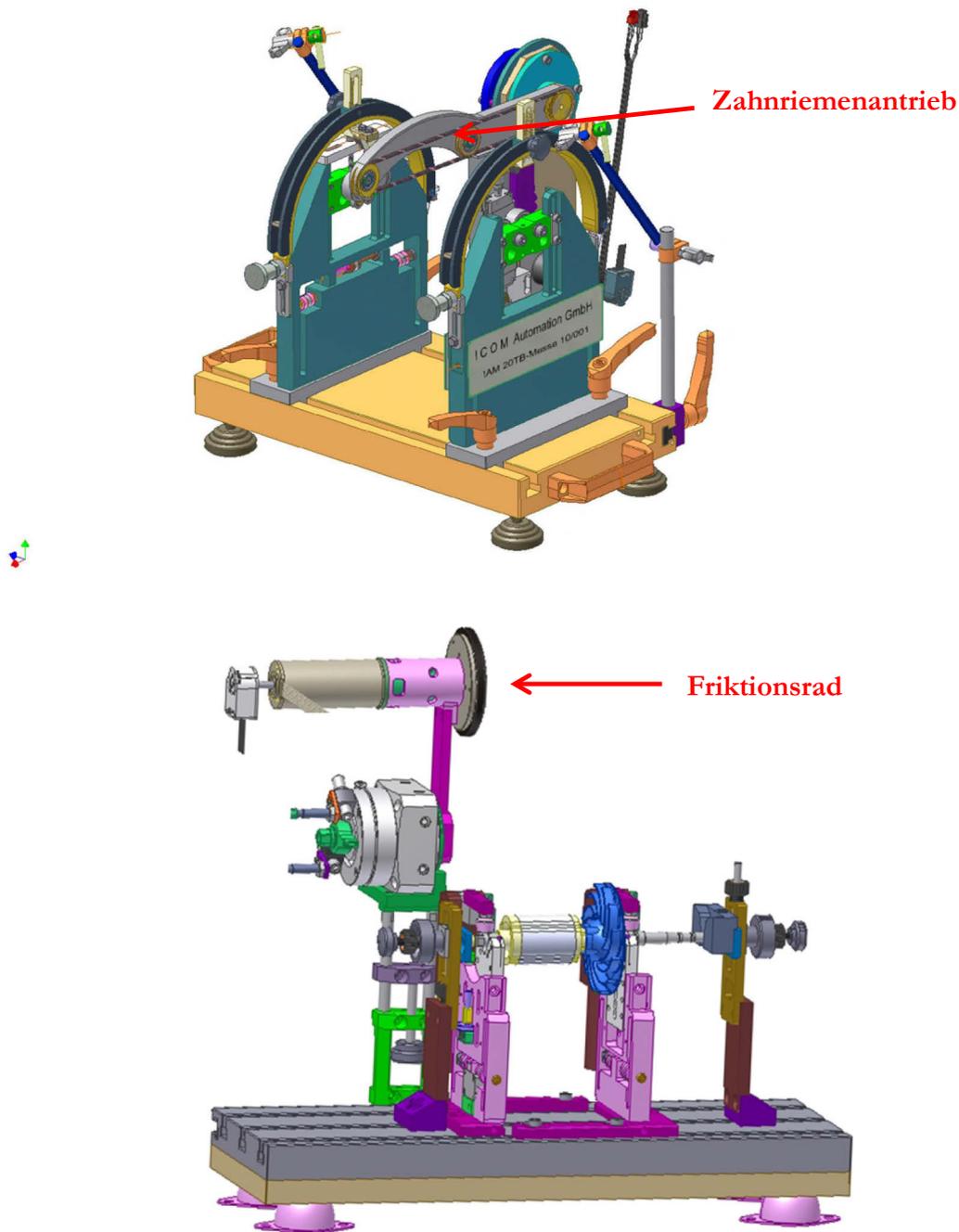


Abbildung 9: Gegenüberstellung der Antriebskonzepte

„Zahnriemenantrieb“ (oben) und „Direktantrieb“ mittels Friktionsrad (unten)

Weiterführend wurde neben einem Gelenkwellenantrieb auch ein Direktantrieb mittels Friktionsrad einer eingehenden Untersuchung unterzogen, siehe Abbildung 9 (unten), womit positive Ergebnisse erzielt werden konnten. Dieses Antriebskonzept wurde schließlich auf alle Versuchsstände übertragen. Von dem ursprünglich konzipierten Seilriemenantrieb wurde Abstand genommen.

6.3 Konstruktive Umsetzung von Referenzierungsstrategien

Neben der Signalerfassung bzgl. der Unwucht (Weg- oder Kraftmessung, Signalaufbereitung und Störunterdrückung) ist die Nullpunkterfassung und allgemeine Referenzierung ein grundsätzliches und oft bauteilspezifisches Problem der Unwuchtmesstechnik. Die Referenzierung bedeutet für die Unwuchtmessung zunächst die möglichst genaue und reproduzierbare Festlegung und Feststellung eines Nullpunktes bzgl. der Winkellage. Bei einer automatischen Bearbeitung zum Ausgleich der Unwucht kommen zusätzlich ein evtl. Bauteilhandling und damit verbunden, neben der Winkellage, Ansprüche an die Wiederholgenauigkeit in horizontaler Richtung hinzu, siehe Abbildung 10. Auf die Herausforderungen beim Bauteilhandling wird detailliert in Kapitel 8 eingegangen.

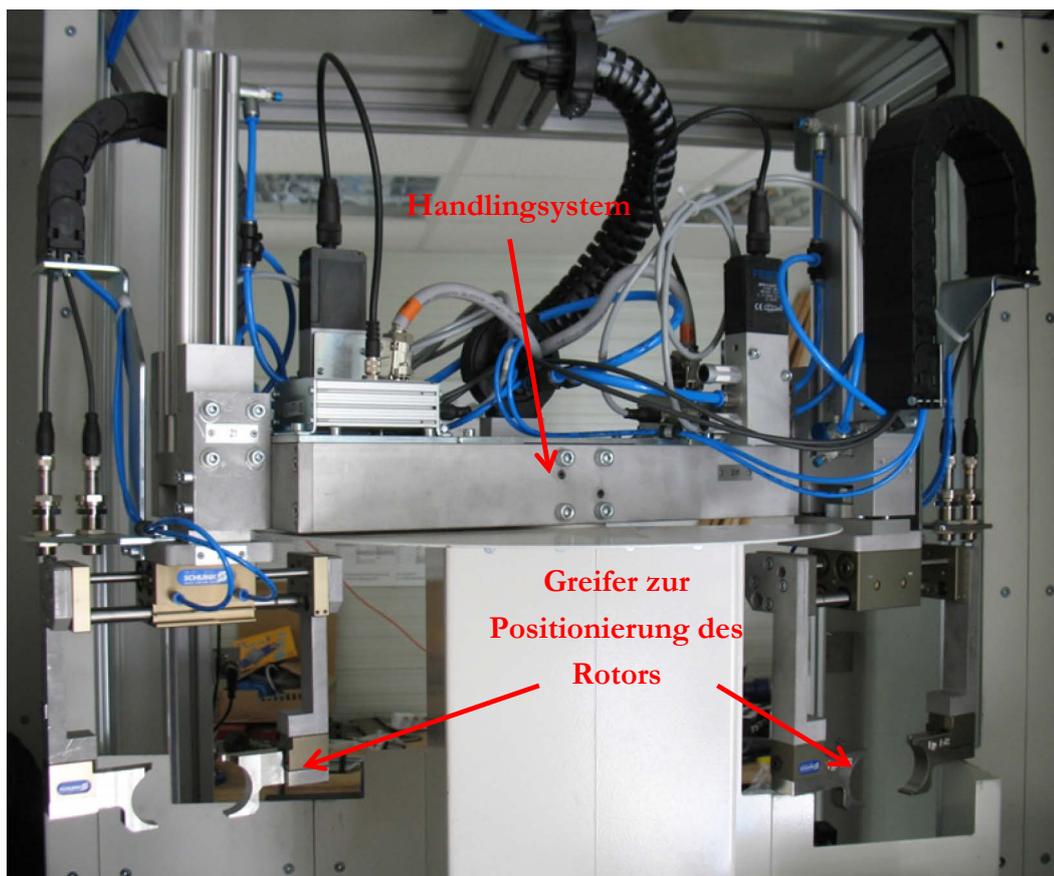


Abbildung 10: Handling für den Transport des Rotors von der Messeinheit zur Ausgleichseinheit

Im Rahmen des Projektes wurden optische Sensoren (Lasertaster) zur Erfassung einer Markierung oder natürlichen Kante am Bauteil eingesetzt und erprobt, siehe Abbildung 11.

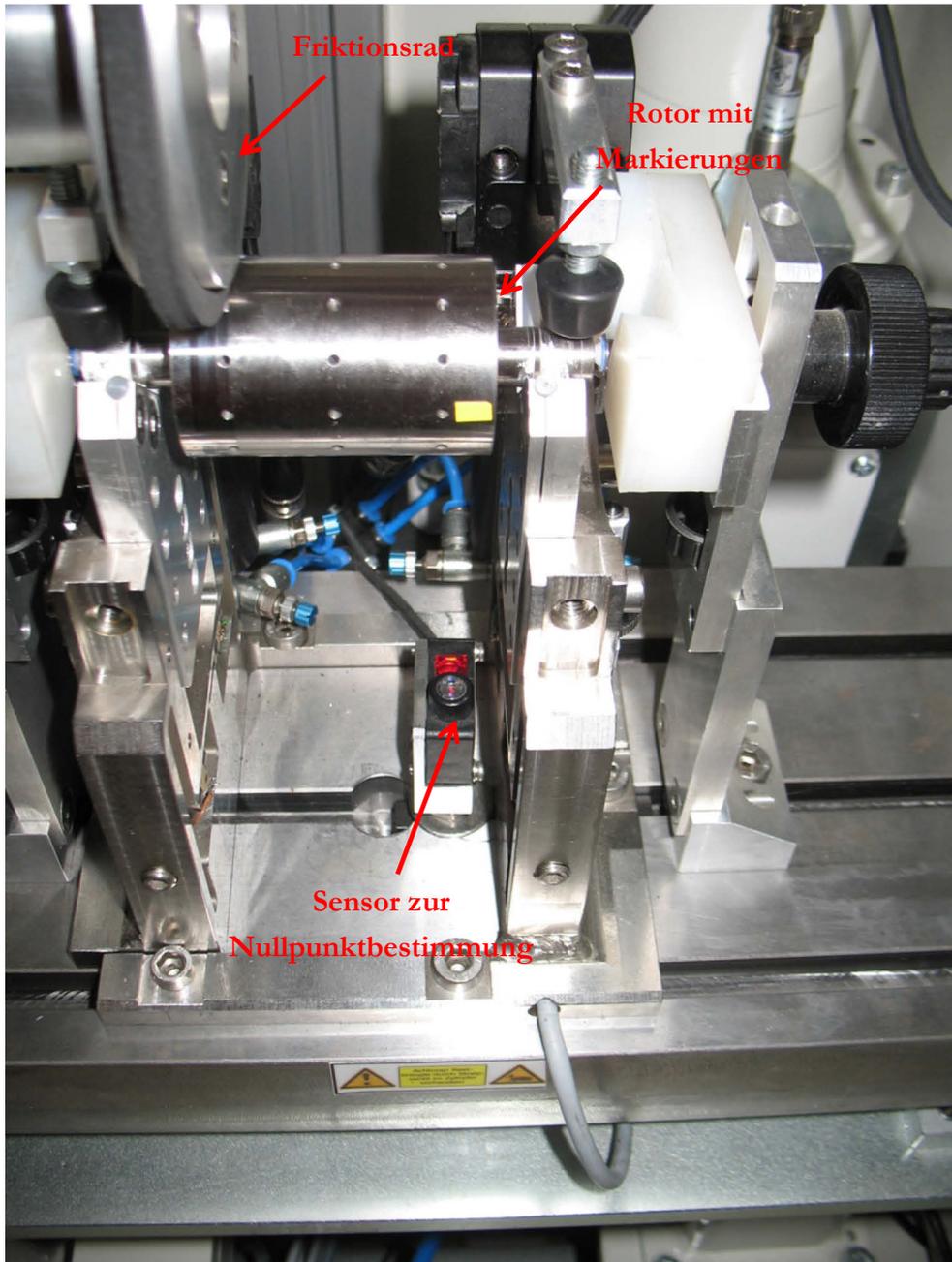


Abbildung 11: Nullmarker und optischer Sensor zur Erfassung einer Markierung am Bauteil

Die eingesetzte Laseroptik hatte eine Wellenlänge von 660nm und war in sechs verschiedenen Messgeschwindigkeiten (sogenannten „Modi“) einstellbar.

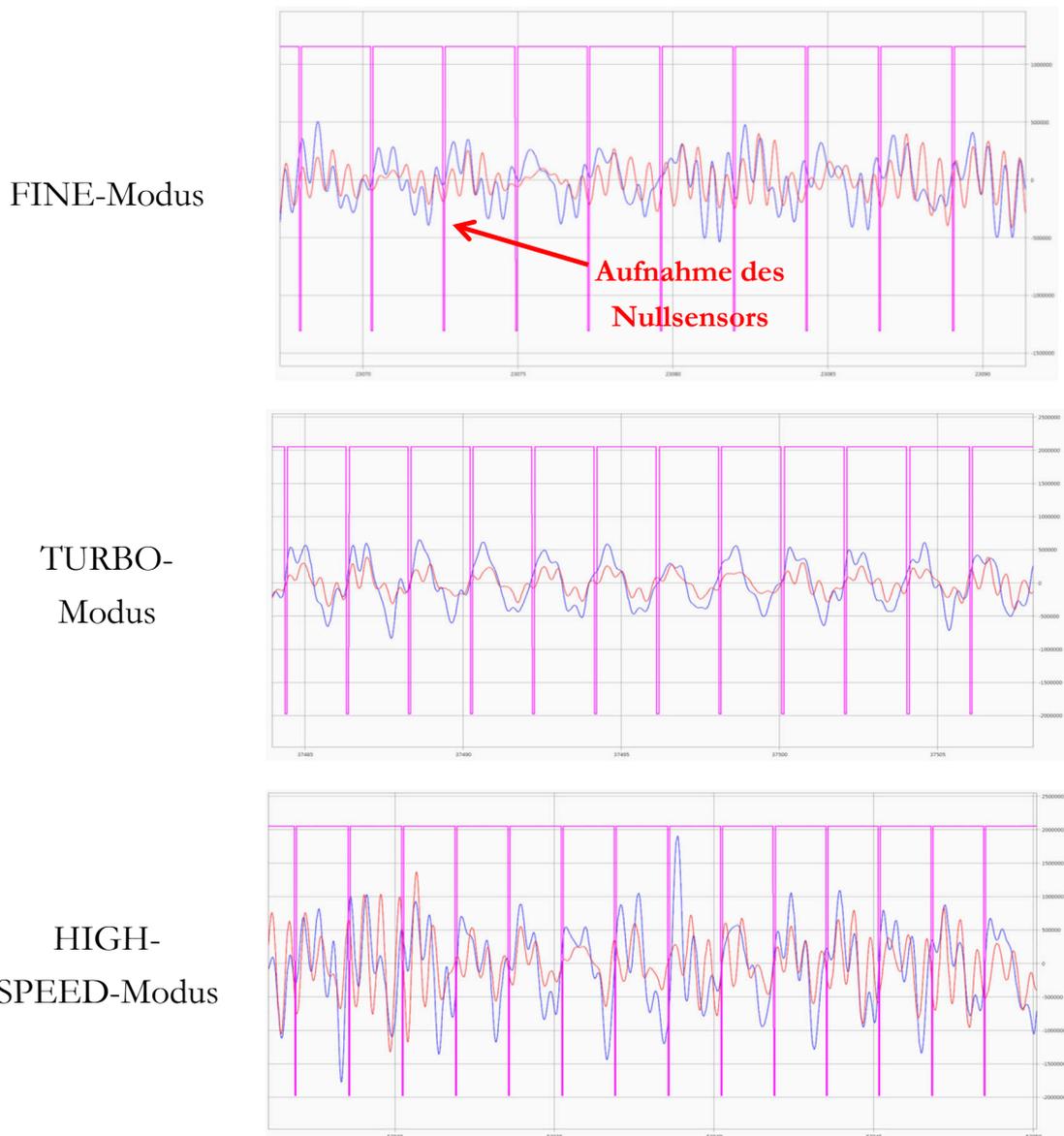


Abbildung 12: Maximale Abtastrate des Nullsensors im FINE-Modus (oben), TURBO-Modus (mitte) und HIGH-SPEED-Modus (unten)

Hierbei musste mit zunehmender Messgeschwindigkeit der Abstand zwischen Sensor und Rotor verringert werden, wobei Abstände zwischen 200mm und 1000mm eingestellt werden konnten. Versuche erfolgten bei einem Abstand von 200mm mit dem Ziel, die maximale Messgeschwindigkeit einzustellen. Dies minderte die Phasenverschiebung zwischen tatsächlichem und gemessenem Nullpunkt. Abbildung 12 zeigt Untersuchungsergebnisse zu Aufnahmen des Nullsensors (vertikale Linien) bei unterschiedlichen Modi. Zu erkennen ist, dass

im HIGH-SPEED-Modus viel höhere maximale Drehzahlen detektierbar sind im Vergleich zum FINE- oder TURBO-Modus.

Bei komplexen Bauteilen ist die Festlegung eines Referenzpunktes (Nullpunkt) einerseits von wesentlicher Bedeutung für die Qualität der Unwuchtmessung, andererseits aber kritisch bzgl. der exakten Fixierung. Ob eine hinreichende Langzeitstabilität auch unter ggf. schwierigen Produktionsbedingungen erreichbar ist, konnte noch nicht untersucht werden. Prinzipiell ist es sinnvoll den Einsatz induktiver Sensoren für spezielle Bauteile in Erwägung zu ziehen.

Für die realisierte Einheit zum Bauteilhandling und der mechanischen Unwuchtkorrektur wurden ebenfalls Lasertaster eingesetzt. Für die Justage des Werkzeugeingriffs wurde ein neuartiger Ankratzsensor erprobt, worauf detailliert in Kapitel 8 eingegangen wird. Das Handlingsystem erreichte stabile Genauigkeiten von unter 0,1mm. Dabei konnte mittels Ankratzsensor die Berührung zwischen Rotor und Werkzeug beim Ausgleich exakt ermittelt und der Vorschub entsprechend gesteuert werden.

Im Rahmen des Projektes wurden durch alle Partner auch aktuelle Sicherheitsrichtlinien (gemäß Maschinerichtlinie) beachtet und umgesetzt. Dies betraf Schutzeinrichtungen für Technik und Bediener. Neben mechanischen Vorkehrungen (Schutzbügel, Schutztüren, Gehäuseausführungen) wurden jeweils elektronische Schutzgeräte (zweikreisig) eingesetzt. Auf die Vorkehrungen bei der Sicherheitstechnik wird detailliert in der Beschreibung des rechnergestützten Versuchsstandes eingegangen.

6.4 Fazit

Die messtechnische und konstruktive Konzeption des Systems AWUSYS erfolgte in enger Zusammenarbeit aller Partner. Die technisch detaillierte Konkretisierung der einzelnen Aufgabenstellungen aus dem Gesamtziel war äußerst hilfreich für die erfolgreiche Umsetzung.

ICOM konzipierte und realisierte sowohl die Messtechnik als auch sämtliche Steuerungs- und Bediensoftware bis zu funktionstüchtigen Lösungen. Offen sind Langzeiterprobungen sowie generelle Optimierungen.

WVN erarbeitete die gesamte Konstruktion der Messanlagen für alle Versuchsaufbauten. Störquellen wurden erfasst und konstruktiv, insbesondere beim Antrieb und der Lagerung, minimiert. Ein neuartiger Friktionsantrieb erwies sich als sehr praktikabel und störsicher, auch hier sind Langzeiterfahrungen aber noch nicht vorhanden.

Fa. Schindler entwickelte das gesamte Handling und die Strategie zur automatisierten Bearbeitung von Werkstücken. Das System wurde am rechnergestützten Versuchsstand gemeinsam mit der von ICOM entwickelten Steuerung vollständig in Betrieb genommen und erprobt, siehe auch Kapitel 8.

7. Softwarearchitektur und Algorithmen

Das Ausschöpfen moderner rechentechnischer Methoden und prinzipieller Möglichkeiten zur Verbesserung der Unwuchterfassung und deren Korrektur war Kernpunkt von AWUSYS. Dies betrifft sowohl die Datenerfassung, (Verarbeitung von Signalen gegenphasig montierter Sensoren), als auch die weitere Datenaufbereitung bis zur eigentlichen Unwuchtbestimmung. Zwar wurde auf bestehende Erkenntnisse und Erfahrungen (Literatur, Wettbewerber, Kundenerfahrungen) zurückgegriffen und dieses Wissen in die Algorithmierung einbezogen; generell wurden im Rahmen von Awuys hier jedoch ausschließlich neue Programme und Algorithmen entwickelt.

Schließlich erfolgte die programmtechnische Umsetzung, wobei alle PC-Anwendungsmodule auf .net-Framework und C# für Windows-Betriebssysteme (Vista, Win7, Win8) basierten. Die Datenverwaltung (Erfassung, Verarbeitung, Logging), Datenverarbeitung (Verknüpfung, Interaktion, Reaktion) und Datenpräsentation (Visualisierung, Bediener-interface) erfolgte gemäß dem 3-Schichten-Modell moderner Rechner-Anwendungs-Architekturen:

- Datenschicht
- Steuerungsebene
- Präsentationsebene.

Modulare Strukturen von Datenbanken dienten als zentrale Basis (Strukturen, Soll- und Istdaten) und teilweise als Vorverarbeitungseinheit (schnelle Suche) der Anwendungsmodule.

7.1 Kreuzkorrelation als Rechenbasis

Der entscheidende Algorithmus zur Unwuchtbestimmung ist die Berechnung der Korrelation zwischen der Mess- bzw. Arbeitsdrehzahl des Rotors zu einer Fehlstelle. Dazu ist grundsätzlich die Kreuzkorrelation zwischen Nullpunkt- und Messsignal möglich und gebräuchlich. Da hierbei die relevante Signalform bekannt ist, kann eine Fehlstelle mittels Kreuzkorrelation sehr genau hinsichtlich Winkelstellung ermittelt werden. Ein Fehlbetrag der Unwucht kann zunächst nur

als relative Größe bestimmt werden. Für die absolute Berechnung ist der Vergleich mit einem Normal erforderlich.

Hinsichtlich der Anordnung der Messpunkte bzgl. der Lager- und der Unwucht-Ausgleichsebenen wurde für eine 2-Lager-Anordnung ein allgemeiner Algorithmus zur freien Umrechnung der Ausgleichsebenen (bzw. -punkte) in horizontaler wie radialer Richtung implementiert. Der in Abbildung 13 dargestellte Algorithmus liefert die Umrechnung zwischen den einzelnen konfigurierbaren Ebenen. Er kann das Ergebnis in Lager-, Ausgleichs- und Kalibrierebene liefern. Nach Umrechnung wird der Radius der jeweiligen Ebene berücksichtigt, so dass das Ergebnis direkt als Masse angeben werden kann.

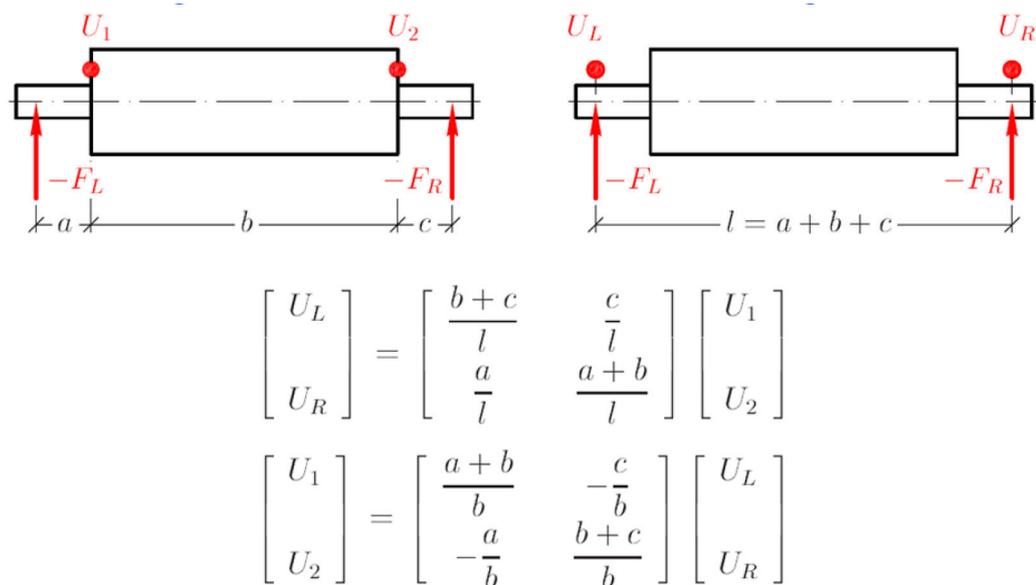


Abbildung 13: Algorithmus zur Umrechnung der Unwucht zwischen einzelnen, konfigurierbaren Ebenen [51]

Um systematische Störungen zu unterdrücken und eine reale Größe der Unwucht zu erhalten, war eine Kalibrierung des zu messenden Rotors notwendig. Diese erfolgte in drei Schritten:

- Unwuchtmessung: Messung eines Referenzrotors gleichen Typs wie der zu Messende.
- Kalibrierung der linken Ebene mit einer definierten Unwucht auf der linken Kalibrierebene des Rotors.

- Kalibriermessung der rechten Ebene mit einer definierten Unwucht auf der rechten Kalibrierebene des Rotors.

Aus diesen drei Messungen wurden die Unwuchten wie folgt berechnet, wobei gilt:

- S_L und S_R : Ermittelte Urunwuchten [gmm] in der linken und rechten Ausgleichsebene während der Kalibrierung
- Q : Testmassen [g]
- U_L und U_R : Reale Unwuchtergebnisse [gmm] in der linken und rechten Ausgleichsebene
- α_L und α_R : Komplexe dynamische Einflusszahl in der linken und rechten Ausgleichsebene

- Urunwuchtlauf:

$$\begin{aligned} S_L &= \alpha_{L1} U_1 + \alpha_{L2} U_2 \\ S_R &= \alpha_{R1} U_1 + \alpha_{R2} U_2 \end{aligned}$$

- Testlauf mit Urunwucht und Q_1 :

$$\begin{aligned} S_{L1} &= \alpha_{L1} (U_1 + Q_1) + \alpha_{L2} U_2 \\ S_{R1} &= \alpha_{R1} (U_1 + Q_1) + \alpha_{R2} U_2 \end{aligned}$$

- Testlauf mit Urunwucht und Q_2 :

$$\begin{aligned} S_{L2} &= \alpha_{L1} U_1 + \alpha_{L2} (U_2 + Q_2) \\ S_{R2} &= \alpha_{R1} U_1 + \alpha_{R2} (U_2 + Q_2) \end{aligned}$$

- Komplexe dynamische Einflusszahlen aus der Differenzbildung der Gleichungen

$$\begin{aligned} \alpha_{L1} &= \frac{S_{L1} - S_L}{Q_1} & \alpha_{L2} &= \frac{S_{L2} - S_L}{Q_2} \\ \alpha_{R1} &= \frac{S_{R1} - S_R}{Q_1} & \alpha_{R2} &= \frac{S_{R2} - S_R}{Q_2} \end{aligned}$$

- Berechnung der Unwucht:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{d} \begin{bmatrix} \alpha_{R2} & -\alpha_{L2} \\ -\alpha_{R1} & \alpha_{L1} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_L \\ S_R \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad d = \alpha_{L1} \alpha_{R2} - \alpha_{L2} \alpha_{R1}$$

- Resultierende Unwuchten:

$$U_1 = Q_1 \frac{S_{R2} S_L - S_{L2} S_R}{S_{L1} S_{R2} - S_{L2} S_{R1} + (S_{R1} - S_{R2})S_L - (S_{L1} - S_{L2})S_R}$$

$$U_2 = Q_2 \frac{S_{L1} S_R - S_{R1} S_L}{S_{L1} S_{R2} - S_{L2} S_{R1} + (S_{R1} - S_{R2})S_L - (S_{L1} - S_{L2})S_R}$$

Um die Empfindlichkeit des Algorithmus durch Störsignale zu überprüfen, wurden entsprechende Versuche an den dafür vorgesehenen Versuchsanordnungen durchgeführt.

Aufgrund der hohen Qualität der primären Messsignale (2-Sensor-Anordnung) wurde ein sehr robustes Verhalten des Auswertalgorithmus festgestellt. Hierbei war es möglich, Messläufe durch bewusste breitbandige Störerzeugung zu beaufschlagen, ohne damit die Grenze der Auflösung (keine Unwucht mehr feststellbar) zu verändern. Dieses Ergebnis zeigte, dass die Korrelation mit bekanntem Signal sehr sicher erfolgt. Empfindlicher gestört wurden die Versuchsanordnungen durch harmonische bzw. synchrone Fehlsignale zu den Mess- bzw. Antriebsfrequenzen.

Auf diesen Erkenntnissen aufbauend wurde zwar weiter nach Alternativen oder zusätzlichen Verfahren zur Verbesserung der Störuneempfindlichkeit gesucht, die aber nicht als wesentliches Problem im Rahmen des Vorhabens eingestuft wurden.

7.2 Ansatz zum Filtern von Störungen

Störungen der Unwuchtmessung ergeben sich aus zwei wesentlichen, unterschiedlichen Quellen. Einerseits asynchrone Zufallsstörereignisse, andererseits harmonische (oder sogar synchrone) Störungen durch den eigenen Messantrieb. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit und Messauflösung bei zugleich nur kurzem Messvorgang sind sowohl Einzelstörungen, als auch harmonische Störungen relevant für die Messergebnisse. Wie in Kapitel 7.1 dargestellt, hat sich die Kreuzkorrelation im Verbund mit der 2-Sensor-Anordnung als relativ empfindlich gegenüber zufälligen Störungen gezeigt.

Hinsichtlich harmonischer Störungen, die in Zusammenhang mit bekannten Quellen (Antrieb, Betrieb, Werkzeuge etc.) gebracht werden können, ist eine rechentechnische Korrektur möglich. Neben rein pragmatischen Lösungen, wie:

- Messung und Bearbeitung physisch und logisch trennen, ggf. zeitlich versetzen,
- Messläufe (auch einzelne Umdrehungen) nur bewerten, die vermeintlich nicht gestört wurden,
- Messdrehzahlen verändern und auf Arbeitsdrehzahlen extrapolieren und hinreichenden Abstand zu Stördrehzahlen halten,

wurde nach alternativen, rechentechnischen Methoden zur Störunterdrückung gesucht. Es gibt sehr viele geeignete Regeln, Algorithmen und Methoden, um die Einflüsse von Störungen zu unterdrücken bzw. zu minimieren. Jedoch sind diese in erster Linie für unbekannte, zu analysierende Messsignale interessant. Im hier relevanten Fall eines bekannten Messsignals bzw. der einfachen Sinusform als Zielfunktion, scheinen einfache Maßnahmen (Ausschluss von harmonischen Schwingungen, Anpassung der Drehzahlen) ausreichend zu sein. Im Automatenbetrieb ist die mechanische Entkopplung und massive Ausführung nicht schwingender Teile ausschlaggebend. Fa. Schindler hat dies im qualifizierten rechnergestützten Versuchsstand durch konstruktive Maßnahmen erreicht, vgl. Kapitel 8.

ICOM hat durch die Ausführung der Steuerung (zeitliche Abfolge) Korrelationen zwischen Messung und Bearbeitung weitgehend vermieden.

Die deutlichste qualitative Verbesserung hinsichtlich der Unterdrückung von Störungen wurde durch die Einführung der 2-Sensor-Anordnung und die demensprechende konstruktive Gestaltung der Messmaschine durch WVN erzielt, vgl. Kapitel 6.

7.3 Neuartige Auswertemethoden zur Unwuchtkorrektur

Die interessanteste zusätzliche Auswertemethode der Rohdaten zur Verbesserung zur Unwuchtkorrektur ist sicher die Fourier-Transformation. Damit ist es bekanntermaßen leicht möglich, das Frequenzspektrum eines

unbekannten Signals zu bestimmen. Dies bedeutet, dass zyklisch auftretende, unbekannte Störeinflüsse so erkannt und unterdrückt werden können.

Aufgrund dieser Erkenntnis wurden entsprechende Untersuchungen mittels Standardprogrammen zur Fourieranalyse vorgenommen. Damit ist es sehr gut möglich, Störfrequenzen zu ermitteln und in der Folge auszublenden, die zunächst nicht bekannt (aber von der Anlage stammend) sind. In der Praxis wurden aber keine neuen relevanten Störquellen gefunden. Es wurde demzufolge darauf verzichtet, eine eigenständige Umsetzung einer Fourieranalyse in die Anlagensoftware zu implementieren. Diese Entwicklung wurde zugunsten wesentlicher Funktionen wie

- nahezu beliebige Extrapolation des Unwuchtausgleichs bzgl. Ort und Drehzahl
- Optimierung der Steuerung

zurückgestellt. Dennoch bleibt dies eine zukünftige Aufgabe und weiteres Entwicklungsziel mit Verbesserungspotenzial in spezifischen Fällen.

Die Rohdaten einer Auswuchtbestimmung beinhalten normalerweise Betrag und Winkel der Unwucht. Die Winkelbestimmung bezieht sich auf den Nullpunkt. Dessen genaue Zuordnung zur Messung ist kritisch. Die Betragsermittlung ist zwar absolut, bedingt aber in jedem Fall ein Referenzobjekt (Normal) bekannter Unwucht zur Berechnung. Praktisch muss immer ein zeitlicher Versatz zwischen Nullpunkt und dessen korrekter rechentechnischer Bewertung hingenommen werden. Im eingeschwungenen Zustand ist dies leicht zu korrigieren, jedoch bei angestrebten sehr schnellen Messvorgängen (nur wenige Zyklen zu Unwuchtbestimmung) entsteht ein nicht mehr vernachlässigbarer Fehler.

Hierzu wurden Untersuchungen vorgenommen und in der Praxis Steuerstrategien eingesetzt, die anhand von Erfahrungswerten diesen „Schlupf“ bei verschiedenen Messdrehzahlen bewerten und in die Auswertung eingehen lassen. Im Ergebnis ist die AWUSYS-Unwuchtbestimmung weitgehend von der Messdrehzahl unabhängig. Letztere kann dynamisch so gewählt werden, dass harmonische Störfrequenzen nur untergeordneten Einfluss erlangen.

7.4 Sonderextrapolation unter Berücksichtigung verbotener Zonen

Bei realen Rotoren gibt es meist verbotene Zonen für den Unwuchtausgleich. Ein Masseauf- oder -abtrag ist nur an dafür erlaubten (ggf. sogar vorgesehenen) Stellen möglich. Dies erforderte die Erarbeitung geeigneter Konzepte, um eine ermittelte Unwucht so auszugleichen, dass keine verbotenen Zonen betroffen sind. Diese prinzipielle Technologie ist automatisierbar und entspricht dem üblichen Vorgehen im Werkzeug- und Maschinenbau. Auch in AWUSYS wurde diese grundsätzliche Technik im qualifizierten Versuchsstand angewendet (siehe Kapitel 8). Der Ausgleich erfolgte hier mittels Fräswerkzeugen in verfahrbaren Bohrspindeln.

Grundsätzlich ist auch der Masseauftrag von großem Interesse und eine in der Zukunft möglicherweise zunehmend praktikable Technologie. Ein sehr feinfühlig steuerbares Auftragschweißen, wie in AWUSYS zusätzlich untersucht (vgl. Kap. 9), stellt eine Alternative dar, die sowohl technisch als auch ökonomisch vorteilhaft sein kann.

Die festgelegten Korrekturstrategien für verbotene Zonen wurden auf erlaubte Stellen extrapoliert. Rechentechnisch erfolgte ein Ausweichen in allen Dimensionen (mehrere Winkel bei gleichem Durchmesser, unterschiedliche Durchmesser, axiale Verschiebung), basierend auf entsprechend entwickelten und erprobten Algorithmen. Darüber hinaus wurden durch den Maschinenbau mechanisch aufwändige Konstruktionen geschaffen, die es erlauben, Werkzeuge und Werkstücke in weiten Bereichen entsprechend berechneter Vorgaben zu justieren und relativ zu verstellen, siehe Kapitel 6.

Neben dem grundsätzlichen Ausgleichsverfahren stellt die mathematisch-rechentechnische Umsetzung von Extrapolationsverfahren zur Korrektur der Unwuchten einen erheblichen Anspruch dar. Dies betrifft die Umrechnung von Ausgleichsstellen auf

- alternative Radien
- alternative Ebenen
- zwei oder mehrere Winkel

und dabei die möglichst allgemeingültige Berücksichtigung der Rotorgeometrien. Im Rahmen von AWUSYS wurde hierzu ein komplexes Berechnungstool implementiert, welches sehr leicht auf konkret wechselnde Anforderungen anpassbar ist.

Abbildung 14 zeigt beispielhaft das Bedienerinterface mit grafischer Darstellung zur Deklaration von Rotoren.

Rotoren

Name	Nummer	Änderungsdatum
Rotor Type A	1	19.05.2014 14:31:00
Testrotor 600g	2	19.05.2014 14:38:42
Testrotor 250g	3	21.05.2014 11:22:06

Konfigurationsdaten

Masse	600 g
Anzahl Umdrehungen	100
Messoffset	10
Auswuchtdrehzahl	2000 min ⁻¹
Betriebsdrehzahl	60000 min ⁻¹
Nullemmentzick	1
Nullemmorientierung	positiv
Auswuchtgröße	1
Lagerungsart des Lagers 1	Kugellager
Lagerungsart des Lagers 2	Kugellager
Durchmesser der Ebene: 2	80 mm
Durchmesser der Ebene: 1	40 mm
Toleranz der Ebene: 2	0.008 gmm
Toleranz der Ebene: 1	0.008 gmm
Ausgleichsvorgang in der Ebene: 2	Abtrag
Ausgleichsvorgang in der Ebene: 1	Abtrag
Bohrergreife in der Ebene: 2	7 mm
Bohrergreife in der Ebene: 1	5 mm
maximale Bohrtiefe in der Ebene: 2	1,5 mm
maximale Bohrtiefe in der Ebene: 1	6 mm
Dichte des Materials in der Ebene: 2	1 g/cm ³

Zusätzliche Einstellungen
Winkel in denen nicht Ausgeglichen werden kann 2-10, 15

Kundendaten
SPS - Grundeinstellungen

Anstehende Meldungen

Abbildung 14: Bedienerinterface mit graphischer Darstellung zur Deklaration von Rotoren

7.5 Fazit

Die Algorithmierung und Softwarearchitektur war die wesentliche Aufgabe der Fa. ICOM im Rahmen von AWUSYS, darüber hinaus die programmtechnische Umsetzung. Jedoch haben alle Partner Beiträge zu Störunterdrückung, -vermeidung und -reduzierung erbracht, die durch den konstruktiven Aufbau, die materialtechnische Ausführung und die zeitlichen Abfolgen erreicht wurden.

Die Kreuzkorrelation als Basis zur Ermittlung der Unwucht aus den Messsignalen erweist sich anhand der Untersuchungen von ICOM als äußerst robustes und wenig störanfälliges Verfahren. Sie sollte weiterhin als primärer Algorithmus eingesetzt werden. Alternative Algorithmen sind in Sonderfällen und ggf. als zusätzliche Funktionalitäten sinnvoll.

Die Verbesserung des Störabstandes der Sensorsignale durch eine gegenphasige Montage entsprechend der Konstruktion von WVN trägt wesentlich zur Robustheit und etwas zur Verbesserung der Genauigkeit bei. Zudem sind mechanische Maßnahmen zur Entkopplung der Messanlage von der Bearbeitungseinheit (vgl. Kapitel 8) für automatische Auswuchtanlagen unerlässlich. Der von Schindler entwickelte Aufbau hat sich hierbei bewährt, vgl. Kapitel 8.

Die TU Ilmenau hat im Rahmen von Untersuchungen zu Auf- und Abtragstrategien (vgl. Kapitel 9) wesentliche Erkenntnisse zu Einflüssen der Bearbeitung erzielt. Diese wurden mathematisch formuliert und sind in die Softwareentwicklung für die Steuerung der Auswuchtanlage eingegangen.

8. Rechnergestützter Versuchsstand

Der qualifizierte automatisierte Versuchsstand, bestehend aus Auswuchtmaschine und Komponenten zum Handling und zum Masseausgleich (Bohren/Fräsen), sowie SPS- und Rechnersteuerung, erforderte die besonders intensive Zusammenarbeit des gesamten Konsortiums AWUSYS. Das Ziel war die Entwicklung und Erprobung eines funktionstüchtigen Systems bis zum Projektende. Die hierfür erforderlichen Aufgabestellungen wurden unter den Projektpartnern wie folgt definiert:

- Schindler: Gesamtkonstruktion des Standes, des Handlings und der Bearbeitungseinrichtungen.
- WVN: Konstruktion der Messmaschine mit Friktionsantrieb, der automatisiert schwenkbar und kollisionsfrei zum Handling bewegbar ist.
- ICOM: Entwicklung der gesamten Anlagensteuerung auf Basis einer SPS Simatic7 und Servoantrieben für die Bewegungsvorgänge. Darüber hinaus Überarbeitung und Erweiterung der Leitrechnersoftware.
- TU Ilmenau: Werkzeug- und Werkstoffuntersuchungen hinsichtlich mechanisch-steuerungstechnischer Restriktionen (min./max. Drehzahlen, Eindringtiefen)

8.1 Konstruktive Auslegung und Montage

Der rechnergestützte Versuchsstand ist für das Auswuchten von 5 Rotortypen ausgelegt und besteht aus einer Station zur Unwuchtbestimmung, einer Bearbeitungsstation zum Masseausgleich und einem Handling, welches die Stationen miteinander verbindet, siehe Abbildung 15.

In die konstruktive Auslegung und Realisierung der Station zur Unwuchtbestimmung flossen alle Erkenntnisse aus Kapitel 6 ein. Dies betraf unter anderem die 2-Sensor-Anordnung, die Verwendung von Elastomer-Dämpfungselementen und den Einsatz eines Direktantriebes mittels Friktionsrad.

Um die Taktzeit des Handlings zu minimieren, besteht dieses aus zwei Greifern. So kann gleichzeitig ein Rotor in der Bearbeitungsstation und in der

Auswuchtstation gegriffen und ausgetauscht werden. Dies ist die Grundvoraussetzung für die parallele Durchführung des Bearbeitungs- und Auswuchtvorgangs.

Unter Berücksichtigung der Bearbeitung verbotener Zonen, wurde eine Bearbeitungsstation mit zwei Bohrspindeln zum axialen und radialen Masseabtrag vorgesehen. Hierbei sollte eine nahezu vollständige Bearbeitbarkeit des Rotors gewährleistet werden.

Auf die Bearbeitungsstation, das Handlingsystem und die Sicherheitstechnik wird im Folgenden näher eingegangen.

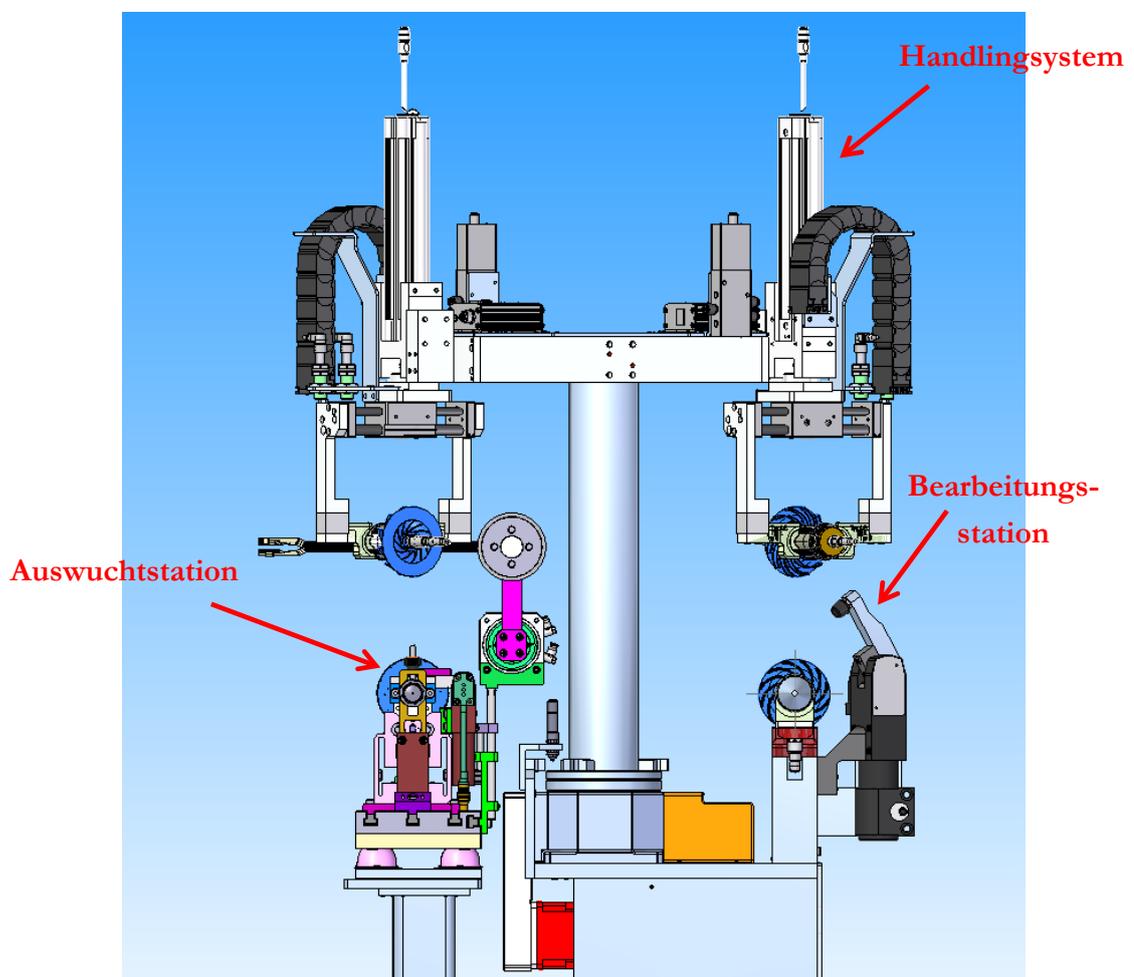


Abbildung 15: Grundlegender Aufbau des rechnergestützten Versuchstandes

8.1.1 Konstruktive Auslegung der Bohrstation

Die Bohrstation ist in Abbildung 16 dargestellt und wurde in zwei Baugruppen unterteilt. Das Bohren in axialer und in radialer Richtung. Die beiden Baugruppen sind sehr ähnlich aufgebaut und bestehen jeweils aus einer Dreheinheit, einem manuell einstell- und klemmbaren Spindellineartisch und einer Vorschubeinheit. Der Spindellineartisch wird benötigt, um den Ort des Materialabtrags auf den jeweiligen Rotortyp einzustellen.

Um die Baugröße des Versuchsstandes möglichst kompakt zu gestalten, wurde eine Bohrspindel mit sehr geringen Abmessungen und geringem Gewicht ausgewählt. Die Masse der Bohrspindel hat direkte Auswirkungen auf die Dimensionierung der nachgeschalteten Antriebe (Vorschubeinheit, Spindellineartisch und Drehmodul) und somit direkten Einfluss auf den Platzbedarf der Anlage. Entsprechend des ausgewählten Rotors fand der Materialabtrag nur in Kunststoff und Messing statt, wodurch die benötigte Leistung der Spindel weiter reduziert werden konnte. Es kam eine luftgekühlte Bohrspindel mit einer Leistung von 0,8 kW zum Einsatz.

Die Positionierung des Bohrers musste sehr präzise erfolgen, um eine möglichst hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit zu erreichen. Dies war neben einer exakten Bestimmung der Bohrtiefe einer der Haupteinflussfaktoren für einen definierten Materialabtrag. Aus diesem Grund mussten die nachfolgenden Antriebe möglichst steif ausgelegt werden. Für den Bohrvorschub kam ein Lineartisch der Firma DiMotion zum Einsatz, welcher über ein Riemenvorgelege mit einem Servomotor angetrieben wurde.

Für die manuelle Verstellung der Bohrposition wurde ein Spindellineartisch der Firma IGUS verwendet. Dieser zeichnet sich durch eine hohe Positioniergenauigkeit und eine hohe manuell einstellbare Vorspannung der Führung aus. Somit konnte die Steifigkeit der Einheit auf die wirkende Belastung angepasst werden.

Die Realisierung der Drehbewegung erforderte eine Einheit, welche zum einen große Biegemomente aufnehmen konnte und zum anderen eine hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit aufwies. Für diesen Anwendungsfall

wurde ein freiprogrammierbarer Rundschalttisch der Firma Weiss eingesetzt. Um die entsprechende Wiederholgenauigkeit zu gewährleisten und Referenzierungsfahrten nach einem Ausschalten der Anlage zu vermeiden, wurde ein Absolutwertgeber eingesetzt.

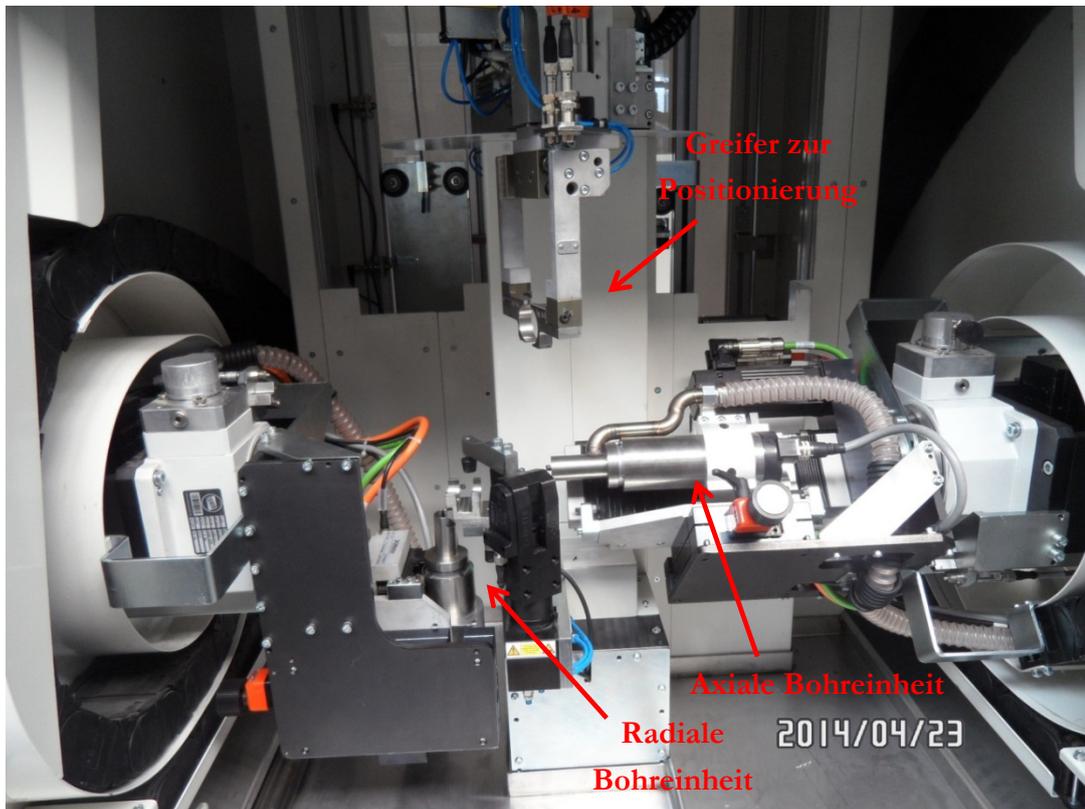


Abbildung 16: Bearbeitungsstation zum Materialabtrag durch Bohren

Eines der größten Probleme bei der Konstruktion der Bearbeitungsstation war neben den beengten Platzverhältnissen die Energiedurchführung zu den Antrieben der Bohreinheiten, siehe Abbildung 17. Da neben den Sensorleitungen auch die Servoleitungen für den Antrieb des Bohrvorschubs und der Bohrspindel, sowie der Schlauch für die Spanabsaugung durch die Drehbewegung geführt werden mussten, wurde eine relativ große Energiekette benötigt. Weiterhin musste darauf geachtet werden, dass die Kabel möglichst keiner Torsionsbeanspruchung unterliegen.

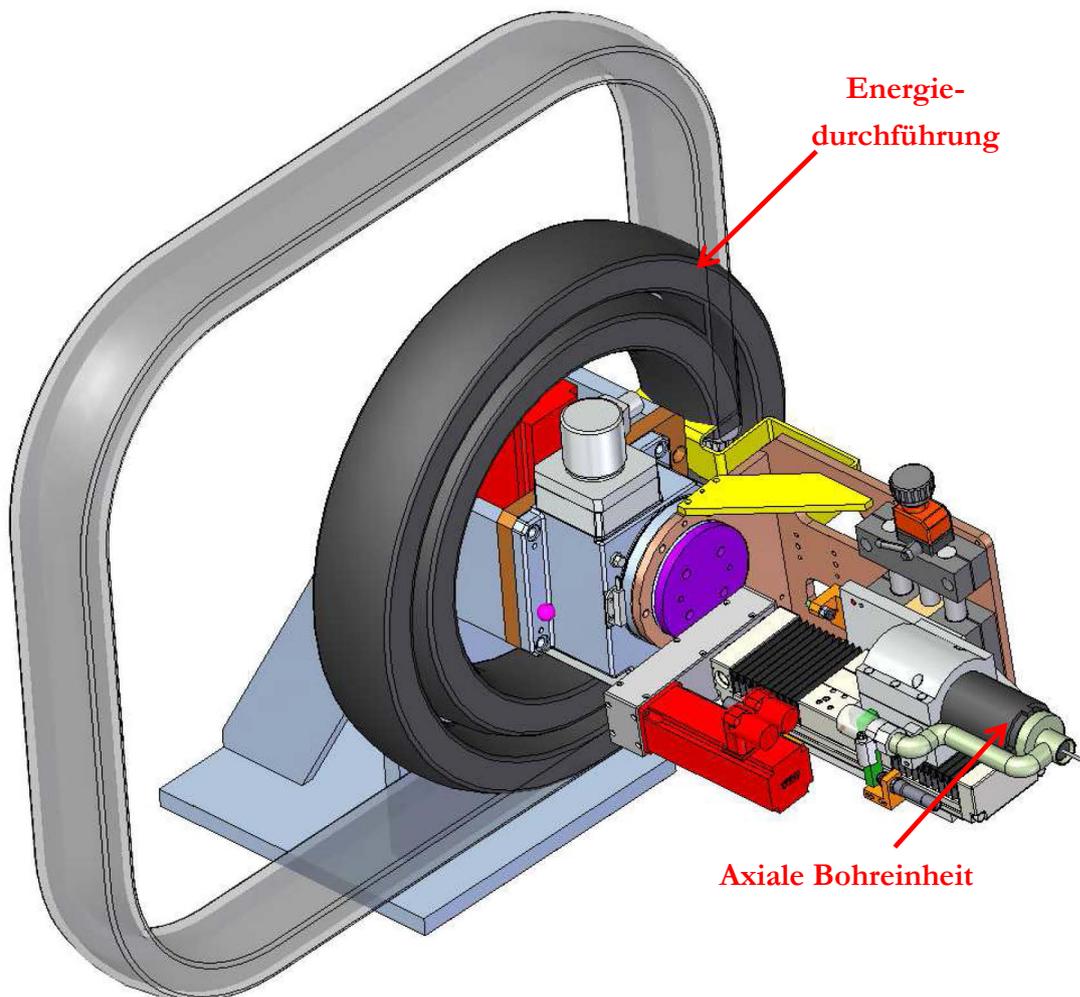


Abbildung 17: Konzept der Energiedurchführung zu den Antrieben der axialen Bohreinheit

Um dieses Problem möglichst platzsparend zu lösen, wurde eine Energiekette senkrecht zur Drehachse angebracht. Dies ermöglichte ein schneckenförmiges An- bzw. Abrollen während des Drehvorgangs, wodurch die Kabel nur Biegebeanspruchungen unterlagen. Die Energiekette wurde entsprechend einer Drehbewegung zwischen 5° und 355° ausgelegt. Hierdurch wird der Materialabtrag über nahezu dem gesamten Rotorumfang gewährleistet.

Zur effektiven Gestaltung der Spanabsaugung musste diese möglichst nah an der Stelle des Materialabtrags installiert werden. Hierzu wurde ein Großteil des Bohrers mit einer „Absaugglocke“ umschlossen, wodurch die Späne direkt

durch den Spankanal des Bohrers in die Absaugglocke befördert werden, siehe Abbildung 18.

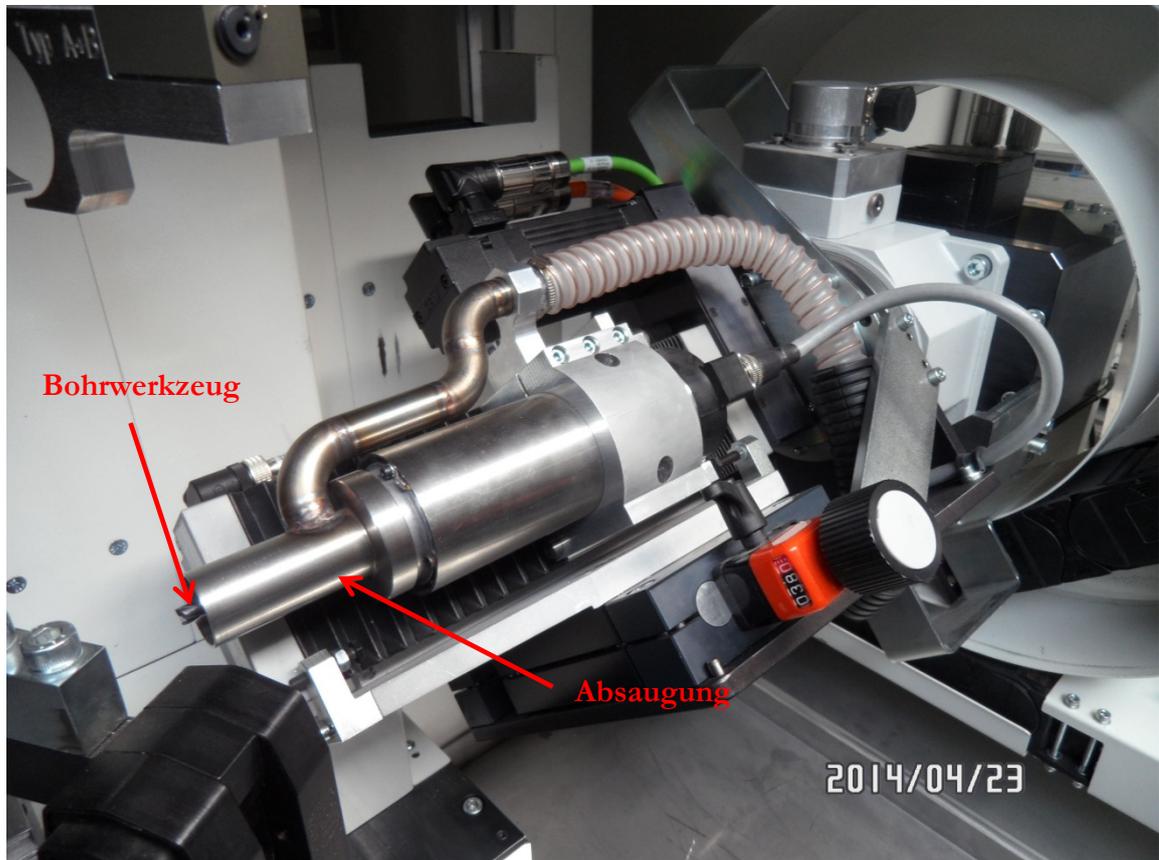


Abbildung 18: Baugruppe zum Axialbohren

Für einen definierten Materialabtrag ist es wichtig, den Zeitpunkt des Eintauchens vom Bohrer in das Material, den sogenannten Ankratzpunkt, exakt zu bestimmen. Da die ausgewählten Rotoren keine zylindrische Form aufwiesen, reicht die Kenntnis über die genaue Einspannlänge des Bohrers nicht aus.

Der Ankratzpunkt musste also direkt während des Bohrvorgangs bestimmt werden, wobei man sich das Prinzip der Schwingungsübertragung zu Nutze machte. Dabei werden mit dem Zeitpunkt der Berührung zwischen Bohrer und Rotor entsprechende Schwingungen erzeugt, die an die Teilaufnahme übertragen und von einem Schwingungssensor detektiert werden. Zur Realisierung möglichst exakter Ergebnisse wurde der Sensor direkt an die Teilaufnahme angebracht, siehe Abbildung 19.

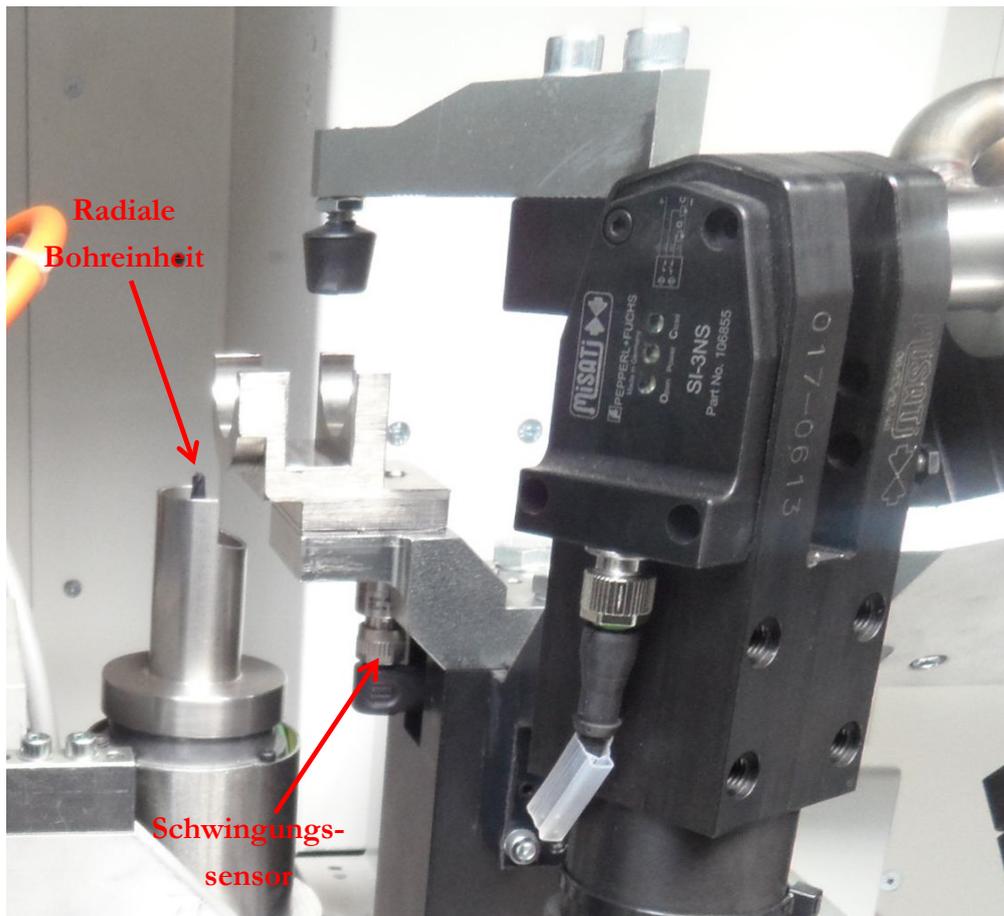


Abbildung 19: An Teilaufnahme angebrachter Schwingungssensor zur Detektion des Ankratzpunktes

Die Verwendung eines Schwingungssensors zur Ermittlung des Ankratzpunktes hat zwar den Nachteil, dass das Bohren in axialer und in radialer Richtung nicht gleichzeitig stattfinden kann. Da der Materialabtrag allerdings in mehreren Bohrzyklen erfolgt, kann die zweite Bohreinheit zeitlich parallel die nächste Position anfahren. Durch diesen steuerungstechnischen Ablauf entstehen kaum Wartezeiten in der Bearbeitungseinheit.

8.1.2 Entkopplung von Bearbeitungs- und Wuchtstation

Um die Taktzeit des Versuchsstands zu minimieren, soll die Unwuchtmessung und Rotorbearbeitung gleichzeitig erfolgen. Hierzu war es zwingend notwendig, dass der Bearbeitungsvorgang (Verfahren der Antriebe, Bohren) keinen negativen Einfluss auf das Messergebnis ausübt. Um die Übertragung von Schwingungen zu minimieren, ist eine große Eigenmasse des Anlagengrundkörpers notwendig. Dies wurde mit Hilfe einer Schweißkonstruktion des Grundgestells realisiert.

Als zweite Maßnahme zur Vermeidung von Schwingungsübertragungen kamen Elastomer-Dämpfungselemente zum Einsatz, wobei auf die Erfahrung von WVN zurückgegriffen werden konnte, vgl. Kapitel 6. Durch entsprechend konstruktive Maßnahmen konnte eine Entkopplung von Wucht- und Bearbeitungsstation erzielt werden, siehe Abbildung 20 und Abbildung 21.

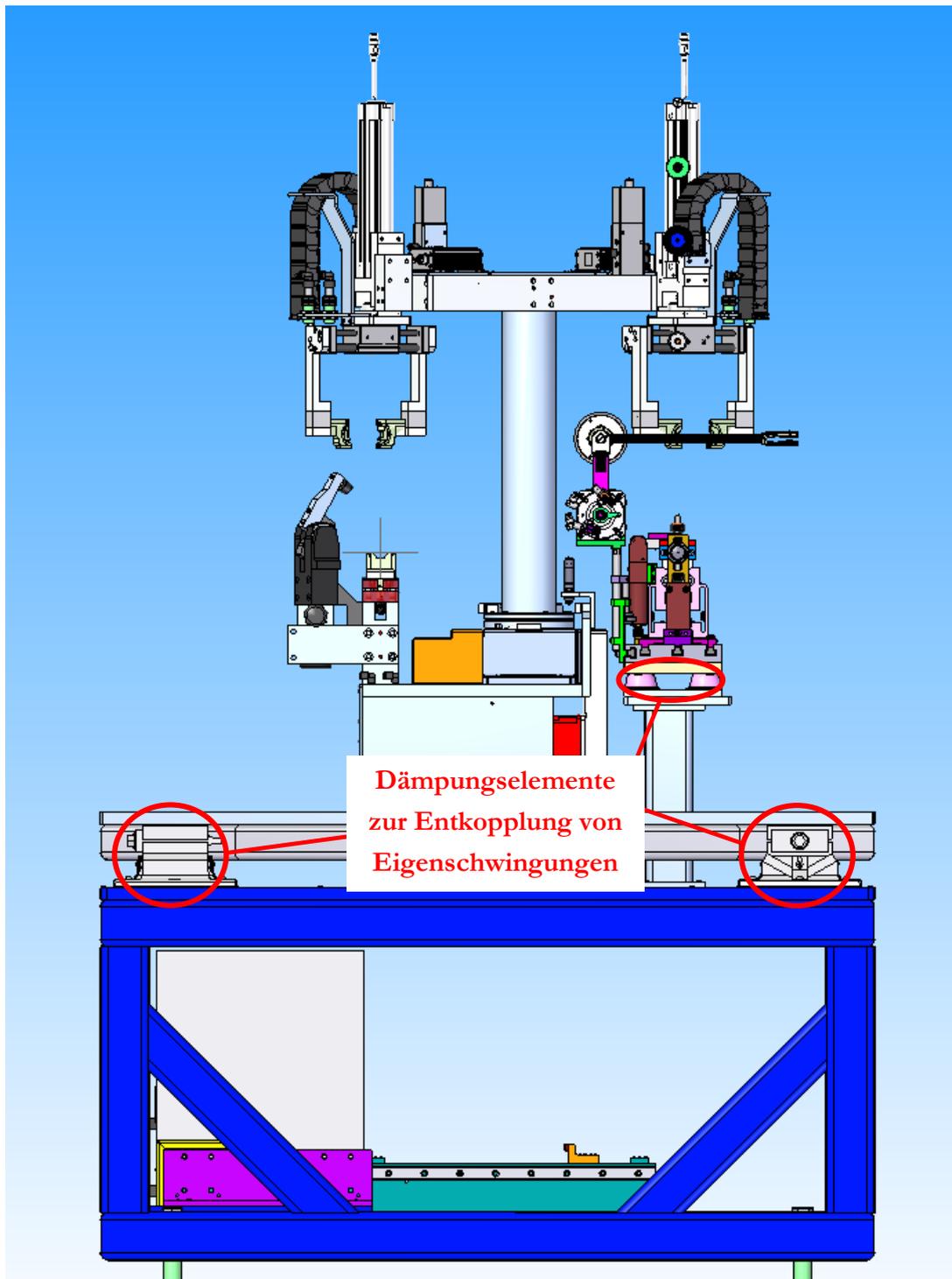


Abbildung 20: Entkopplung von Bearbeitungs- und Wuchtstation durch Dämpfungselemente

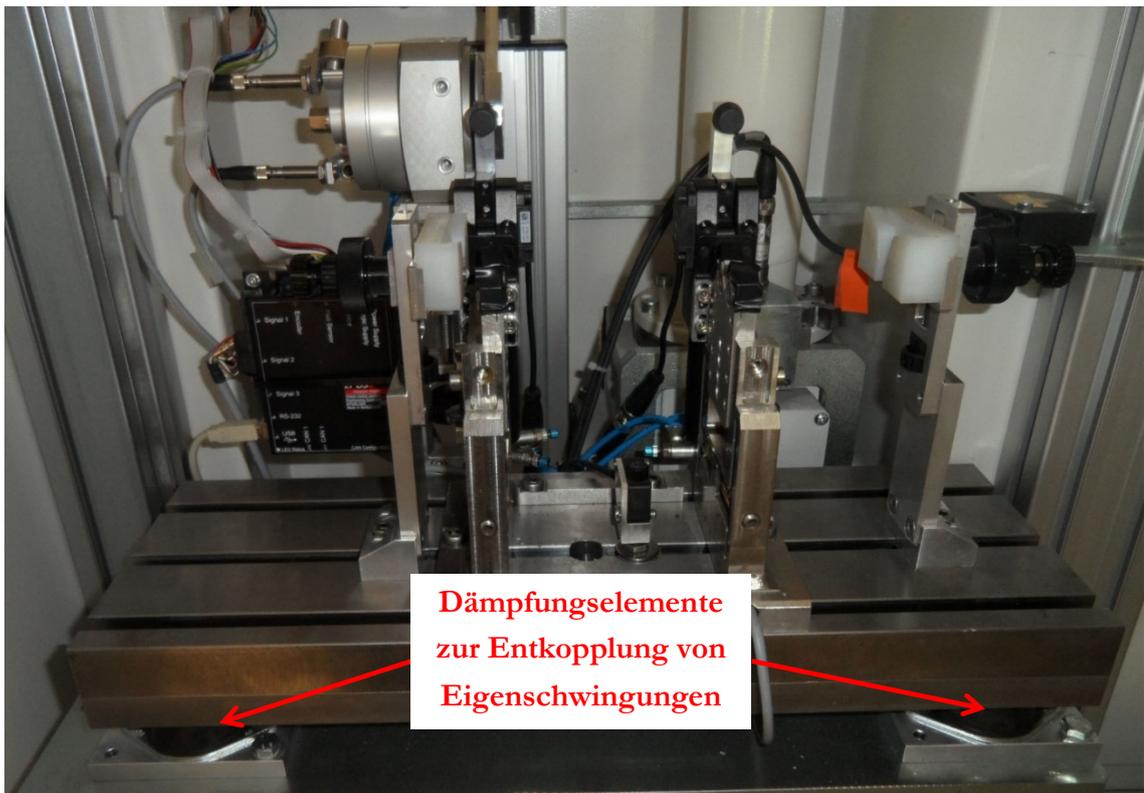


Abbildung 21: Installation der Wuchtstation auf Dämpfungselementen

8.1.3 Konstruktive Auslegung des Handlingsystems

Bei der Konstruktion des Handlingsystems lag der Grundgedanke auf dem Rotor austausch zwischen der Wucht- und Bearbeitungsstation. Da bei den Rotoren vor dem Bearbeiten eine Unwuchtbestimmung erfolgen und diese nach dem Bearbeitungsvorgang nochmals geprüft werden musste (100% Kontrolle), war es zur Minimierung der Taktzeit sinnvoll, zwei Rotoren im Anlagenkreislauf zu haben. Unwuchtmessung und Bearbeitungsvorgang erfolgten somit zeitgleich.

Das parallele Umsetzen beider Rotoren machte den Einsatz zweier Greifer notwendig. Diese sind, entsprechend Abbildung 22, auf einem Drehmodul um 180° versetzt installiert. Der Schwenkradius von 250mm beruhte auf den geometrischen Abmessungen des servogesteuerten Drehmoduls zwischen den beiden Stationen.

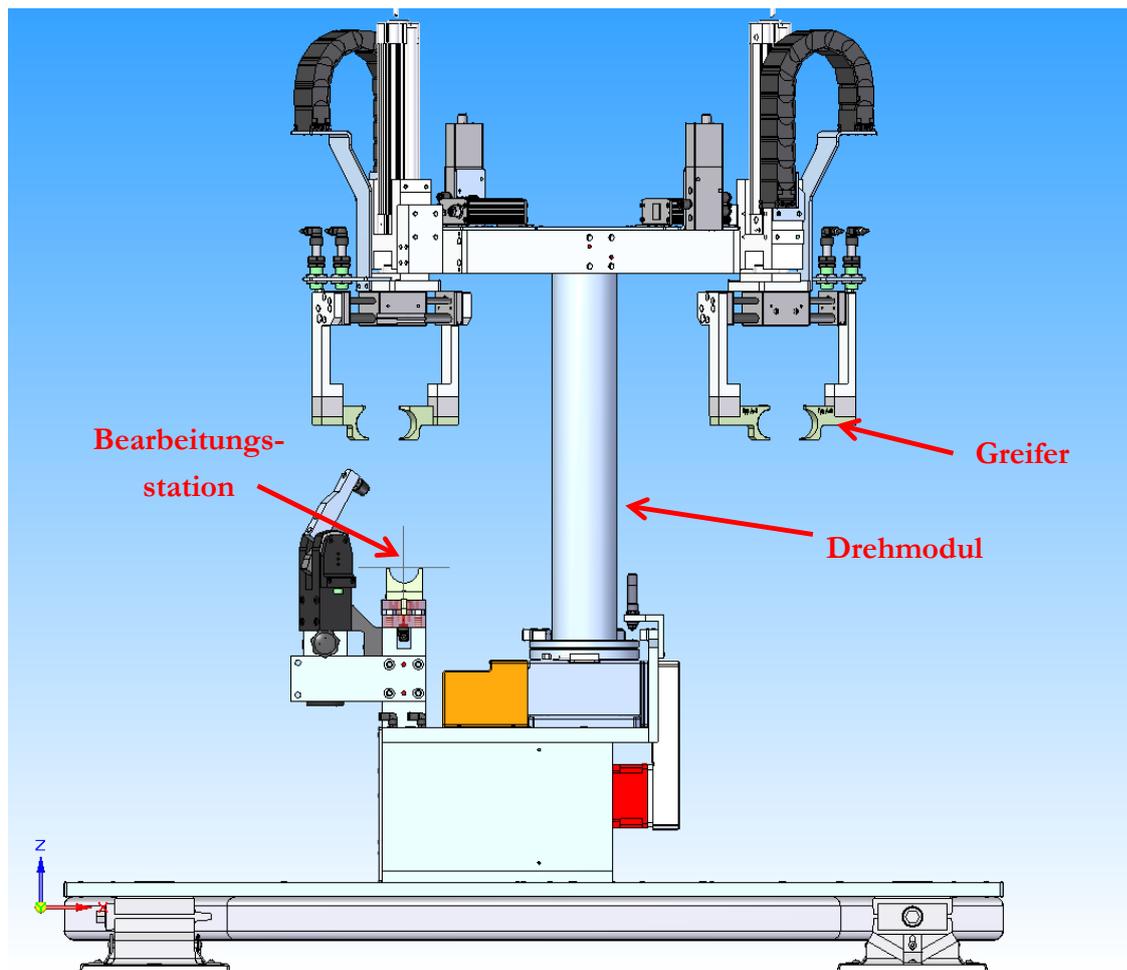


Abbildung 22: Schematische Darstellung des Handlingsystems

8.1.4 Darstellung des Sicherheitskonzepts

Der qualifizierte und rechnergestützte Versuchsstand wurde als halbautomatische Anlage ausgeführt. Das Einlegen bzw. Entnehmen des Rotors in die bzw. aus der Wuchtstation erfolgt manuell durch den Bediener. Die Unwuchtmessung, der Unwuchtausgleich und der Transport zwischen den Stationen erfolgt hingegen automatisch. Aus diesem Grund musste ein Sicherheitskonzept erstellt werden, welches beim Entnehmen und Einlegen eine Verletzung des Bedieners ausschließt. Außerdem musste sichergestellt werden, dass eine automatische Bearbeitung des Rotors erfolgen kann, während in der Wuchtstation ein manueller Austausch der Rotoren stattfindet. Eine weitere Anforderung an das Sicherheitskonzept war die einfache Bedienbarkeit.

An dem Versuchsstand befinden sich zwei Schutztüren zur Bearbeitungs- und Wuchtstation, welche über jeweils einen Sicherheitsschalter mit mechanischer Zuhaltung abgesichert sind, siehe Abbildung 23. Beim Öffnen der Türen wird der Automatikbetrieb abgeschaltet und alle Bewegungen werden gestoppt. Diese Türen müssen nur zum Umrüsten und Einrichten der Anlage geöffnet werden. Im normalen Betrieb ist ein Öffnen nicht notwendig.

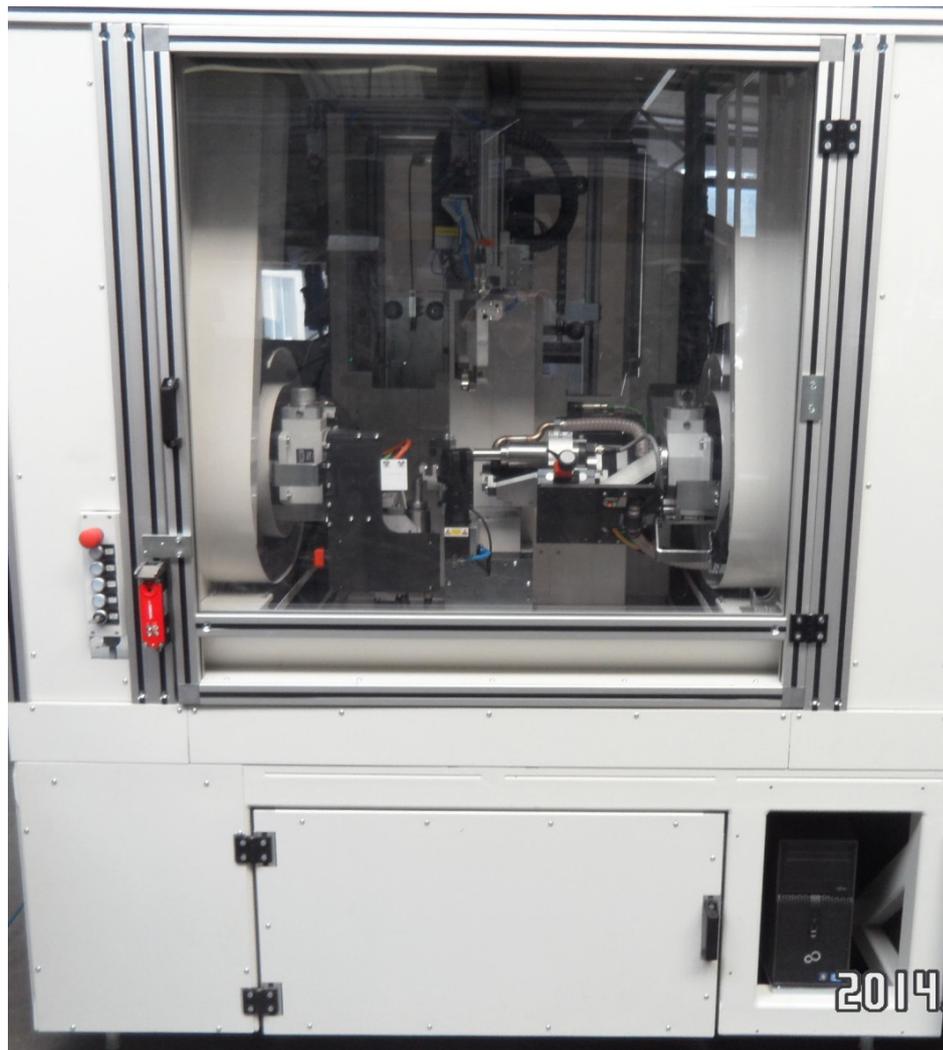


Abbildung 23: Schutztür der Bearbeitungsstation

Zum Be- und Entladen der Rotoren im Betrieb ist in der Schutztür der Wuchtstation ein Fenster integriert, siehe Abbildung 24. Dieses wird beim Einlegen bzw. bei der Entnahme eines Rotors über einen Pneumatikzylinder automatisch geöffnet. Der geschlossene Zustand des Fensters wird durch einen berührungslosen Sicherheitsschalter überwacht.



Abbildung 24: Schutztür der Wuchtstation

Beim Öffnen des Fensters werden alle Antriebe der Wuchtstation und des Handlings abgeschaltet bzw. gesperrt. Die Bearbeitungsstation ist durch eine Blechverkleidung von der Wuchtstation getrennt, so dass ein Übergreifen in den Bearbeitungsraum nicht möglich ist. Hierdurch wird ein Abschalten der Bearbeitungsstation nicht notwendig.

Das Fenster besteht aus einer Kunststoffscheibe (Polycarbonat), welche durch Kunststoffrollen in einer Schiene geführt wird. Um die benötigte Kraft für das Öffnen und Schließen des Fensters zu reduzieren, erfolgte die Krafteinleitung

über ein angetriebenes, umgelenktes Ausgleichsgewicht, siehe Abbildung 25. Hierdurch wird im Fall eines „Einklemmens“ nur die Eigenmasse des Fensters wirksam und dies über einen relativ großen Querschnitt. Es findet demzufolge keine Verletzung des Bedieners statt. Zudem ist an der Außenseite des Fensters ein Griff angebracht, was den manuellen Eingriff durch den Bediener erlaubt.



Abbildung 25: Sicherheitskonzept der Wuchtstation

8.2 Entwicklung der Messtechnik-Hardware

Zur Sensoradaption wurde für den rechnergestützten Versuchsstand ein spezielles Messmodul (Anschluss analoger Sensoren, Signalverstärkung, analog-digital-Wandlung, Rohdatenbereitstellung als serieller Stream) entwickelt, welches im Rahmen des Projektes unter der Federführung von ICOM entwickelt und gemeinsam mit einer Elektronikfachfirma prototypisch aufgebaut wurde. Diese Messtechnik verfügt über einen eigenen Microcontroller zur Steuerung der analog-digital-Wandlung und Bereitstellung der Daten für den übergeordneten Leitrechner, der Datenaustausch erfolgt über Ethernet. Die wesentlichen erreichten Parameter sind:

4 Analogkanäle

- Messverstärker für die hochohmige Adaption von Piezo-Schwingungssensoren
- Symmetrische Eingangssignale
- Anpassbarer Empfindlichkeitsbereich

Instrumentationsverstärker

- 24 bit Analog-Digital-Wandlung des differenziellen Eingangssignals
- Sigma-Delta-Wandlung mit 62,5 kHz Ausgangssamplingrate (Verarbeitung von 62500 Messwerten pro Sekunde für die Unwuchtermittlung)
- 115 dB Dynamikbereich innerhalb der Anpassungseinstellung

Aussteuerungsüberwachung

- Übersteuerungserkennung und -überwachung
- Warnung bei zu kleinem Eingangssignal
- Optimale Eingangsanpassung auf Prüfteilespektrum

Nullpunkt- und Encoderspuren

- Nullpunktsensorik angepasst auf typische Bauteilgeometrie, hier ggf. Nutzung der Radialbohrung (Feinplanung), weitere Nullpunkterkennungen (Prüfmarken etc.) und alternative Nullpunktsensoren möglich
- Galvanische Trennung Nullpunktsensor per Optokoppler
- 80 MHz Abtastfrequenz ermöglicht hohe Auflösungen bei geringer Störanfälligkeit
- Filteralgorithmen in Software, Echtzeitverarbeitung Controller

Die Messelektronik ist über eine schnelle Ethernetverbindung mit dem Bediencomputer verbunden, siehe Abbildung 26. Aus dem Rohdatenstrom wird in Echtzeit die Unwucht nach Betrag und Winkellage ermittelt. Die Basis-Bedienung ist an der PC-Oberfläche möglich (im Standardfall vollautomatisierter Mess- und Korrekturablauf nach Vorauswahl des Prüfprogramms aus der Bauteildatenbank). Die Firmware-Software der Messelektronik kann über den Leitrechner bei Bedarf aktualisiert werden.



Abbildung 26: Schnittstelle zwischen analogem Messsignal und PC per TCP/IP

8.3 Entwicklung der Bediener-Interface

Die Entwicklung der Bedienerinterface für den qualifizierten rechnergestützten Versuchstand umfasste die Schaffung von Programmmodulen für die Bedienung und Beobachtung der wesentlichen Anlagenteile und einzelner Komponenten der Auswuchtanlage. Im Rahmen dieser Arbeiten erfolgte auch die programmtechnische Umsetzung der konzipierten Steuerungs- und Regelfunktionalitäten für das Handling und die Bearbeitung. Dies umfasste die Daten, die in der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) gehalten bzw. von dieser zurück übertragen werden (zur Reaktion auf Störungen und Eingriffe). Es wurde ein modulares und skalierbares Programmsystem für die SPS Simatic S7 als maschinennahes, universelles System entwickelt. Insgesamt erforderte die Bearbeitung dieses Teilbereiches mehrfach Anpassungen an geänderte Schnittstellen und Datenstrukturen im Leitrechnerprogramm. Um auch ohne konkrete Sensoren und Aktoren eine Anlage unter möglichst realistischen Bedingungen testen zu können, wurde ein Simulationsprogramm für die Zeitabläufe und Transportvorgänge entwickelt. Dies stellte zwar einen ungeplanten Mehraufwand dar, hat sich aber in der Folge sehr bewährt und kann auch für die Weiterentwicklung zu einem kommerziellen Produkt, welches derzeit in Bearbeitung ist, genutzt werden.

Entsprechend der ursprünglichen Konzeption und laufender Anpassungen wurde ein komplexes PC-Anwendungsprogramm zur Anlagenbedienung und Visualisierung geschaffen. Dies umfasste in erster Linie die Schaffung von Programmmodulen zur Darstellung der Messläufe und der Ergebnisse (berechnete Werte mehrerer Iterationen, grafische Darstellung von Betrag und Winkel der Unwucht), siehe Abbildung 27.

Das Bedienerinterface ist grundlegend in zwei Spalten eingeteilt. In der linken Spalte ist eine Liste aller Rotoren, die in der Datenbank hinterlegt sind, aufgeführt. Nach der Auswahl eines Rotors sind in der rechten Spalte alle wichtigen Informationen zum Rotor zu sehen; unterteilt in zwei Tabs „Messung“ und „Konfiguration“ können unterschiedliche Funktionen aufgerufen werden. Im Tab „Konfiguration“ kann unter anderem die Lager- bzw. Ebenen- Konfiguration, der Winkel in dem nicht ausgeglichen werden

kann („verbotene Zone“), das Gewicht und die Toleranzen des Rotors eingestellt werden.

Im Tab „Messung“ werden die Messungen gestartet und gestoppt, sowie die Kalibrierung vorgenommen. Außerdem werden hier die Messergebnisse angezeigt und können zusammengefasst in Protokollen gespeichert werden. Während einer Messung werden die aktuellen Ergebnisse in Polarform wie folgt dargestellt:

- Richtung des Nullsensors bezogen auf den Rotor (blaue Pfeile)
- Winkel der Unwucht pro Ebene (gelbe Balken)
- Betrag der Unwucht pro Ebene in Gramm (wandernde Kreise auf dem gelben Balken)

Je weiter der rote Kreis außerhalb des Kreismittelpunktes liegt, desto größer ist die Unwucht. Dabei gibt der dunkelgrüne Bereich in der Mitte des Kreises die Toleranz an. Ist der rote Kreis innerhalb des dunkelgrünen Gebiets, liegt der Rotor in der angegebenen Toleranz.

Darüber hinaus wurde die Grundlage einer Modulbibliothek an Visualisierungskomponenten bzgl. unterschiedlicher Anlagengrößen und -ausstattung geschaffen. Dieses System bildet die Basis der laufenden Weiterentwicklung zur Produktreife. Ziel dabei ist, zukünftige Anlagenoberflächen nicht mehr zu programmieren sondern ausschließlich durch Basisdaten und Parametrisierung automatisch zu generieren. Für die Präsentation der erfassten Protokolldaten wurde eine Skriptsprache entwickelt, die leistungsfähig komplexe Abfragen und das Datenhandling leistet.

Ein geeignetes System zum Aufzeigen und Aufzeichnen von Störfällen und Alarmierungen mit Quantifizierung sind ebenfalls Bestandteil. Die Visualisierung umfasst eine Interaktion hinsichtlich Korrekturmaßnahmen, Bedienerinformationen über den Störfallstatus, sowie Hinweise zu Besonderheiten.



Abbildung 27: Darstellung der Bedienerinterface

Das Visualisierungssystem realisiert den Dialog am Monitor. Innerhalb dieses Arbeitsschrittes wurde auch eine vollständige Datenbank und Bedieneroberfläche zur Eingabe und zum Handling der Parameter entwickelt, vgl. Abbildung 14. Die Entwicklung der Bedienerinterface und der zugrunde liegenden Datenbanken wurde bis zur, für Testzwecke ausgereiften, vollständigen Datenbank zum Handling der technologischen Parameter und zur Erfassung und Protokollierung aller relevanten Anlagen- und Fertigungsdaten, darüber hinaus die Überwachung und die Störfall-Protokollierung aller notwendigen Anlagen- und Fertigungsdaten, vorangebracht. Dies umfasste die Strukturierung der serverbasierten Datenbank, die Organisation der Datenverwaltung für alle wesentlichen Strukturen der Gesamtanlage, sowie die dauerhafte Speicherung erfasster Daten (Fertigungshistorie). Offen sind noch Langzeitstabilitäts- und –belastungstests, darüber hinaus Handhabeprogramme, um Datenauszüge zu generieren. Lösungen zur Datenverdichtung, Datensicherung und Archivierung (dauerhafte Sicherung und Auffindbarkeit qualitätsrelevanter Daten) wurden konzipiert. Die Umsetzung in marktfähige, robuste Lösungen muss aber noch erfolgen.

8.4 Fazit

Mit dem rechnergestützten Versuchsstand wurden alle wesentlichen konstruktiven Elemente einer neuartigen automatischen Messmaschine in ihrer Auslegung grundsätzlich vorbereitet.

Die Fa. Schindler entwickelte das komplette Automatenkonzept, konstruierte und fertigte den Grundaufbau, das Handling, die Bearbeitungseinheiten und das Sicherheitskonzept.

WVN überarbeitete die Konstruktion der Messmaschine umfangreich und fertigte die automatisierbare Anlage mit Friktionsantrieb.

ICOM entwickelte die gesamte Anlagensteuerung auf Basis einer SPS Simatic7 und Servoantrieben für die Bewegungsvorgänge. Darüber hinaus wurde die Leitrechnersoftware überarbeitet und erweitert.

Die TU Ilmenau untersuchte und optimierte die Bearbeitungsvorgänge (hier Materialabtrag) und stellte entsprechende Algorithmen für die Softwareentwicklung zur Verfügung.

Mit dem Versuchsstand steht noch keine industriell einsatzfähige Anlage, aber ein hervorragendes Werkzeug für die Weiterentwicklung des AWUSYS-Systems zu einem kommerziellen Produkt zur Verfügung. Insofern wurde die Zielstellung des FuE-Projektes vollständig erreicht und in Teilen übertroffen.

9. Entwicklung von Auf- und Abtragstrategien

Die Entwicklung von hochpräzisen Auswuchtstrategien ist für die steigenden Anforderungen im Rotoren- bzw. Turbinenbau von höchster Bedeutung. Aus wirtschaftlichen Gründen kommt hinzu, dass diese neben der hohen Genauigkeit eine hohe Taktzeit gewährleisten und entsprechende Freiheitsgrade in der Positionierbarkeit und –genauigkeit ermöglichen müssen.

Ziel des Teilprojektes war die Qualifikation geeigneter Masseauf- und abtragstrategien und die Untersuchung deren Prozesseigenschaften. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden mathematisch formuliert und gingen in die Softwareentwicklung zur Steuerung des rechnergestützten Versuchsstandes ein.

9.1 Definition und Aufgabe der Verfahren

Die Auswahl der Verfahren für den Masseauf- und Masseabtrag erfolgte anhand einer Bewertungsmatrix mit den im Folgenden aufgeführten Kriterien.

- Systembedienbarkeit und -komplexität
- Positionierbarkeit und –genauigkeit
- Automatisierungsgrad und Zykluszeit
- Absehbare Auf- und Abtragsgenauigkeit und –reproduzierbarkeit
- Wärmebeeinflussung des auszuwuchtenden Werkstoffes
- Investitionskosten
- Aufwand für Sicherheitstechnik

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien fiel die Auswahl der zu untersuchenden Abtragverfahren auf eine lokale Fräs- und Bohrbearbeitung. Maßgebliche Gründe hierfür waren die einfache Bedienbarkeit und die im Vergleich zum Laserabtragen geringeren Investitionskosten und Sicherheitsaspekte. Zudem stellt das Fräsen und Bohren eine bereits in der Praxis etablierte Strategie zur Beseitigung der Unwucht dar. Im Rahmen von Vorversuchen hat sich gezeigt, dass sich das Bohren als Abtragverfahren ungeeignet erwies, da eine zuverlässige Zentrierung des Bohrkopfes an einer abgerundeten Rotoroberfläche nur begrenzt möglich war. Die im Folgenden dargestellten Untersuchungen beziehen sich demzufolge auf Abtragversuche mittels Schafffräser.

Beim Masseauftrag wurden insbesondere Verfahren einer genaueren Betrachtung unterzogen, die geringe Masseaufträge im 1/10 g Bereich bei gleichzeitig geringem Energieeintrag ermöglichen. Basierend auf Erkenntnissen aus der Literatur fiel die Wahl auf das Mikro-Plasma-Auftraglöten und das Metall-Schutzgas-Auftraglöten mittels geregelter Kurzlichtbogentechnik. Laserbasierte Auftragverfahren wurden aufgrund der hohen Investitionskosten und Sicherheitstechnik nicht in Betracht gezogen.

Ziel der Untersuchungen zu den ausgewählten Auftrag- bzw. Abtragverfahren war schließlich die Entwicklung einer Prozessstrategie, die ein hochpräzises Beseitigen von Unwuchten ermöglicht. Abweichungen im Bereich 1/100 g zum vorgesehenen Masseabtrag bzw. -auftrag wurden als Zielsetzung definiert.

9.2 Prozessentwicklungen zum Masseabtrag

Grundlegende Untersuchungen zum Masseabtrag durch Fräsen erfolgten an metallischen und kunststoffbasierten Rotoren. Eine spätere breitgefächerte Anwendung der erarbeiteten Erkenntnisse wird hierdurch ermöglicht.

9.2.1 Versuchsvorbereitung und -durchführung

Zur Durchführung der Abtragversuche wurde eine Ultrapräzisions-fräsmaschine REALMECA RV-2 5A eingesetzt. Ein integrierter Messtaster ermöglicht dabei die Messung des Werkzeugdurchmessers und der Werkzeuglänge im Bereich von 0,1µm. Die Ermittlung exakter Daten zur Berechnung der Bohrungstiefe wurde hierdurch ermöglicht.

Materialabtrag an metallischen Rotoren

Die Untersuchungen zum Materialabtrag an metallischen Werkstoffen erfolgten an Rotoren aus unlegiertem Baustahl (S355) und Messing. Mit dem vorgegebenen Fräswerkzeug erfolgte der Abtrag in mehreren 1mm-Bohrzyklen bis zur vorgegebenen Abtragtiefe, was eine Schonung des Werkzeuges mit sich brachte. Insbesondere bei der Verwendung von Fräswerkzeugen, die aufgrund ihrer Stirnschneiden nur für geringe Eintauchtiefen ausgelegt sind, ist das zyklische Abtragen von Vorteil. Zudem konnte durch Voruntersuchungen keinerlei Einfluss der Zyklenanzahl auf den Masseabtrag nachgewiesen werden.

Es erfolgten Untersuchungen zum Abtragverhalten in Abhängigkeit

- des Rotordurchmessers (20mm und 34mm),
- des Fräserdurchmessers (4,12mm und 6,21mm)
- des Bearbeitungswinkels ($90^\circ - 30^\circ$)

Zu erzielende Abtragmassen von bis zu ca. 1 g wurden einer genaueren Betrachtung unterzogen und die Versuche je dreimal wiederholt. Die Spanungsparameter wurden wie folgt konstant festgelegt:

- Werkzeuge aus Vollhartmetall
- Drehzahl $n = 10.000$ U/min
- Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 20$ mm/min
- Minimalmengenkühlschmierung

Entsprechend Abbildung 28 erfolgte die Aufspannung der Probekörper über die plananliegenden Seiten der Rundkörper.



Abbildung 28: Probenhandhabung zur Durchführung der Abtragversuche

Im Rahmen der Vorversuche wurde zur Berechnung der notwendigen Bohrungstiefe (in Abhängigkeit des Masseabtrages) die Oberflächenrundung der Rotoren zunächst vernachlässigt. Entsprechend Abbildung 29a wurde demzufolge vorerst die notwendige Bohrungstiefe t_1 betrachtet. Diese Herangehensweise führte jedoch zu nicht zu vernachlässigenden Abweichungen von ca. 10% zwischen dem berechneten und tatsächlich erzielten Masseabtrag.

Eine exaktere Übereinstimmung zwischen theoretischen und experimentellen Werten erfolgte schließlich durch Berücksichtigung der Rundung der Rotoren entsprechend Abbildung 29b. Der Ausgleich des fehlenden Volumens im Bereich der Oberflächenrundung erfolgte durch das Zufügen einer zusätzlichen Bohrungstiefe t_2 . Somit ergab sich eine für den berechneten Masseabtrag notwendige theoretische Gesamtbohrungstiefe $z=t_1+t_2$.

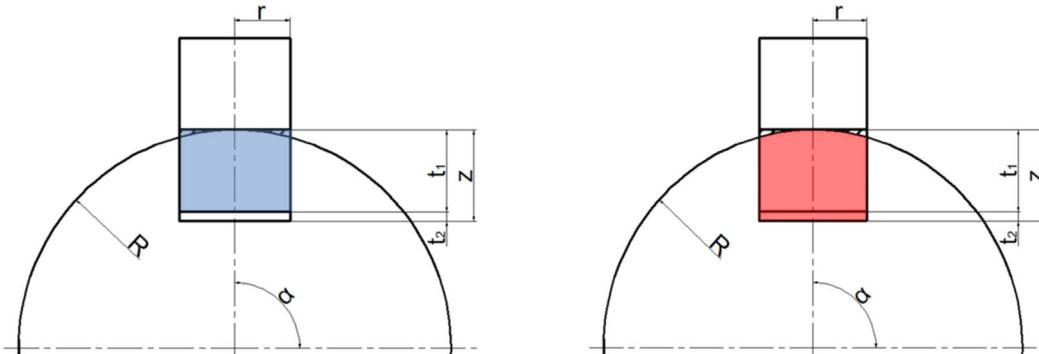


Abbildung 29: Schematische Vorgehensweise zur Berechnung der Bohrungstiefe a) ohne Berücksichtigung der Oberflächenrundung; b) mit Berücksichtigung der Oberflächenrundung

Wie bereits zuvor erwähnt ist die Durchführung einer Unwuchtkorrektur nur an den dafür vorgesehenen Positionen möglich. Liegt eine Kombination aus radialer und axialer Unwucht vor, kann in Sonderfällen ein Masseabtrag in einem bestimmten Bearbeitungswinkel erforderlich werden. Demzufolge wurde die oben beschriebene Berechnungsmethodik zur Ermittlung der theoretischen Bohrungstiefe auch auf unterschiedliche Bearbeitungswinkel übertragen und in drei Fallstudien kategorisiert, siehe Abbildung 30.

Im ersten Fall wird die Bohrung senkrecht (Bearbeitungswinkel $\alpha=90^\circ$) zur Schneidebene durchgeführt. Im zweiten und dritten Fall werden die Winkel variiert, wobei jedoch eine Unterscheidung der Berechnung getroffen werden muss. Diese ist abhängig vom Abstand der Bohrung zum Werkstückmittelpunkt.

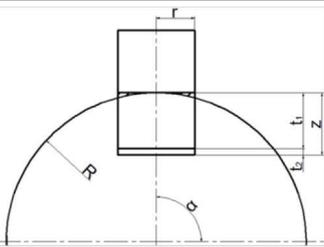
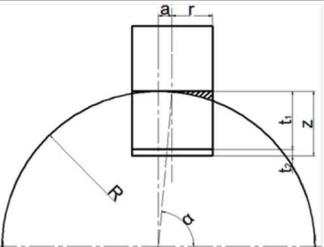
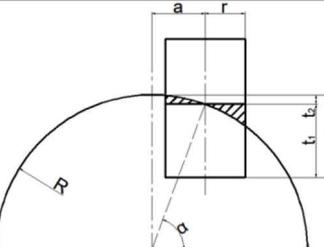
Senkrechter Abtrag	Winkelabtrag	
$\alpha = 90^\circ$	$\arccos \frac{r}{R} < \alpha < 90^\circ$	$\arccos \frac{R-r}{R} < \alpha < \arccos \frac{r}{R}$
		
$t_1 = m/\rho\pi r^2$ $t_2 = V/\pi r^2$ $z = t_1 + t_2$	$t_1 = m/\rho\pi r^2$ $t_2 = V/\pi r^2$ $z = t_1 + t_2$	$t_1 = m/\rho\pi r^2$ $t_2 = R(1 - \sin\alpha)$ $z = t_1 + t_2$
<i>m</i> : theo. Abtragsmasse; <i>t</i> ₁ : Tiefe mit fehlender Masse; <i>t</i> ₂ : ergänzende Tiefe; <i>z</i> : reale Abtragtiefe; <i>V</i> : fehlendes Volumen		

Abbildung 30: Berechnungsmethodik zur Ermittlung der theoretischen Bohrungstiefe in Abhängigkeit des Abtragwinkels, kategorisiert in drei unterschiedliche Fallstudien.

Materialabtrag an kunststoffbasierten Rotoren

Versuche zum Materialabtrag an polymeren Werkstoffen erfolgten an Rotoren, die für die Qualifikation des rechnergestützten Versuchsstandes ausgewählt wurden. Untersucht wurde das Abtragverhalten am Werkstoff Polypropylen (Axialbohrung) und an Polyamid (Radialbohrungen).

Die an der Polypropylen-Komponente vorgegebene Abtragtiefe von 1,5mm (bei Fräserdurchmessern von 7mm und 9mm), siehe Abbildung 31, führte aufgrund der geringen Materialdichte ($\rho = 0,895-0,92 \text{ g/cm}^3$) nur zu minimalen Abtragsmassen. Eine vollständige Unwuchtkorrektur durch einen punktuellen Abtrag kann also nicht gewährleistet werden. Dahingehend lag der Fokus der Untersuchungen auf einem flächigen Materialabtrag in Form von Umfangsnuten mit definierter Winkellänge. Der Abstand zwischen Rotorachse und Unterkante der Abtragnut betrug dabei durchweg 38,5mm.

Diese Strategie (punktueller Bohrung und Umfangsbohrung) wurde auch bei den Radialbohrungen (Polyamid) verfolgt, siehe Abbildung 32, wobei der Steg mit einem 5 mm Fräserdurchmesser vollständig durchgebohrt wurde. Aufgrund der geringen Dichte des Polyamid ($\rho = 1,12 - 1,15 \text{ g/cm}^3$) wurde den Wanddickenunterschieden in Umfangsrichtung keine besondere Bedeutung beigemessen. Zum einen erfolgten Durchgangsbohrungen an unterschiedlichen Umfangspositionen des Polyamidrings. Zum anderen wurden Durchgangsnuten unterschiedlicher Länge, ausgehend von der Wanddickenreduzierung (0°), realisiert.

Aus statistischen Gründen wurden die Versuchsreihen dreimal wiederholt. Aufgrund der herstellungsbedingten Dichteunterschiede der Kunststoffe verzichtete man auf eine theoretische Vorausberechnung des Masseabtrags.

Die mathematische Beschreibung des Masseabtrags erfolgte ausschließlich auf real ermittelten Werten.

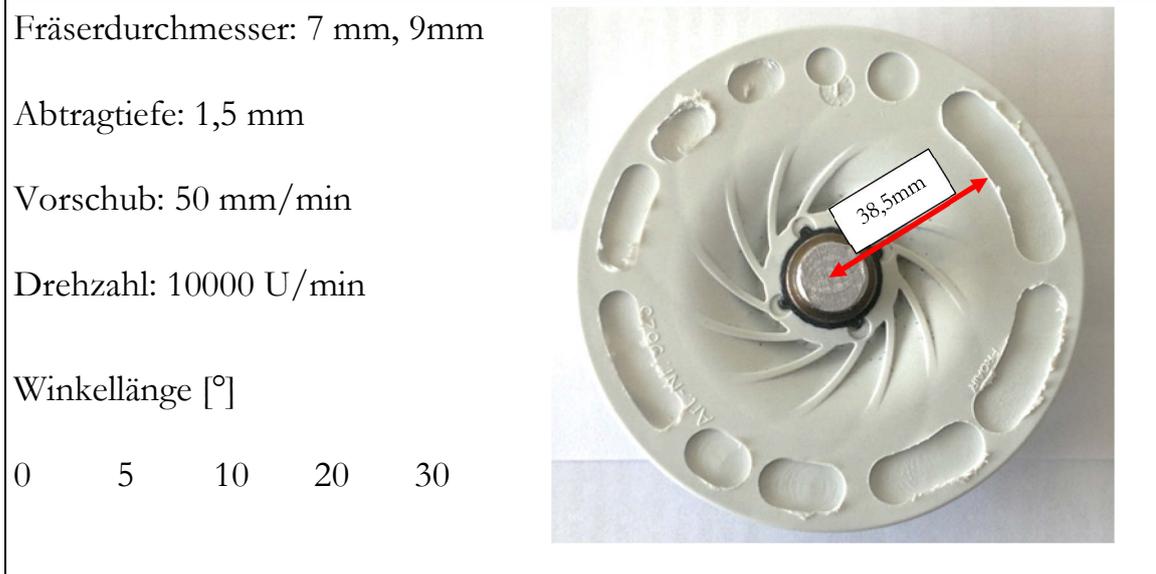


Abbildung 31: Abtragsversuche an Polypropylen (axialer Materialabtrag)

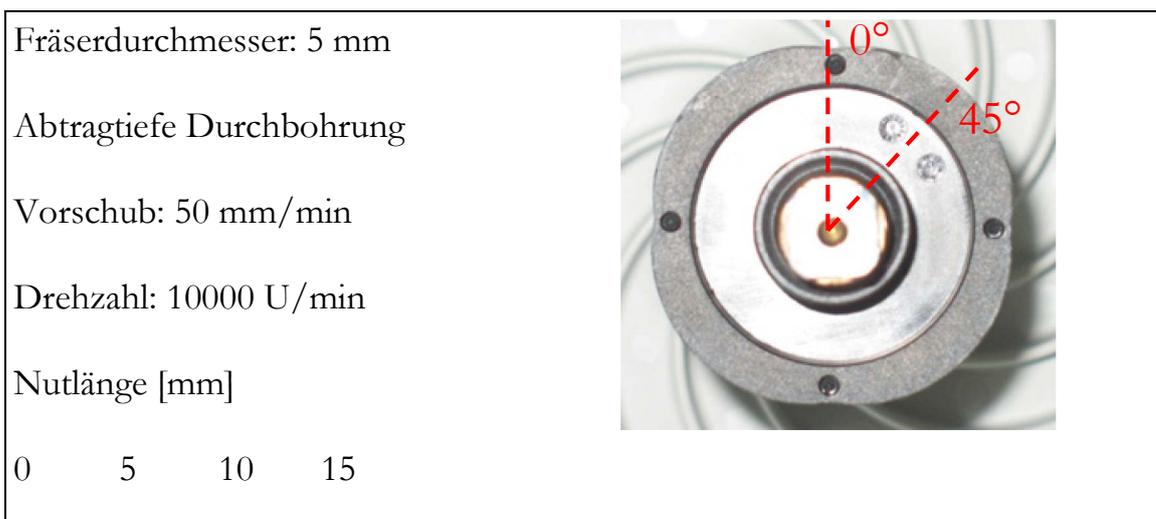


Abbildung 32: Abtragsversuche an Polyamid 6 (radialer Materialabtrag)

9.2.2 Ergebnisse

9.2.2.1 Auswuchtversuche an metallischen Rotoren

Umwuchtkorrektur mittels senkrechtem Materialabtrag (Bearbeitungswinkel $\alpha = 90^\circ$)

Die Untersuchungen zum senkrechten Materialabtrag wurden entsprechend Kapitel 9.2.1 durchgeführt.

Im Allgemeinen ist bei den Abtragversuchen am Werkstoff S355 eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem real erzielten und dem theoretischen Masseabtrag erkennbar. Dabei ist der theoretisch ermittelte Wert durchweg leicht höher, wobei sich die vorherrschenden Abweichungen im Bereich der zweiten Dezimalstelle bewegen, siehe Abbildung 33 - Abbildung 36. Während der Rotordurchmesser keinen Einfluss auf das Abtragergebnis erkennen lässt, führt ein zunehmender Fräserdurchmesser zu einer Fehlerminimierung zwischen dem theoretischen und realen Masseabtrag. Hierbei liegt die maximale Differenz zwischen theoretischem und realem Masseabtrag (bei einem Fräserdurchmesser von 6,1276mm) bei ca. 0,01g.

Bei der Bearbeitung des Messingwerkstoffs wurden vergleichbare Ergebnisse festgestellt, siehe Abbildung 37 - Abbildung 38. Im Vergleich zum Stahl liegen die festgestellten Abweichungen allerdings höher. In diesem Zusammenhang wichen die real erzielten Werte im Schnitt ca. 12% vom gewünschten Ergebnis ab ($m_{\text{soll}} = 0,4\text{g}$). Wie zuvor konnte durch die Verwendung eines größeren Werkzeugdurchmessers eine Reduzierung des Fehlers beobachtet werden. Ein signifikanter Einfluss des Rotordurchmessers wurde nicht festgestellt.

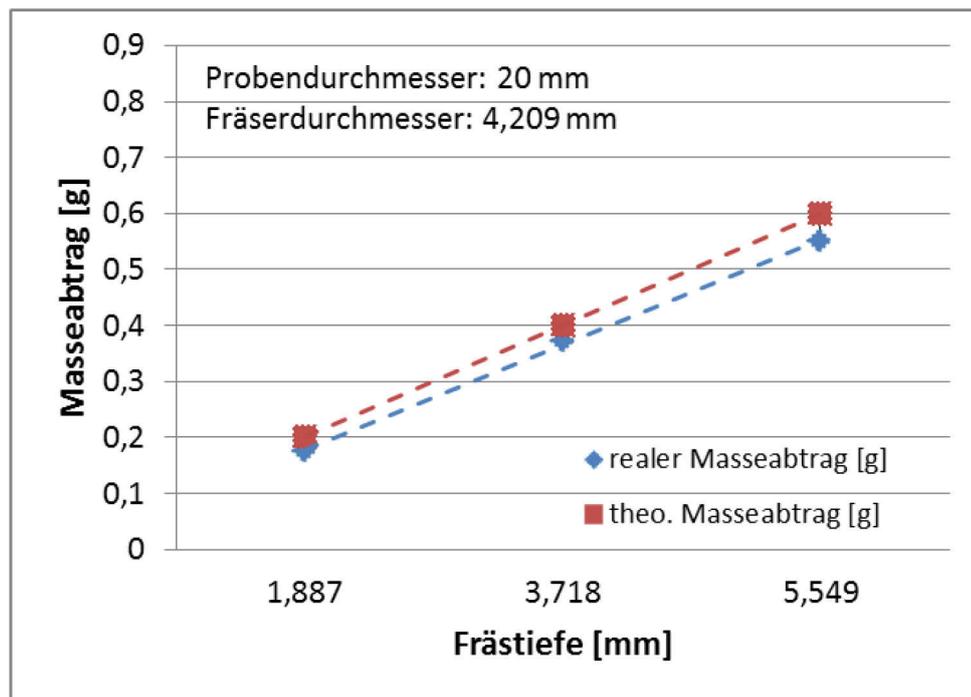


Abbildung 33: Theoretischer und realer Masseabtrag in Abhängigkeit der Frästiefe – Werkstoff des Rotors S355

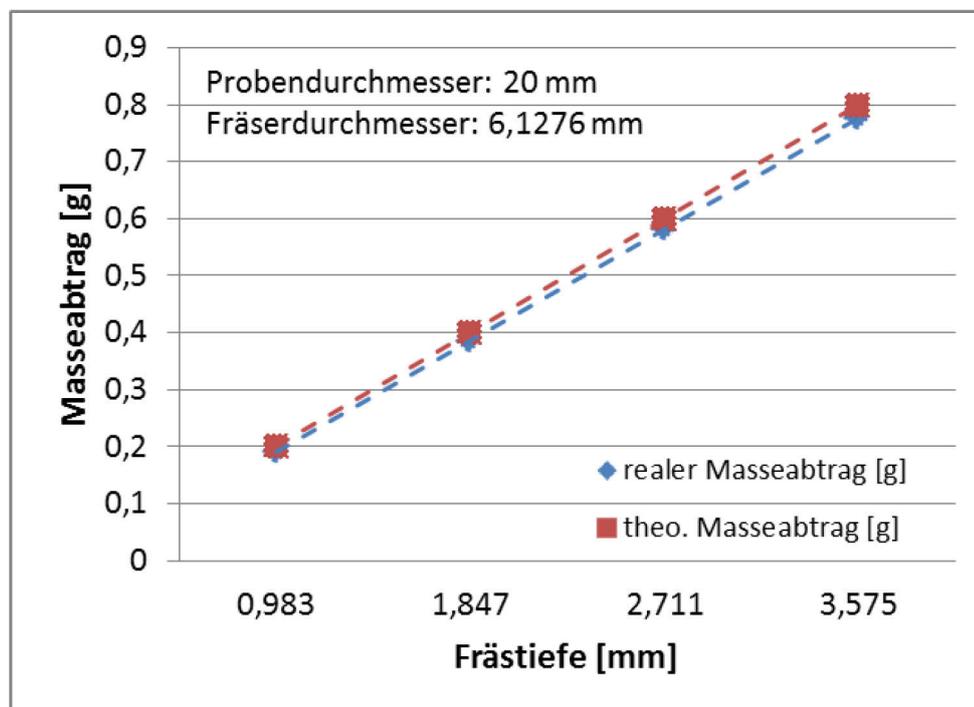


Abbildung 34: Theoretischer und realer Masseabtrag in Abhängigkeit der Frästiefe – Werkstoff des Rotors S355

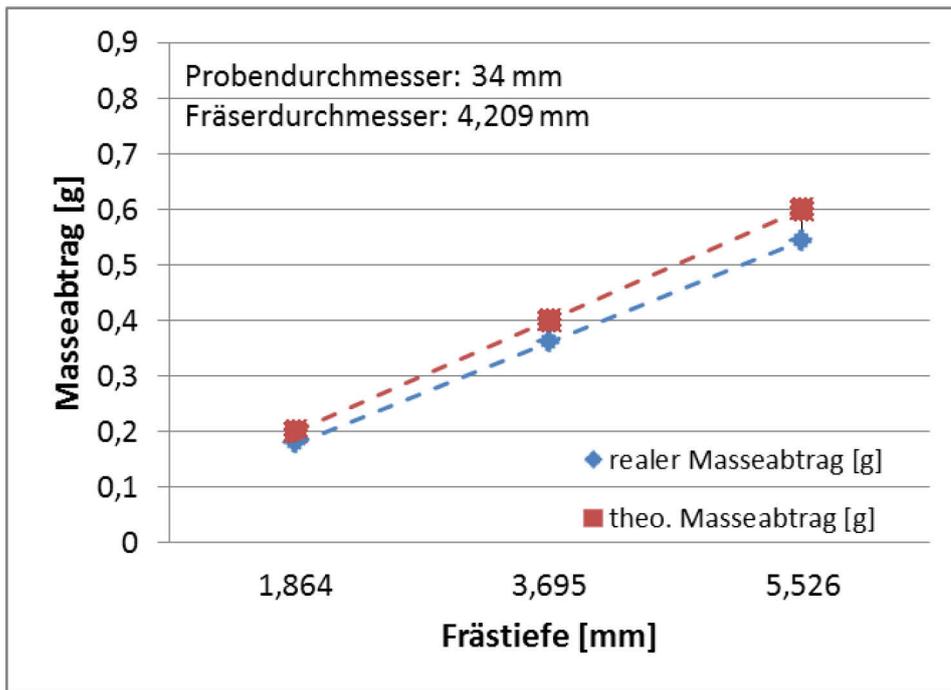


Abbildung 35: Theoretischer und realer Masseabtrag in Abhängigkeit der Frästiefe – Werkstoff des Rotors S355

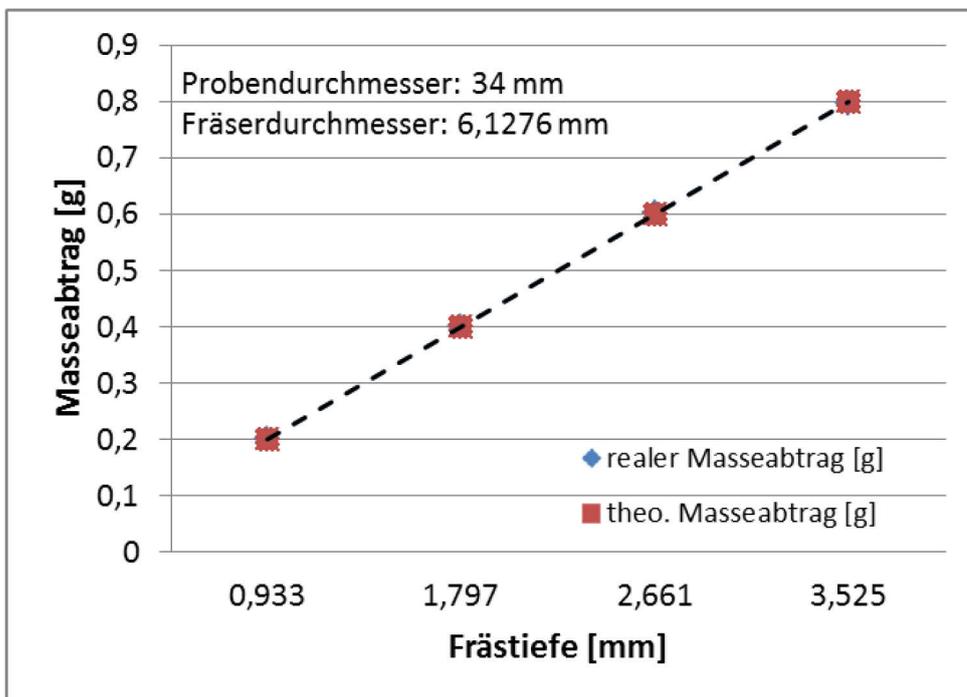


Abbildung 36: Theoretischer und realer Masseabtrag in Abhängigkeit der Frästiefe – Werkstoff des Rotors S355

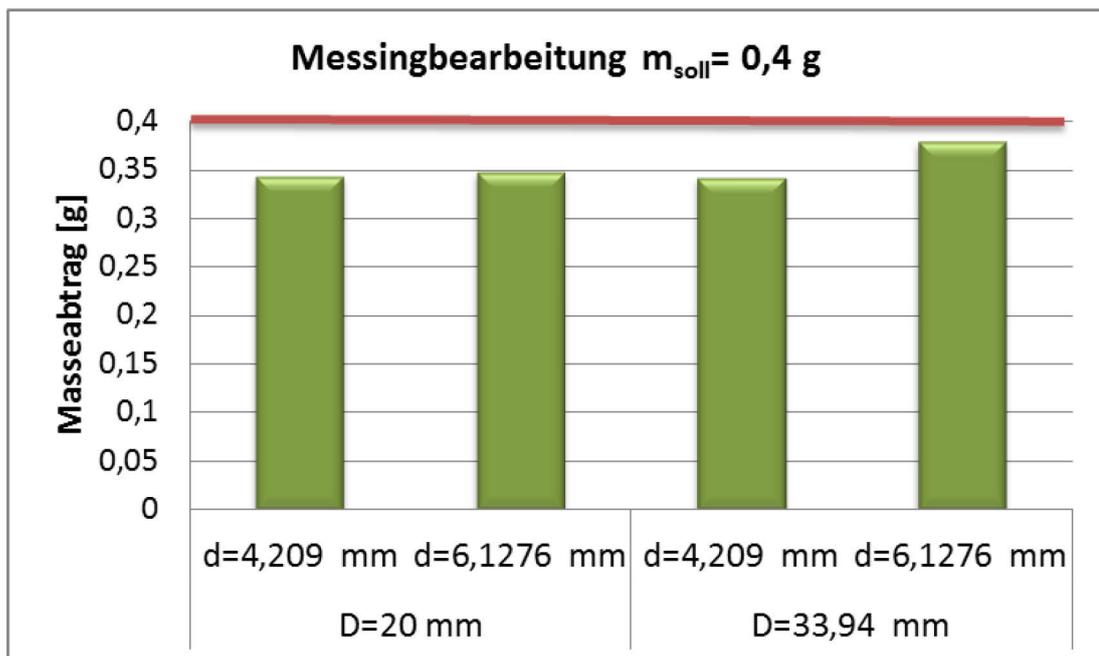


Abbildung 37: Vergleich zwischen theoretischem und realem Masseabtrag für $m_{\text{soll}} = 0,4 \text{ g}$ in Abhängigkeit des Werkzeug- und Werkstückdurchmessers für den Werkstoff Messing

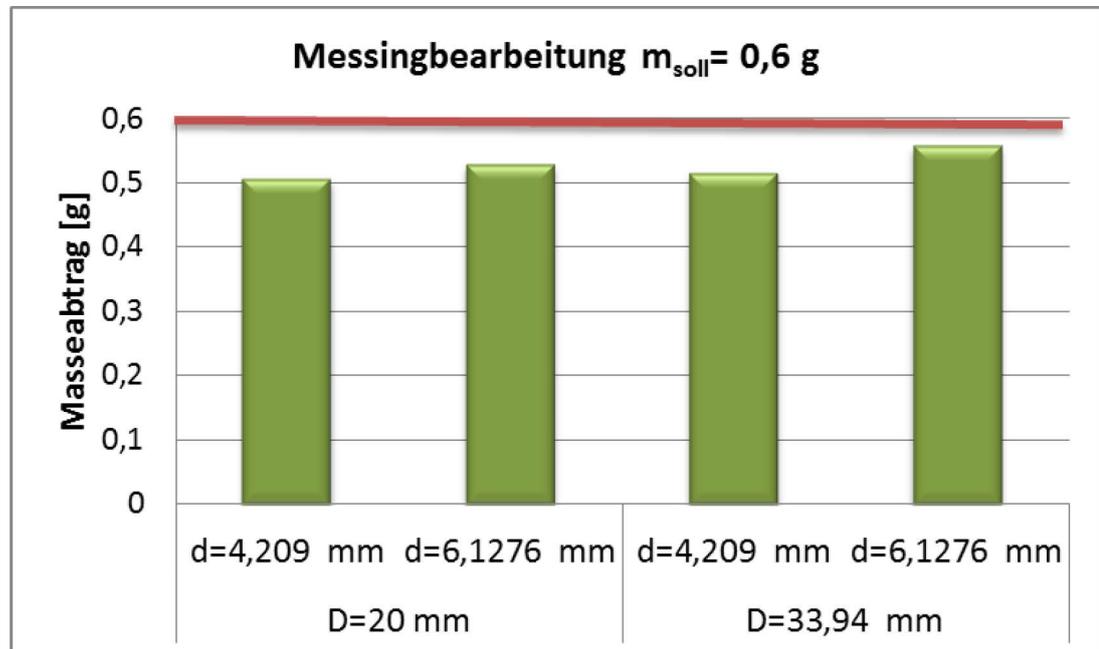


Abbildung 38: Vergleich zwischen theoretischem und realem Masseabtrag für $m_{\text{soll}} = 0,6 \text{ g}$ in Abhängigkeit des Werkzeug- und Werkstückdurchmessers für den Werkstoff Messing

Auswuchten mittels Winkelbohrungen

Analog zu den Versuchen bei einem Bearbeitungswinkel von 90° erfolgten Versuche in Abhängigkeit des Abtragwinkels. Die Höhe des Abtragwinkels wurde dabei durch den Durchmesser des Probekörpers und des Fräasers, sowie der Abtragtiefe begrenzt. So konnte beispielsweise bei einem Fräserdurchmesser von $d=6,127\text{mm}$ und einem Probekörperdurchmesser $D=20\text{mm}$ eine vollständige Bohrung nur bis zu einem Bearbeitungswinkel von $\alpha=75^\circ$ realisiert werden.

Für beide Werkstoffe (S355 und Messing) wurde die Genauigkeit des Masseabtrags bei theoretischen Werten von $0,4\text{g}$ und $0,6\text{g}$ einer genauen Betrachtung unterzogen. Wie bereits zuvor fällt die hohe Übereinstimmung zwischen theoretischem und experimentell erzielttem Wert auf, siehe Abbildung 39 bis Abbildung 42.

Unabhängig vom Werkstoff liegt der Fehler im Bereich der zweiten Dezimalstelle, wobei eine tendenzielle Fehlerzunahme mit sinkendem Bearbeitungswinkel zu erkennen ist. Insbesondere bei einem vorgegebenen Masseabtrag $m_{\text{soll}}=0,4\text{g}$ wird ersichtlich, dass ein kleiner Werkstück- und Fräserdurchmesser bei Verringerung des Abtragwinkels zu einem erhöhten Fehler führt. Vergleichend hierzu ist die Schwankung bei einem großen Werkstück- und einem kleinen Werkzeugdurchmesser geringer. Dennoch ist eine sehr hohe Übereinstimmung der Werte im Bereich der zweiten Dezimalstelle ersichtlich.

Die Systematik der Abweichungen lässt in diesem Zusammenhang vermuten, dass durch die Einführung eines entsprechenden Korrekturfaktors eine weitere Reduzierung der Fehlerabweichung möglich ist. Dies wurde im Folgenden näher betrachtet.

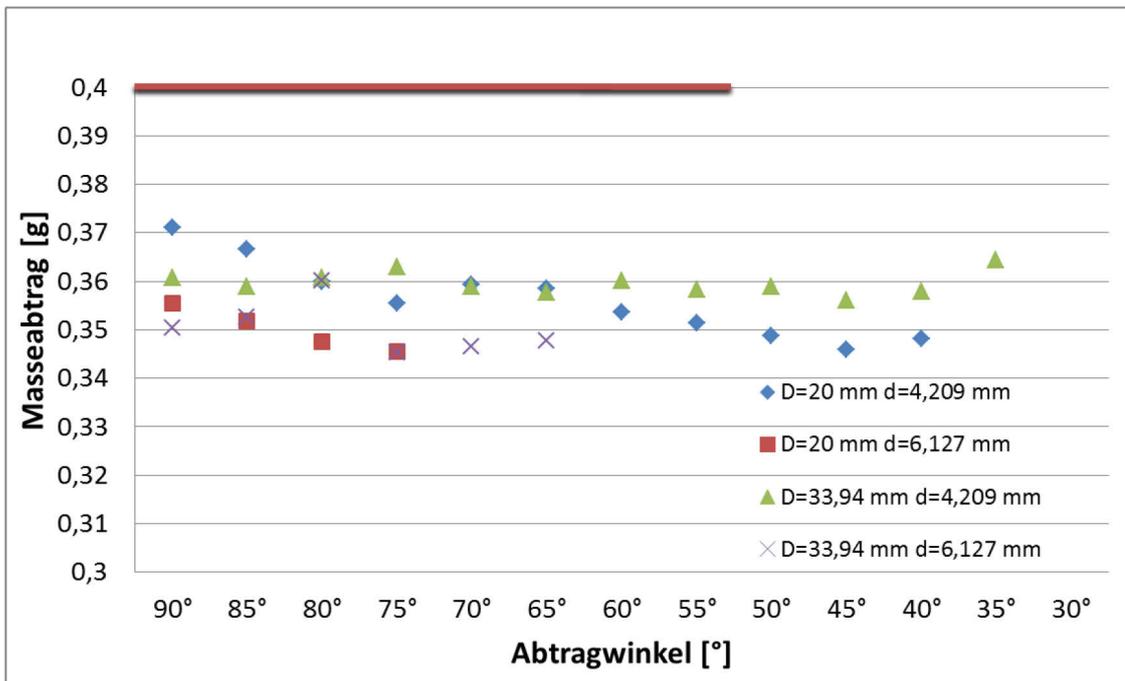


Abbildung 39: Theoretischer und realer Masseabtrag in Abhängigkeit des Abtragwinkels für $m_{\text{soll}} = 0,4 \text{ g}$ und Werkstoff S355

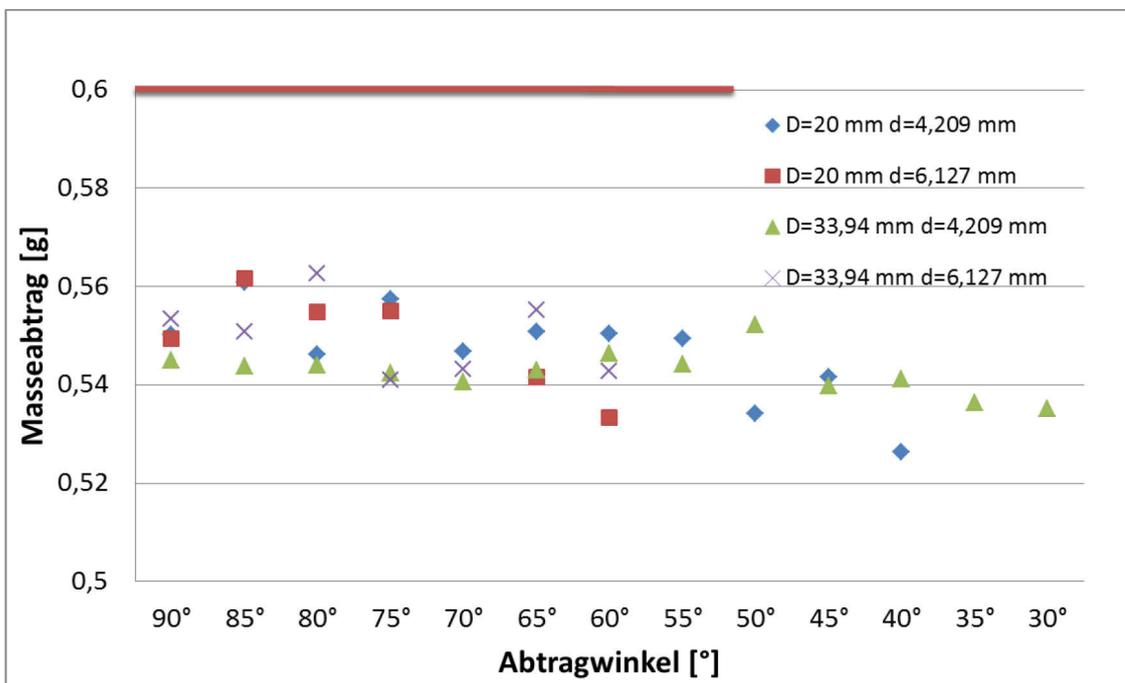


Abbildung 40: Theoretischer und realer Masseabtrag in Abhängigkeit des Abtragwinkels für $m_{\text{soll}} = 0,6 \text{ g}$ und Werkstoff S355

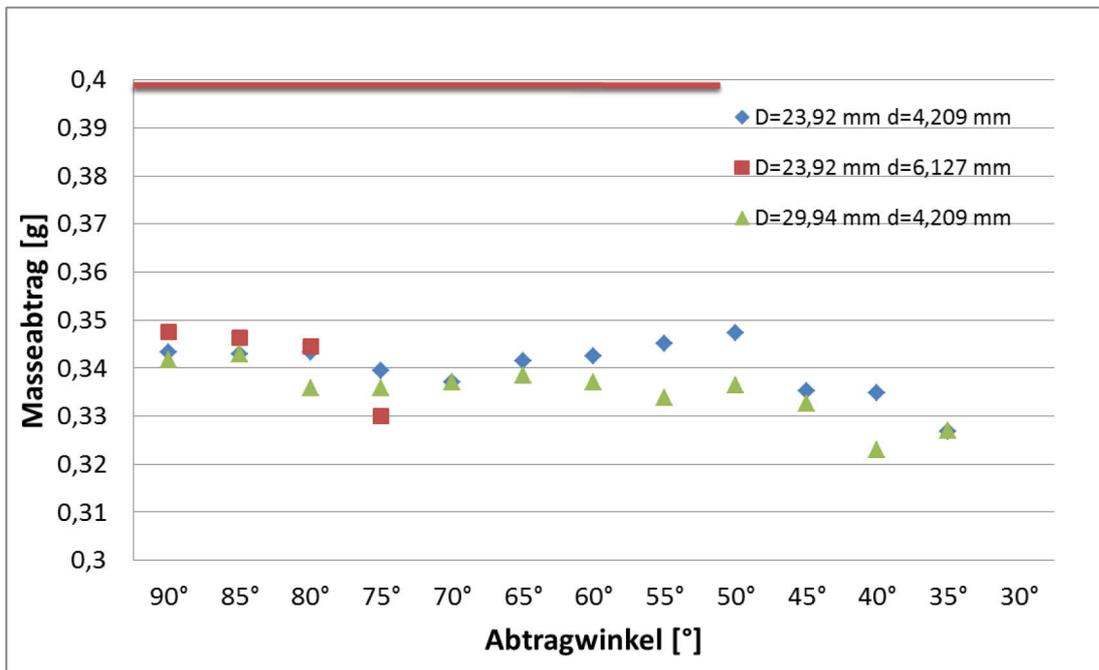


Abbildung 41: Theoretischer und realer Masseabtrag in Abhängigkeit des Abtragwinkels für $m_{\text{soll}} = 0,4\text{g}$ und Werkstoff Messing

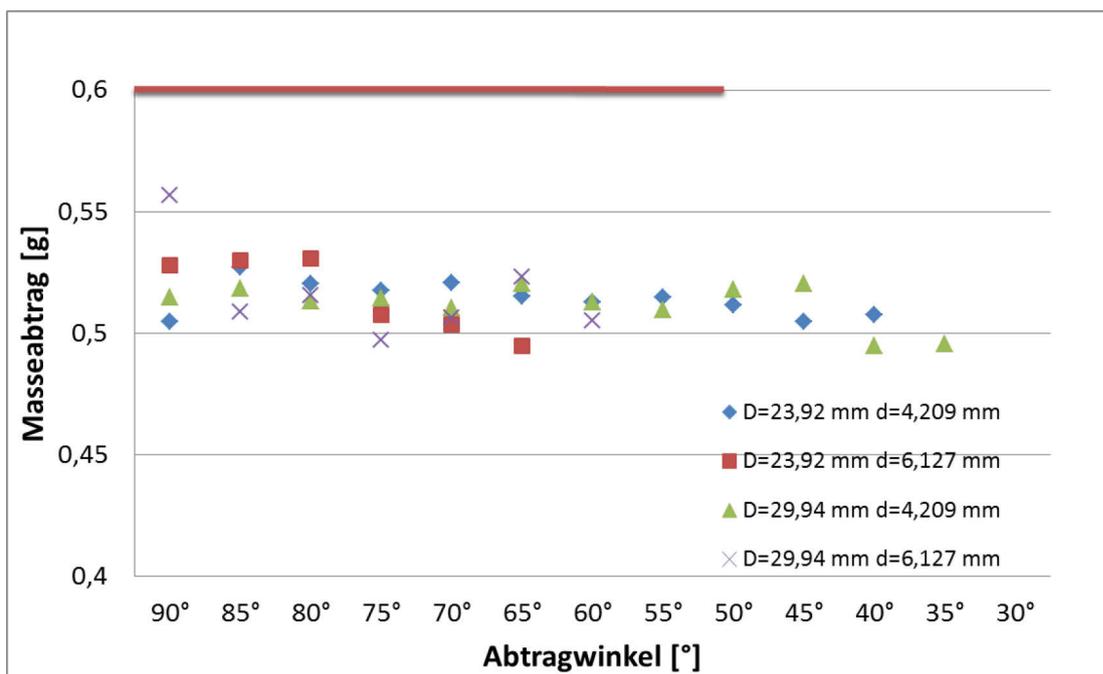


Abbildung 42: Theoretischer und realer Masseabtrag in Abhängigkeit des Abtragwinkels für $m_{\text{soll}} = 0,6\text{g}$ und Werkstoff Messing

Einführung eines Korrekturfaktors

Zur Darstellung eines allgemeingültigen Algorithmus sind die festgestellten Fehlerabweichungen bei der Unwuchtkorrektur auf einen Minimalwert zu begrenzen. Aufgrund deren Systematik erfolgte dies durch die Einführung eines Korrekturfaktors f .

Die Berechnung des Korrekturfaktors f erfolgte zunächst repräsentativ anhand der Ergebnisse für einen Fräserdurchmesser $d=4,209\text{mm}$. Berechnet wurde dieser aus dem Verhältnis von realem zu theoretischem Masseabtrag, wodurch schließlich eine korrigierte Abtragtiefe ermittelt werden kann.

$$\frac{\text{realer Masseabtrag}}{\text{theoretischer Masseabtrag}} = f$$

Für die Bearbeitung des S355 ergab sich ein Korrekturfaktor von $f=0,889$. Wie repräsentativ in Abbildung 43 dargestellt, konnte durch die Einführung des Korrekturfaktors eine geringere prozentuale Abweichung zum Sollwert erzielt werden. Eine positive Fehlerabweichung steht hierbei für eine geringere reale Masse, eine negative Fehlerabweichung für eine höhere reale Masse. Die Fehlerabweichung fällt bei geringen Abtragmassen ($m=0,2\text{g}$) erwartungsgemäß höher aus, beträgt jedoch maximal nur ca. 1%, siehe Abbildung 44.

Im Allgemeinen ermöglicht die Einführung des Korrekturfaktors eine beträchtliche Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit. Hierdurch wurde ermöglicht, bei der spanenden Bearbeitung von S355 eine Masse mit einer Genauigkeit von $\pm 0,005\text{ g}$ abzutragen.

Für die Bearbeitung von Messing wurde ein Korrekturfaktor von $f=0,825$ ermittelt, was einer Vorhersage der abzutragenden Masse mit einer Genauigkeit von $\pm 0,009\text{g}$ gleichkommt.

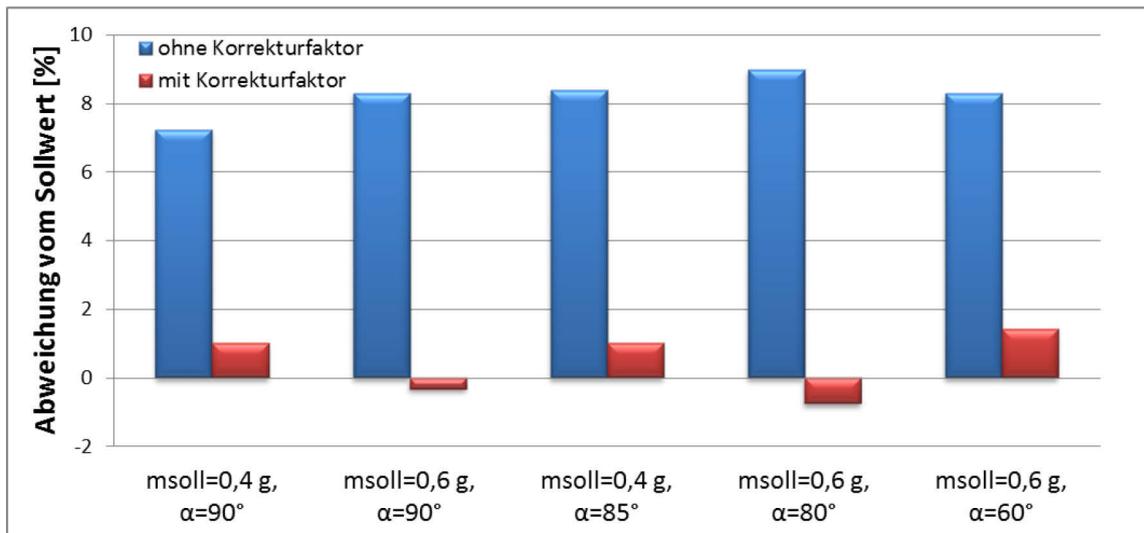


Abbildung 43: Prozentuale Abweichung der Abtragsmasse mit und ohne Korrekturfaktor (Fräserdurchmesser $d=4,209\text{mm}$; Probekörperdurchmesser $D=20\text{mm}$)

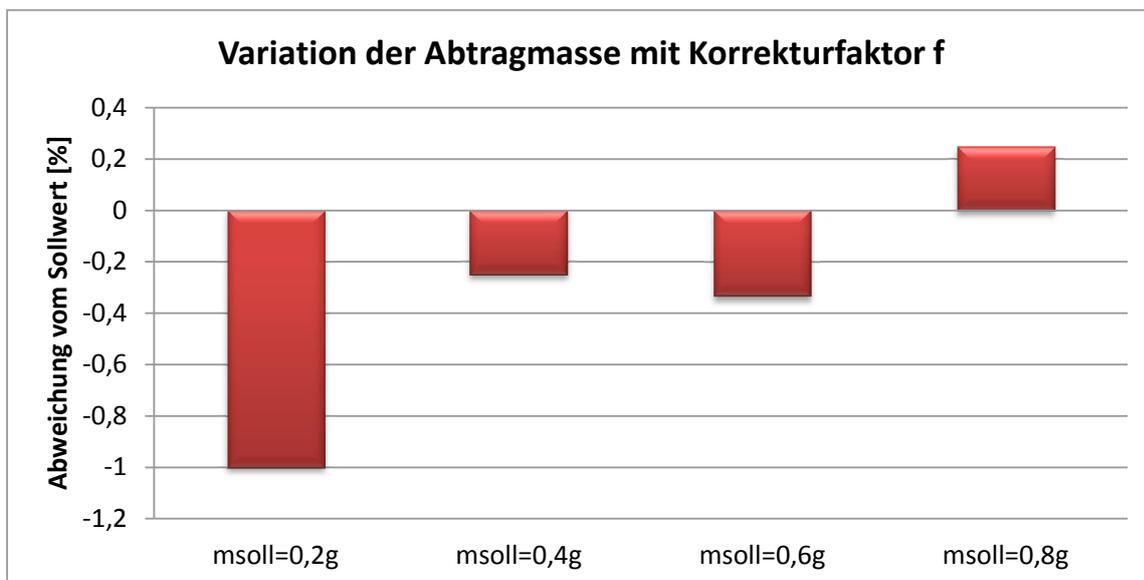


Abbildung 44: Überprüfung des Korrekturfaktors für unterschiedliche Abtragsmassen ($d=6,127\text{mm}$; $D=33,94\text{mm}$)

9.2.2.2 Auswuchtversuche an Bauteilen aus polymeren Werkstoffen

Materialabtrag an Polypropylen

Wie bereits in der Versuchsvorbereitung beschrieben erfolgten die Versuche mittels 7mm und 9mm Fräserdurchmesser, wobei die Abtragtiefe auf 1,5mm festgelegt wurde.

Bereits zu Beginn der Versuche war ersichtlich, dass die Wärmeentwicklung während des Abtragens stark die optischen Eigenschaften des Polypropylens beeinflusste. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Herstellung von Abtragnuten in Umfangsrichtung eine ausgeprägte Gratbildung zur Folge hatte, siehe Abbildung 45. Durch die Minimierung der Drehzahl bzw. des Vorschubs zur Reduzierung des Wärmeeintrags konnten keine verbesserten Oberflächeneigenschaften erzielt werden. Ausschließlich punktuelle Abtragversuche (0° , d.h. ohne Verfahren des Werkzeugs) - und eine damit einhergehende kurzzeitige Wärmeeinbringung ins Bauteil – ermöglichten gratlose Abtragprofile.

Ursächlich für die Gratbildung ist das ausgeprägte Fließverhalten des Polypropylens, welches mit zunehmendem Temperatureintrag verstärkt wird. Hierdurch ergeben sich nicht nur optische Nachteile. Der Grat kann das Auswuchtergebnis verfälschen, oder selber zu einer entsprechenden Unwucht führen. Dies ist beim Abtragen durch Fräsen bei Polypropylen zu berücksichtigen. Für die praktische Anwendung ist das Auswuchten durch Umfangsnuten (durch einen kontinuierlichen, linearen Verfahrensweg) also eher zu vermeiden. Vielmehr sollte ein überhöhter Masseabtrag durch die gezielte Aneinanderreihung einzelner, separater Abtragspunkte mit definiertem Fräserdurchmesser und definiertem Nutabstand erfolgen.

Der erzielbare Masseabtrag in Abhängigkeit der Nutlänge (bzw. Winkellänge der Nut) zeigt für beide Fräserdurchmesser eine lineare Abhängigkeit. In diesem Zusammenhang beträgt der maximal erzielbare Masseabtrag bei einer Nutlänge von 40° und einem Fräserdurchmesser von 7mm durchschnittlich ca. 0,5 g. Der Masseabtrag eines einzelnen Fräspunktes betrug je nach Fräserdurchmesser zwischen 0,08 g und 0,1 g, siehe Abbildung 46.

Die Schwankung der experimentell erzielten Werte wurde statistisch verifiziert. Bei geringen Abtragmassen von bis zu ca. 0,3 g liegt die Abweichung der erzielten Werte im 1/100 Bereich. Die Ergebnisse sind also sehr gut reproduzierbar.

Höhere Abtragmassen hatten hingegen höhere Standardabweichungen zur Folge. Als Ursache ist die ausgeprägtere Gratbildung zu nennen, die nur bedingt entfernt werden konnte. Hierbei ist zu betonen, dass vor der Ermittlung des Masseabtrags der Grat so gut wie möglich entfernt wurde.

Auch aus Sicht der Abtraggenauigkeit ist für spätere Anwendungen demzufolge die Realisierung einzelner Abtragpunkte zu empfehlen.

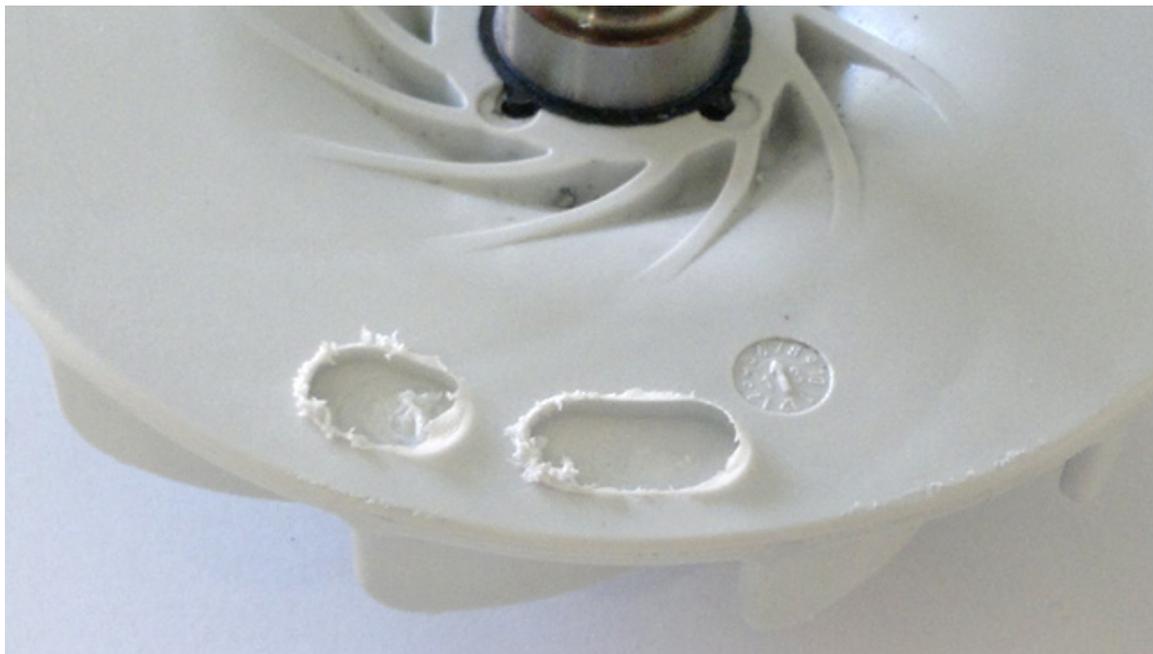


Abbildung 45: Axialer Materialabtrag an Polypropylen - ausgeprägte Gratbildung bei Umfangsnuten

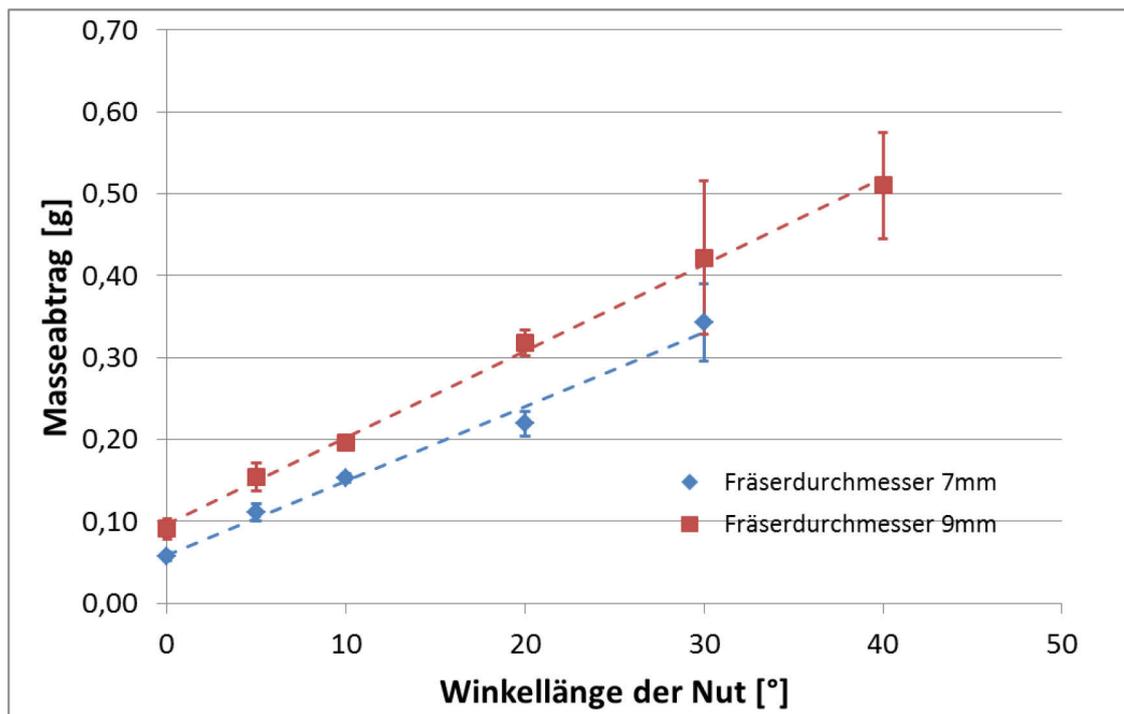


Abbildung 46: Axialer Materialabtrag am Werkstoff Polypropylen als Funktion der Winkellänge der Nut

Materialabtrag an Polyamid

Im Gegensatz zu den Untersuchungen an Polypropylen waren bei den radialen Auswuchtversuchen am Werkstoff Polyamid keinerlei Gratbildungen erkennbar. Sowohl bei den punktuellen Abtragversuchen als auch bei den Längsnuten wurden Abtragstrukturen mit einwandfreier Form und Oberflächenbeschaffenheit realisiert, siehe Abbildung 47. Der Unterschied zum vorherigen Ergebnis liegt im unterschiedlichen Werkstoffverhalten des Polyamid im Vergleich zum Polypropylen. Dieses basiert vorwiegend auf höheren Festigkeitseigenschaften einhergehend mit einem geringeren Fließ- und Dehnungsverhalten.



Abbildung 47: Erscheinungsbild des radialen Materialabtrags an Polyamid

Die Ergebnisse zum erzielten Masseabtrag in Abhängigkeit der Bohrungsposition sind in Abbildung 48 dargestellt. Auffällig ist, dass eine Durchgangsbohrung in den dickwandigeren Bereichen des Stegs ($\beta = 5^\circ - 45^\circ$) nicht zwangsläufig eine Erhöhung des Masseabtrags zur Folge hat. In diesem Zusammenhang liegen die maximal erzielten Abtragmassen insbesondere im Bereich der Vertiefungen ($\beta = 0^\circ$ - geringste Stegdicke) und betragen 0,2 g. Im Bereich der größten Stegdicke ($\beta = 45^\circ$) wurden hingegen Abtragmassen von durchschnittlich nur ca. 0,1 g ermittelt.

Messungenauigkeiten sowie Fehler der Anlagentechnik sind als Fehlerquelle eher auszuschließen. Die Ursache konnte im Rahmen des Projektes „Awusys“ nicht nachgewiesen werden.

Erwartungsgemäß nahm der Masseabtrag mit ansteigender Nutlänge sukzessive zu, wodurch ein maximaler Masseabtrag von durchschnittlich bis zu ca. 0,7 g (Nutlänge 12mm) erzielt werden konnte, siehe Abbildung 49.

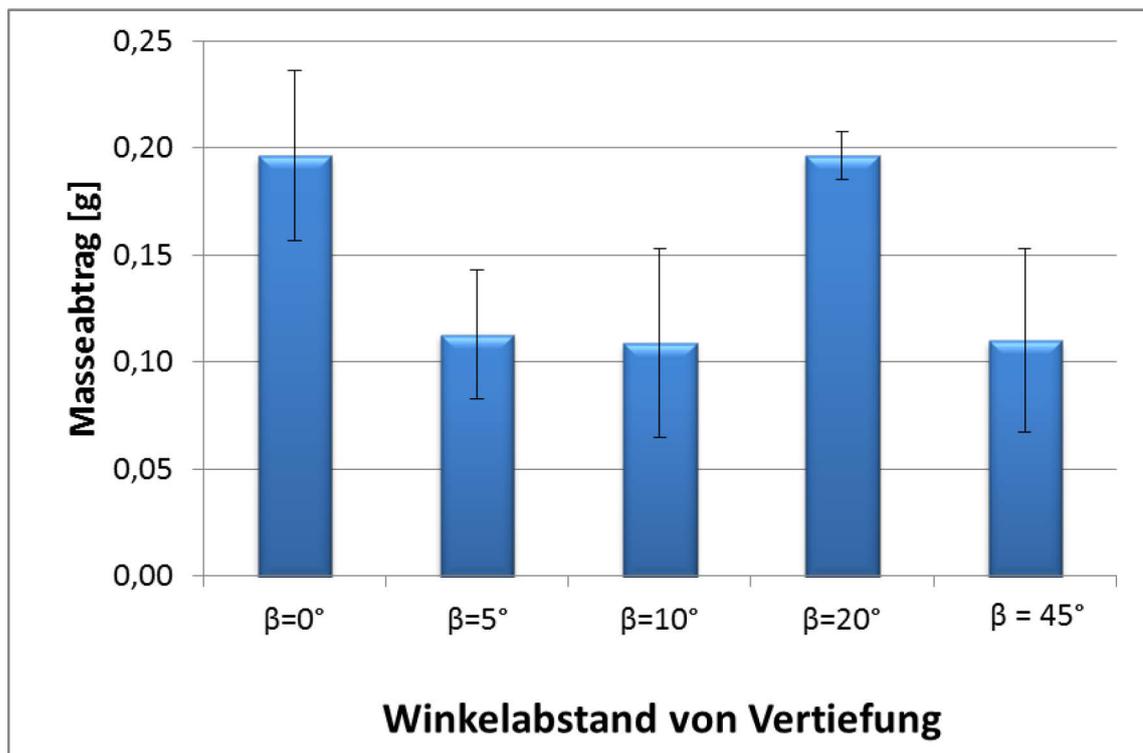


Abbildung 48: Erzielter Masseabtrag für Durchgangsbohrungen in Abhängigkeit der Bohrungsposition und somit Wanddicke in Umfangsrichtung

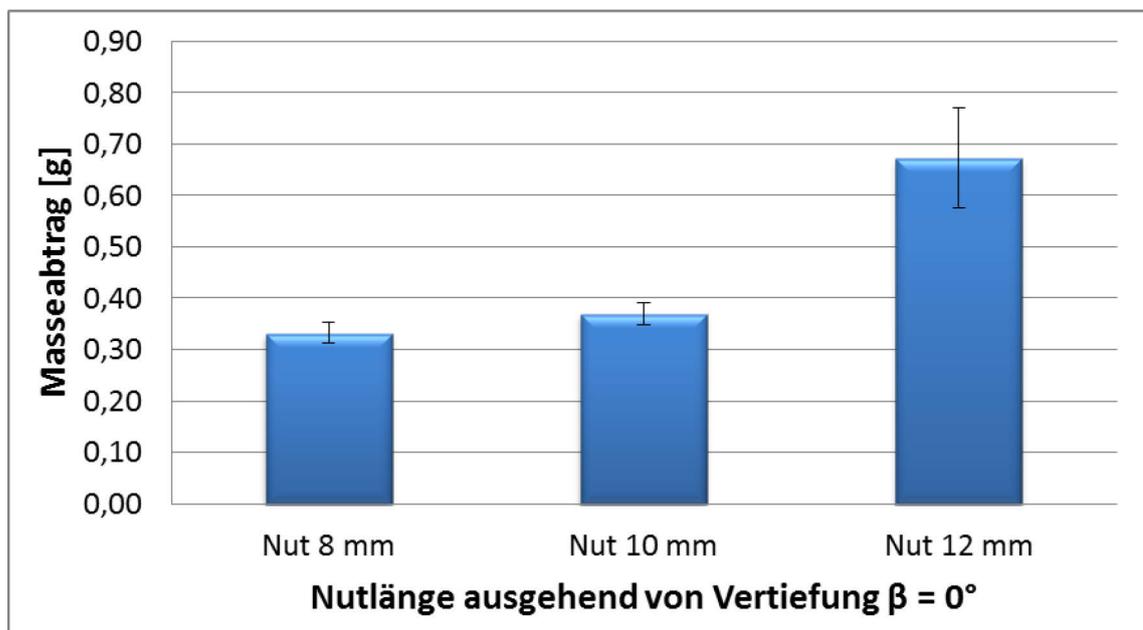


Abbildung 49: Erzielter Masseabtrag für Durchgangsbohrungen (Nuten) in Abhängigkeit der Nutlänge

9.3 Prozessentwicklungen zum Masseauftrag

Grundlegende Zielsetzung bei der Prozessentwicklung war eine minimale thermische Belastung des auszuwuchtenden Rotorwerkstoffs bei Masseauftragsgenauigkeiten im Bereich 1/100. Um ein Anschmelzen des Rotorwerkstoffes zu vermeiden, sollte die Anbindung des aufzutragenden Werkstoffes in Form einer Lötverbindung umgesetzt werden. Auftrag- und Grundwerkstoff waren demzufolge artfremd.

Im Folgenden wird auf die Untersuchungen zum Mikro-Plasma-Auftraglöten und zum geregelten MSG-Kurzlichtbogenlöten, hier Print-Technologie genannt, eingegangen. Die Erarbeitung des grundlegenden Prozessverständnisses und die Verdeutlichung der möglichen Potenziale erfolgten repräsentativ an Rotoren aus S355.

9.3.1 Versuchsvorbereitung und –durchführung

Mikro-Plasma-Auftraglöten

Das Mikro-Plasma-Verfahren ist eine erweiterte Variante des Wolfram-Inert-Gas-Schweißens, wobei der Lichtbogen zwischen einer nichtabschmelzenden Elektrode (Kathode) und dem Werkstück (Anode) brennt. Beim Plasma-Verfahren kommt hinzu, dass der Lichtbogen durch eine gekühlte Ringanode und das umgebende Schutzgas mechanisch eingeschnürt und fokussiert wird. Ein zusätzlich in die Düse eingeleitetes Plasmagas verstärkt die Ionisierung im Lichtbogen. In diesem Zusammenhang sind die maßgeblichen Parameter zur Steuerung des Energieeintrages die Schweißstromstärke und der Plasmagasstrom.

Als Vorteile gegenüber dem konventionellen WIG-Prozess sind die wesentlich höhere Energiedichte, der lokal begrenzte Energieeintrag sowie die gegebene Lichtbogenstabilität auch bei geringen Stromstärken (1 A) zu nennen. Der Zusatzwerkstoff – in diesem Fall Lotwerkstoff – wird extern über eine Drahtzuführung dem Schmelzbad zugeführt.

Die Untersuchungen zum Mikro-Plasma-Auftraglöten erfolgten mit einer „Microplasma 102 RC Plasma CW GR“ der EWM AG, wobei ein

Plasmabrenner „PWM 150“ eingesetzt wurde, siehe Abbildung 50 (links). Für alle Versuche betrug der Abstand zwischen Ringanode zum zu beschichtenden Grundwerkstoff 5mm.

Als Lotwerkstoff kam ein Cu-Basis-Lot (DIN 1733: SG-Cu Mn 12 Ni 2) mit einem Drahtdurchmesser von 1mm zum Einsatz. Um eine hohe Positioniergenauigkeit des Masseauftrages zu gewährleisten, wurde der Zusatzdraht direkt der Lichtbogenachse entsprechend Abbildung 50 (rechts) zugeführt.

Als Schutzgas diente Arcal 33 (70% Ar, 30% He) mit einer Gasdurchflussmenge von 5,7 l/min. Als Plasmagas wurde Ar4.6 verwendet. Um den Energieeintrag ins Bauteil so gering wie möglich zu halten wurde mit einer Plasmagasmenge von 0,6 l/min gearbeitet.

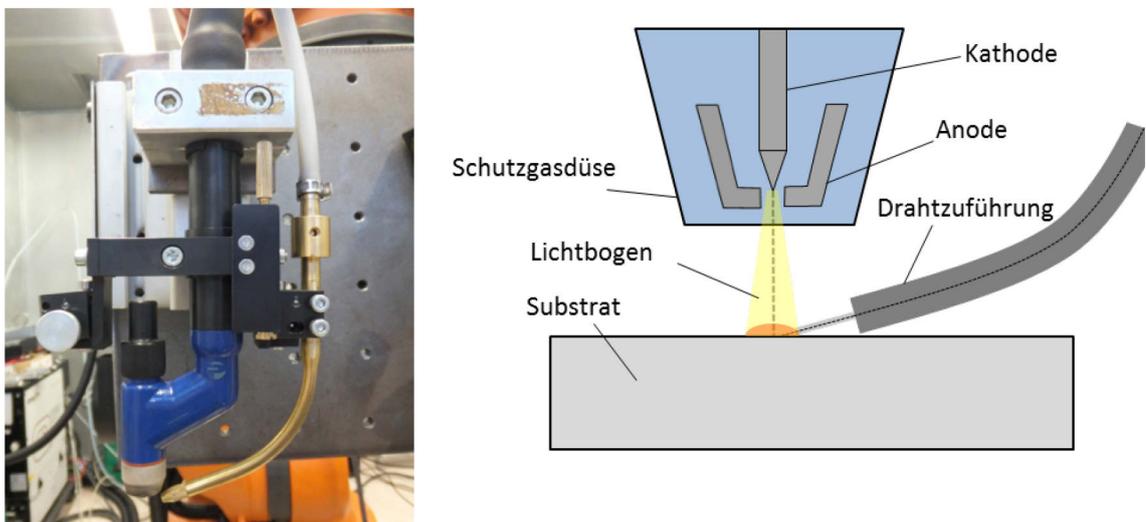


Abbildung 50: Darstellung des Brennersystems „PWT 150“ (links) und Strategie bei der Zuführung des Zusatzwerkstoffs (rechts)

Im Rahmen der Versuche wurden schließlich der Schweißstrom, die Drahtgeschwindigkeit und die Höhe des Masseauftrages wie folgt variiert und deren Einfluss auf die Auftragsgenauigkeit untersucht:

- Schweißstrom I : 40A, 50A, 60A
- Drahtgeschwindigkeit v : 0,4m/min, 0,6m/min, 0,8m/min
- Theo. Masseauftrag m : 0,1g, 0,2g, 0,3g, 0,4g

Die Herleitung der notwendigen Schweißzeit erfolgte zunächst theoretisch in Abhängigkeit des zu erzielenden Masseauftrags und der Drahtgeschwindigkeit.

$$t_s = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot d_D^2 \cdot \rho_D \cdot v}$$

- m: Berechneter Masseauftrag
- d_D : Drahtdurchmesser
- ρ_D : Dichte des Drahtes
- v: Drahtvorschubgeschwindigkeit
- t_s : Schweißzeit

Die notwendige Schweißzeit setzte sich jedoch nicht nur aus der reinen Schweißzeit, d.h. der Abschmelzphase des Lotes, zusammen. Zu berücksichtigen waren zudem die

- Drahtstartverzögerungszeit t_v (Verzögerung des Drahtvorschubs nach Schweißstart) und die
- Drahrückzugszeit t_z (zeitlich definierter Drahrückzug vor Schweißende).

Die Summe aus der reinen Schweißzeit t_s , der Drahtstartverzögerungszeit t_v und der Drahrückzugszeit t_z bildet schließlich die Gesamtschweißzeit t_g zur Realisierung des berechneten Masseauftrages:

$$t_g = t_s + t_z + t_v$$

Vor den Versuchen war der Einfluss der Drahrückzugszeit und der Drahtstartverzögerungszeit auf das Ergebnis des Masseauftrages noch unklar. In diesem Zusammenhang erfolgte eine Variation beider Größen innerhalb eines Intervalls zwischen 0,5s und 2s.

Alle Versuche erfolgten in Wannenlage. Aufgrund der relativ langsamen Schmelzbaderstarrung waren Versuche in Zwangslage nicht möglich ohne ein Verlaufen des Schmelzbades zu vermeiden.

Print-Technologie

Die Print-Technologie basiert auf der von Fronius entwickelten CMT (Cold-Metal-Transfer)-Technologie, ursprünglich für das energiereduzierte MSG-Schweißen von Dünoblechen entwickelt. Eine wesentliche Besonderheit des Verfahrens ist die Art der Drahtzuführung während des Schweißens, welche auf dem kontrollierten Drahrückzug unmittelbar nach der Eintauchphase ins Schmelzbad basiert. Hierbei ist ein Print gleichbedeutend mit einem Eintauchzyklus, entsprechend Abbildung 51. Dieser Effekt, gepaart mit einem für die geregelte Kurzlichtbogentechnik typischen modifizierten Strom-Spannungs-Verlauf, ermöglicht ein energiereduziertes Fügen.

Die Auftragversuche erfolgten mit einer Fronius „CMT Advanced“ Schweißstromquelle. Als Zusatzwerkstoff kam wie zuvor der Lotwerkstoff SG-Cu Mn 12 Ni 2C mit einem Drahtdurchmesser von 1,0mm zum Einsatz. Gelötet wurde unter Verwendung des Schutzgases Ar4.6.

Im Rahmen von Vorversuchen wurden die Parameter so eingestellt, dass jeder Print einem Tropfenübergang entsprach. Die Anzahl der Prints, d.h. der Tropfenübergänge, konnte über die Software gezielt eingestellt werden. Variiert wurde die Anzahl der Prints (Printanzahl: 1 – 100). Alle Versuche wurden aus statistischen Gründen dreimal wiederholt.

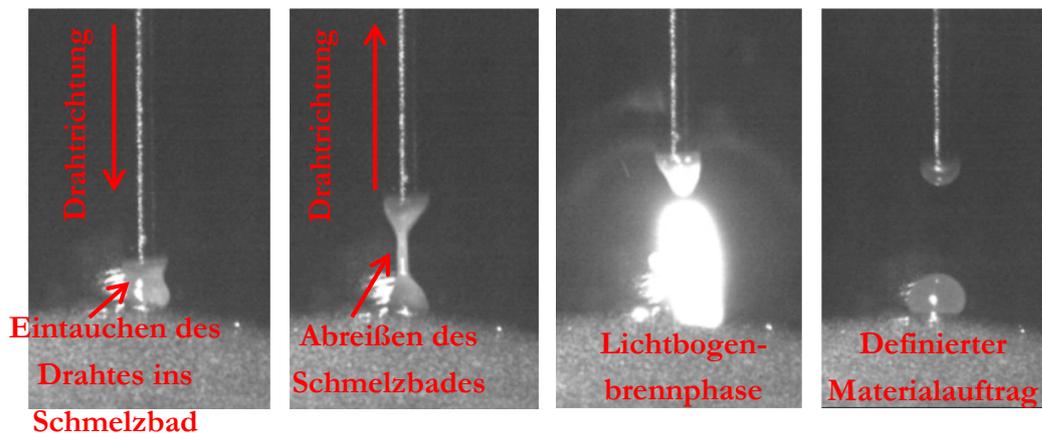


Abbildung 51: Besonderheit des Tropfenübergangs bei der CMT-Technologie mit kontrollierter Eintauchphase des Drahtes ins Schmelzbad und anschließendem Drahrückzug

Metallographie

Neben dem gezielten Materialauftrag sind die Anbindung des Lotes und die thermische Beeinflussung des Rotorwerkwerkstoffs entscheidende Kriterien zur Bewertung des Korrekturergebnisses.

Ein symmetrischer Materialauftrag ist das Zielkriterium, einhergehend mit einer vollständigen metallurgischen Anbindung zum Grundwerkstoff. Der Energieeintrag sollte allerdings nur in geringem Maße die mechanischen Eigenschaften des Rotors beeinflussen.

Mittels metallographischer Untersuchungen wurde die metallurgische Anbindung zwischen Grund- und Lotwerkstoff beurteilt. Weiterhin diente die Größe der Wärmeeinflusszone als Indikator zur qualitativen Bestimmung des Wärmeeintrages in den Grundwerkstoff. Schliffebene war die Mitte des Auftragspunktes. Zur Darstellung der Wärmeeinflusszone (S355) wurden die Proben mit 3%iger, wässriger Salpetersäure geätzt.

9.3.2 Ergebnisse

9.3.2.1 Auswuchtversuche mittels Mikro-Plasma-Auftraglöten

Zu Beginn der Versuche war es erforderlich, den Einfluss der Schweißzeit t_s , der Drahrückzugszeit t_z und der Drahtstartverzögerungszeit t_v auf den erzielbaren Masseauftrag zu ermitteln. Die Drahtstartverzögerungszeit wurde deshalb zunächst vernachlässigt und ging nicht in die Berechnung der Gesamtschweißzeit t_g ein.

Hierbei zeigten erste Untersuchungsergebnisse bei unterschiedlichen Drahtvorschüben einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen der Schweißzeit t_s bzw. Gesamtschweißzeit $t_g = t_s + t_z$, siehe Abbildung 52. Die Drahrückzugszeit t_z betrug zunächst 2 s. Die real erzielten Auftragmassen überstiegen dabei den theoretisch ermittelten Wert, wobei die Abweichung mit zunehmender Drahtvorschubgeschwindigkeit erwartungsgemäß anstieg.

Eine Reduzierung der Drahrückzugszeit t_z von 2 s auf 0,5 s führte hingegen zu dem in Abbildung 53 dargestellten Ergebnis. Durch die Minimierung von t_z auf 0,5s wurde der Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit auf den Masseauftrag vernachlässigbar gering. Im Vergleich zum vorherigen Ergebnis lag der reale Masseauftrag nun unter dem theoretischen Wert, wobei die Abweichung durchgängig bei ca. 0,05 g lag.

Durch die ergänzende Berücksichtigung der Drahtstartverzögerungszeit t_v bei der Berechnung der Gesamtschweißzeit t_g konnte die Abweichung zwischen Theorie und Realität positiv beeinflusst werden. In diesem Zusammenhang konnte bei einer Drahtstartverzögerungszeit t_v von 0,5s eine systematische Erhöhung des Masseauftrags um 0,05 g erzielt werden, so dass letztendlich eine nahezu vollständige Übereinstimmung von Theorie und Praxis ermöglicht wurde. Hohe Drahtvorschübe von 0,8m/min ermöglichten dabei Prozesszeiten zwischen ca. 1,2 s (für 0,1 g) und 4,67s (für 0,4 g).

Ziel bei der Qualifikation bzw. Optimierung der Masseauftragstrategie war es, den Energieeintrag ins auszuwuchtende Bauteil so weit wie möglich zu verringern. Thermisch bedingte Gefügebeeinflussungen, die zu einer negativen Beeinträchtigung der Bauteileigenschaften führen können, sollten hierdurch

verringert werden. Deswegen wurde auch untersucht, inwieweit der Einfluss des Schweißstroms das Ergebnis des Masseauftrages bestimmt. Entsprechende Untersuchungsergebnisse bei einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von 0,8m/min sind in Abbildung 54 dargestellt. Eine Beeinflussung des Masseauftrages durch die Variation des Schweißstroms wurde dabei nicht festgestellt. Detektierbare Abweichungen traten erst bei Masseaufträgen ab 0,3g auf und lagen im Bereich zwischen 0,01 – 0,02g. Unter 0,3g liegt die Genauigkeit im 1/1000 g – Bereich.

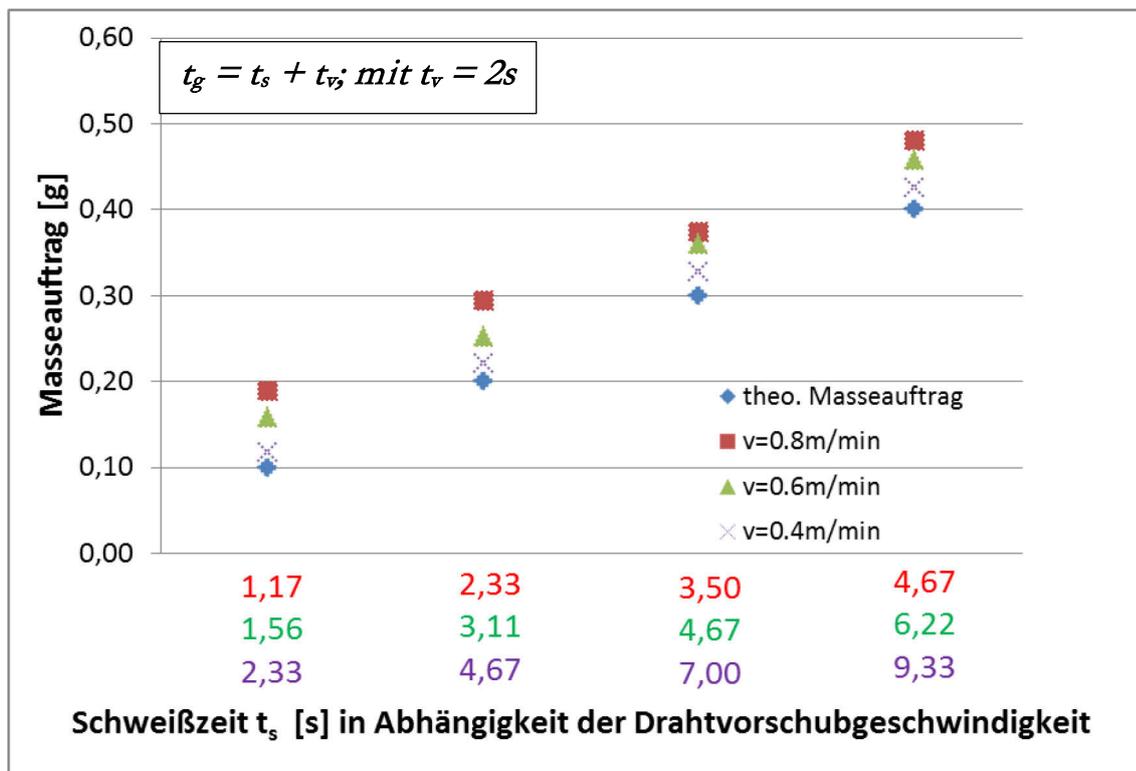


Abbildung 52: Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit und somit Schweißzeit t_s auf den realen Masseauftrag, Drahtstartverzögerungszeit $t_v = 2s$; Drahrückzugszeit t_z wurde bei der Gesamtschweißzeit t_g vernachlässigt

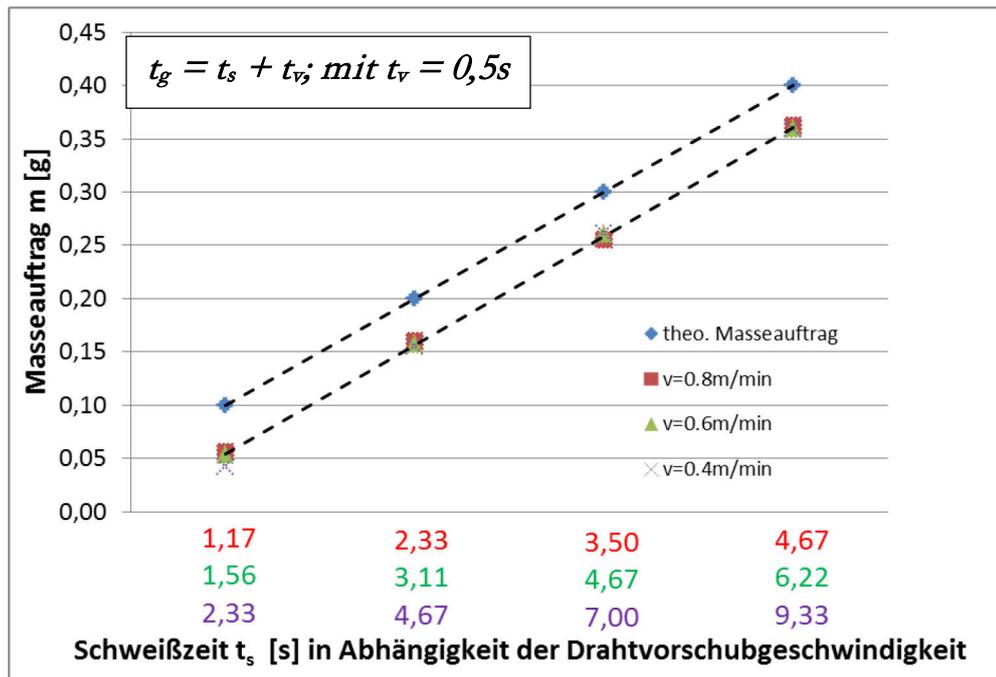


Abbildung 53: Einfluss der Drahtvorschubgeschwindigkeit und somit Schweißzeit t_s auf den realen Masseauftrag, Drahtstartverzögerungszeit $t_v = 0,5s$; Drahrückzugszeit t_z wurde bei der Gesamtschweißzeit t_g vernachlässigt

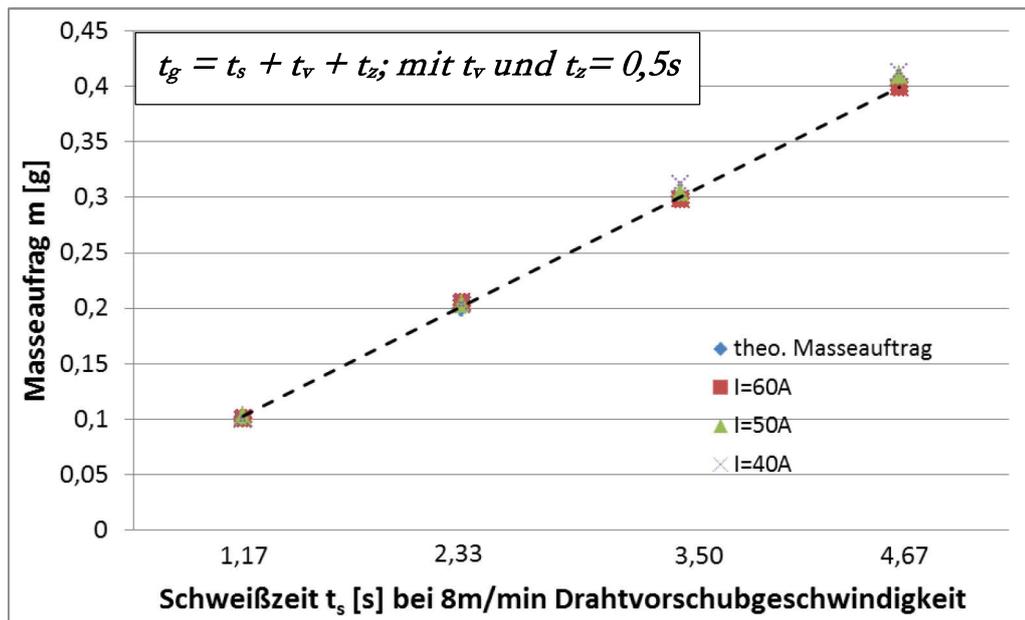


Abbildung 54: Einfluss der Schweißstromstärke auf den realen Masseauftrag bei einer Drahtvorschubgeschwindigkeit von 0,8m/min; Drahtstartverzögerungszeit $t_v = 0,5s$; Drahrückzugszeit $t_z = 0,5s$

Bei der visuellen und metallographischen Beurteilung der aufgetragenen Lötunkte fällt jedoch auf, dass der Schweißstrom und damit der Energieeintrag sehr wohl die Form der Lötunkte beeinflusst. So führen hohe Schweißströme von 60A zu verbesserten Benetzungseigenschaften des Lotes und somit zu einer Abflachung und Verbreiterung des Schweißpunktes. Geringe Schweißströme von 40A rufen hingegen einen kegelförmigen Lotaufbau hervor, siehe Abbildung 55. Der Einfluss derartiger Lotformen auf die Unwuchtkorrektur wurde im Rahmen von Awusys nicht näher untersucht, ist für die jeweilige Auswuchtaufgabe jedoch zu berücksichtigen und entsprechend zu qualifizieren. Die Form der Lotpunkte war generell symmetrisch bzw. gleichmäßig. Unsymmetrische Geometrien, wie in Abbildung 55 ersichtlich, traten ausschließlich bei Verschleißerscheinungen der Ringanode auf, woraufhin diese ausgetauscht wurde.

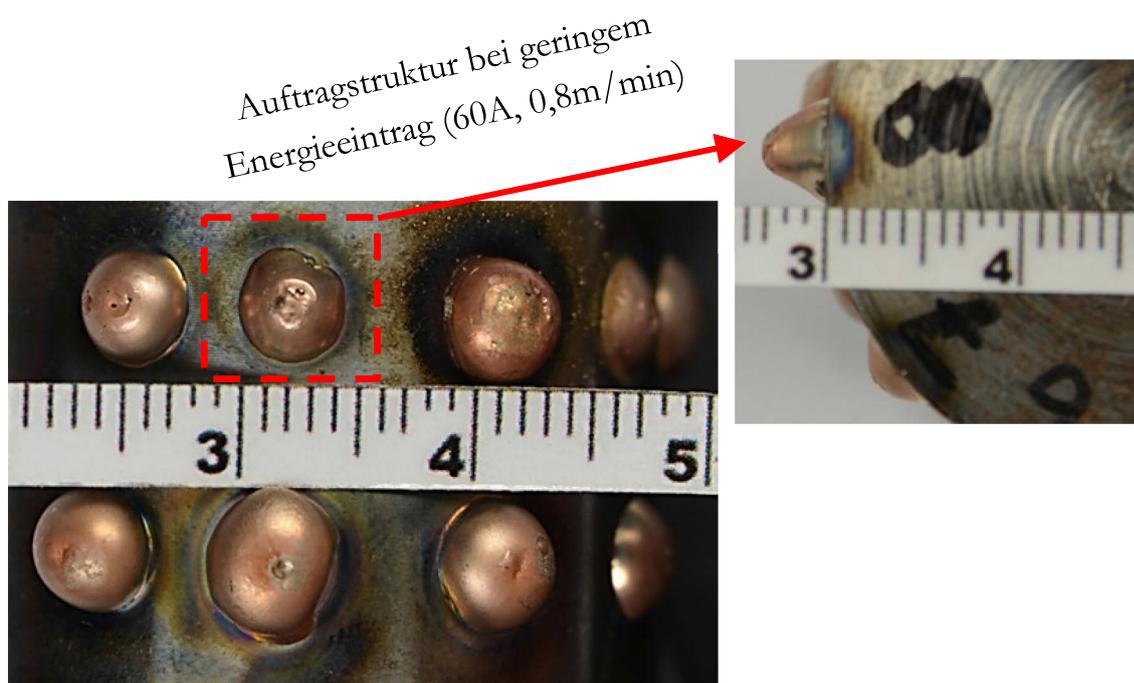
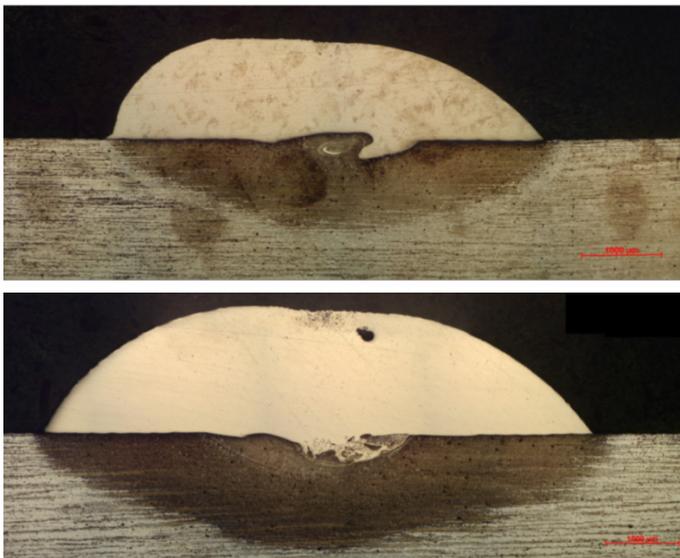


Abbildung 55: Visuelles Erscheinungsbild der punktuellen Auftragschweißungen in Abhängigkeit des Wärmeeintrages

Zur Bewertung der Lotanbindung und der thermischen Beeinflussung des Rotorwerkstoffs erfolgten metallographische Untersuchungen. Der Grad bzw.

die Fläche der Wärmeeinflusszone diene dazu, den Energieeintrag ins Bauteil qualitativ abzuschätzen.

Alle Lötverbindungen zeigten durchweg eine stoffschlüssige Anbindung zum Grundwerkstoff, wobei Aufmischungen zwischen Lot und Grundwerkstoff erkennbar waren, siehe Abbildung 56. Poren kamen nur vereinzelt zum Vorschein.



$$v = 0.8 \text{ m/min}$$

$$m = 0.2 \text{ g}$$

$$I = 60 \text{ A}$$

$$v = 0.4 \text{ m/min}$$

$$m = 0.4 \text{ g}$$

$$I = 60 \text{ A}$$

Abbildung 56: Lotanbindung und Ausbildung der Wärmeeinflusszone in Abhängigkeit des Energieeintrages

Die genauere Betrachtung der Wärmeeinflusszone verdeutlicht, dass der Grad des Energieeintrages ins Bauteil (d.h. Fläche der WEZ) erwartungsgemäß mit sinkender Stromstärke, verringerter Schweißzeit und steigender Drahtvorschubgeschwindigkeit abnimmt, siehe Abbildung 57.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Mikro-Plasma-Verfahren sind also aus Gründen der Auftraggenauigkeit und der thermischen Beeinflussung Drahtvorschübe von 0,8 m/min bei Stromstärken von ca. 40 A zu bevorzugen. Hierbei sind Masseaufträge im 1/1000 g-Bereich zwischen 0,1 – 0,4 g realisierbar. Der Einfluss der Lotform bzw- struktur auf das Auswuchtergebnis muss jedoch einer gesonderten Betrachtung unterzogen werden.

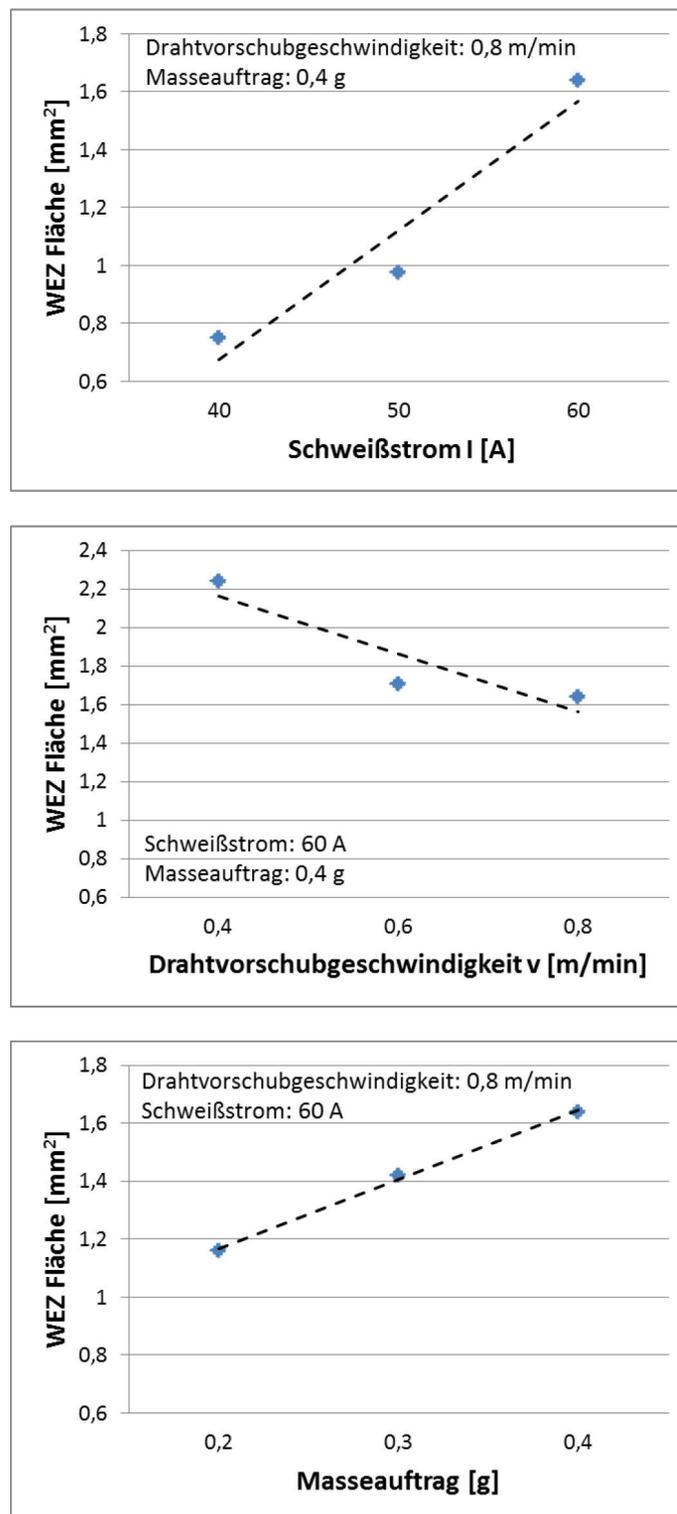


Abbildung 57: Einfluss der Stromstärke, der Drahtvorschubgeschwindigkeit und des Masseauftrags (Schweißzeit) auf die Größe der Wärmeeinflusszone und damit auf den Energieeintrag ins Bauteil

9.3.2.2 Auswuchtversuche mittels Print-Technologie

Im Gegensatz zum Mikro-Plasma-Verfahren handelt es sich bei der Print-Technologie um ein MSG-basiertes Verfahren mit abschmelzender Drahtelektrode. Wie in Abbildung 51 ersichtlich hat die ständig wiederkehrende Tropfenablösung im Zuge des Kurzschlusses die Bildung eines definierten Lotauftrages zur Folge. Hierdurch nimmt der Masseauftrag mit zunehmender Anzahl der aufgetragenen Schweißpunkte (Prints) linear zu, siehe Abbildung 58. Herausragend ist, dass der erzielbare Masseauftrag bereits ab minimalen Unwuchtkorrekturen von 0,025g auf 1/1000g genau reproduzierbar ist. Dabei ist die aus drei Versuchen pro Parameter errechnete Standardabweichung so gering, dass sie im Diagramm nicht ersichtlich ist.

Unabhängig von der Anzahl der Prints ist die Form der Lötunkte nahezu symmetrisch und weist aufgrund der schnellen Schmelzbaderstarrung eine bauchige Form auf, siehe Abbildung 59.

Im Schliffbild ist eine durchweg stoffschlüssige Anbindung des Lotes zum Grundwerkstoff gegeben. Der Grad an Porosität innerhalb des Lotes resultiert aus der forcierten Schmelzbaderstarrung und nimmt erwartungsgemäß mit zunehmender Printanzahl (also zunehmendem Energieeintrag) ab. Auf das Ergebnis des Masseauftrages und die Qualität der Anbindung hat diese Porosität allerdings keinen Einfluss.

Im Gegensatz zum vorherigen Mikro-Plasma-Auftraglötten ist bei der Print-Technologie keinerlei Wärmeeinflusszone im Grundwerkstoff erkennbar.

Im Vergleich zum Mikro-Plasma-Auftraglötten liegen die Vorzüge der Print-Technologie (neben dem geringen Wärmeeintrag) insbesondere in der geringen Taktzeit, was für serielle Anwendungen von großer Bedeutung ist und der hohen Präzision insbesondere bei Auftragmassen unter 0,1g.

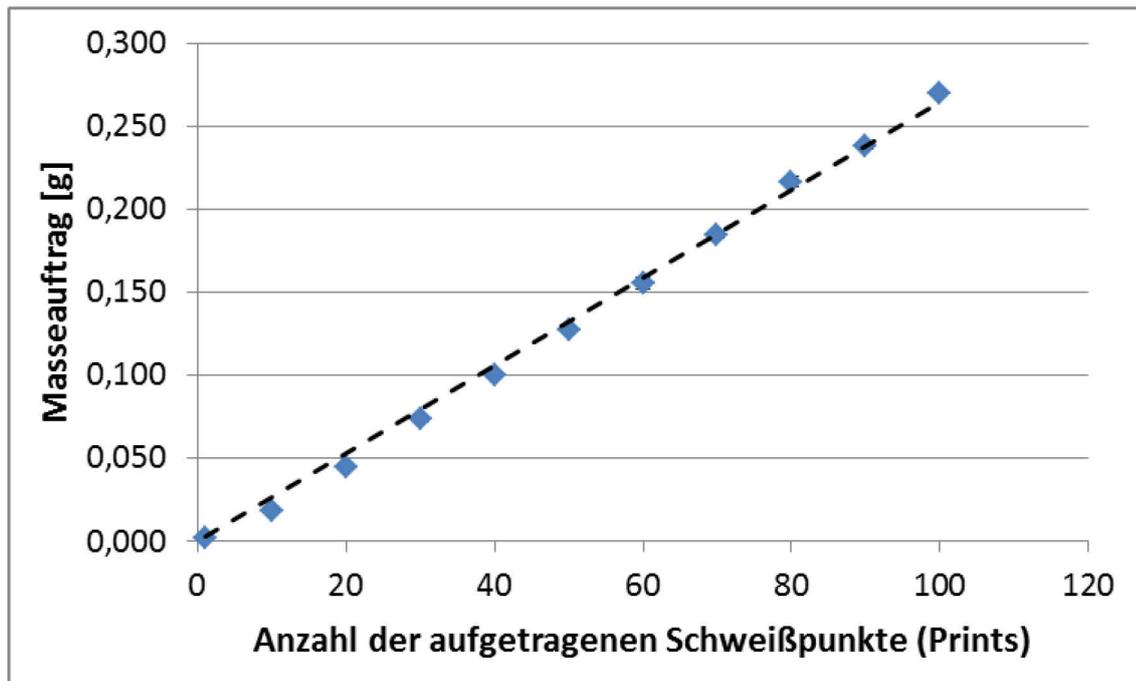


Abbildung 58: Einfluss der Printanzahl auf den Masseauftrag

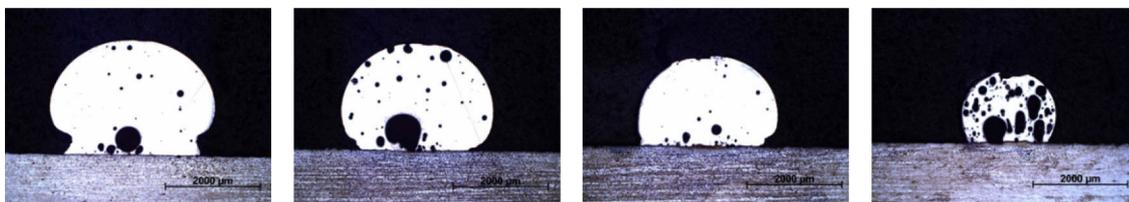


Abbildung 59: Form und Anbindung der hergestellten Prints auf Baustahl S355

9.4 Allgemeingültige Algorithmen zur Unwuchtkorrektur

Die in den Kapiteln 9.2 und 9.3 ermittelten Erkenntnisse wurden schließlich mathematisch in Form von Algorithmen formuliert und in die Softwareentwicklung für die Steuerung der Auswuchtanlage integriert.

Die Beschreibung der Algorithmen für den Masseabtrag untergliedert sich in die Untersuchungen an metallischen und kunststoffbasierten Rotoren.

Grundlegender Ansatz bei den Algorithmen zum Masseabtrag an metallischen Rotoren ist der Bezug auf den theoretischen, d.h. berechneten Masseabtrag $m_{\text{Theoretisch}}$. Davon auftretende Abweichungen wurden durch einen experimentell ermittelten Korrekturfaktor f berücksichtigt. Ausgehend von den Untersuchungen ist in den empfohlenen Geltungsbereichen mit Genauigkeiten der Größenordnung $1/1000g$ zu rechnen. Bei Masseabträgen kleiner $0,2g$ sind höhere Ungenauigkeiten zu erwarten.

Bei den Kunststoffrotoren wurde zur Herleitung der Algorithmen nur die Komponente aus Polypropylen berücksichtigt. Die Fehlerabweichung bei den Polyamid-Rotoren war mit Abweichungen von nahezu 100% ($0,1g$) zu hoch, um das Generieren zuverlässiger Algorithmen zu ermöglichen. Diesbezüglich werden noch tiefergehende Untersuchungen durchgeführt.

Bei Betrachtung der Masseauftragstrategien ist beim Mikro-Plasma-Verfahren die Übereinstimmung zwischen theoretischem und experimentell ermitteltem Wert so hoch (ca. $0,001g$), dass die Einführung eines Korrekturfaktors nicht notwendig ist, vorausgesetzt die empfohlenen Geltungsbereiche und Parametergrenzen werden berücksichtigt.

Die Print-Technologie eignet sich insbesondere zum hochpräzisen Masseauftrag bei Unwuchtkorrekturen kleiner $0,1g$ oder sogar $0,05g$. In Abhängigkeit des Zusatzwerkstoffs und der eingestellten Tropfengröße wird sich in Abhängigkeit der Printanzahl immer ein linearer Zusammenhang zum Masseauftrag einstellen.

Masseabtrag an metallischen Rotoren durch Fräsen

Im Allgemeinen gilt:

$$m_{\text{Real}} = f \times m_{\text{Theoretisch}}$$

mit

$$\text{Korrekturfaktor } f_{\text{Stahl}} = 0,889 \text{ und } f_{\text{Messing}} = 0,825$$

Es ergeben sich für folgende Geltungsbereiche entsprechende Algorithmen:

Geltungsbereich I:

- Rotordurchmesser D: 20 – 35 mm
- Fräserdurchmesser d: 4,209 mm
- Masseabtrag m: 0,2 – 0,6 g

$$\Delta m \text{ [g]} = (0,1092 \text{ [g/mm]} \times \text{Frästiefe [mm]} - 0,006) \times f$$

Geltungsbereich II:

- Rotordurchmesser D: 20 – 35 mm
- Fräserdurchmesser d: 6,1276 mm
- Masseabtrag m: 0,2 – 0,6 g

$$\Delta m \text{ [g]} = (0,2315 \text{ [g/mm]} \times \text{Frästiefe [mm]} - 0,027) \times f$$

Masseabtrag an Kunststoffrotor aus Polypropylen

$$7\text{mm Fräser: } \Delta m \text{ [g]} = 0,0091 \text{ [g/}^\circ\text{]} \times \text{Winkellänge [}^\circ\text{]} + 0,0586$$

$$9\text{mm Fräser: } \Delta m \text{ [g]} = 0,0106 \text{ [g/}^\circ\text{]} \times \text{Winkellänge [}^\circ\text{]} + 0,0969$$

Geltungsbereich:

- Frästiefe: 1,5mm
- Winkellänge bezieht sich auf einen Abstand von 38,5mm zwischen Rotorachse und Nutunterkante

Masseauftrag mittels Mikro-Plasma-Auftraglöten

Für das Mikro-Plasma-Auftraglöten wird folgender Algorithmus mit dem entsprechenden Geltungsbereich empfohlen:

$$\Delta m \text{ [g]} = 0,086 \text{ [g/s]} \times \text{Schweißzeit [s]}$$

Geltungsbereich:

Drahtstartverzögerungszeit: 0,5s

Drahrückzugszeit: 0,5s

Drahtvorschubgeschwindigkeit: 0,8m/min

Schweißstrom: 40 - 60A

Masseauftrag: 0,1 – 0,4g

Zusatzwerkstoff. Cu-Basis-Lot (D 1,0mm)

Auftraglöten mittels Print-Technologie

Bei der Print-Technologie ist immer ein linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Schweißpunkte und des Masseauftrags zu erwarten. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind die Tropfengröße (einstellbar durch Schweißparameter), der Zusatzwerkstoff und der Drahtdurchmesser. Im Allgemeinen gilt:

$$\Delta m \text{ [g]} = \text{Masse pro Schweißpunkt [g]} \times \text{Anzahl der Schweißpunkte } n$$

Für den vorliegenden Fall gilt:

$$\Delta m \text{ [g]} = 0,0026 \text{ [g]} \times n$$

9.5 Fazit

Grundlegendes Ziel der Untersuchungen bestand in der Parametrisierung von Masseauftrag- und Masseabtragstrategien für das Projekt „Awusys“.

Als Abtragstrategie wurde aus Gründen der einfachen Integrierbarkeit in ein Auswuchtsystem die konventionelle Fräsbearbeitung ausgewählt und im Vergleich zum Stand der Technik hinsichtlich Auftraggenauigkeit verfeinert und optimiert. Derzeitige Systeme erreichen Genauigkeiten von ca. 0,1g. Berücksichtigt werden dabei nur die Dichte des Bauteilwerkstoffs sowie die Werkzeuggeometrie. Fehlereinflüsse, hervorgerufen durch das Rückfederungsverhalten des Werkstoffs oder Mess- bzw. Maschinenungenauigkeiten werden hingegen nicht in Betracht gezogen. Genau diese Faktoren müssen allerdings bei zunehmend effizienteren Rotoren betrachtet werden, um höhere Korrekturgenauigkeiten zu ermöglichen.

Im Projekt Awusys wurde deswegen der Algorithmus zum Masseabtrag um einen Korrekturfaktor ergänzt, der praktische Fehlereinflüsse mit berücksichtigt. Hierdurch wurden reproduzierbare Genauigkeiten bei der Unwuchtkorrektur von 0,001g erzielt.

Das Potenzial des Mikro-Plasma-Auftraglöten und der geregelten Kurzlichtbogentechnologie als Masseauftragverfahren wurde im Stand der Technik bislang noch nicht berücksichtigt und diskutiert. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades sind diese Verfahren allerdings sehr gut zur Integration in ein vollautomatisches Auswuchtsystem geeignet.

Die Untersuchungen haben hierbei aufgezeigt, dass bei entsprechender Parameterwahl Auftraggenauigkeiten von 0,001g einstellbar sind. Hervorzuheben ist insbesondere die Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit der Print-Technologie bei geringfügigen Auftragsmassen kleiner 0,05g.

Aus den Untersuchungen abgeleitete Erkenntnisse wurden schließlich mathematisch formuliert und in die Softwareentwicklung integriert.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes Awusys erfolgte die disziplinübergreifende Entwicklung eines hochpräzisen und zeiteffizienten industriellen Auswuchtsystems, welches neben der Unwuchtbestimmung auch zeitgleich Unwuchtkorrekturen mit höchster Genauigkeit umsetzen kann.

Die Realisierung eines derartigen Systems machte die Erarbeitung unterschiedlicher Ansätze aus den Bereichen der Konstruktion, der Softwaretechnik, der Messtechnik und der Handhabetechnik erforderlich, welche durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit dreier KMUs und einer Forschungsstelle aus den genannten Fachbereichen abgedeckt und ermöglicht wurden.

Ein wesentlicher Punkt war die Positionierung und Anordnung der Sensoren, sowie deren Schutz gegenüber äußerer, mechanischer Störeinflüsse. Dies war erforderlich, um die Güte des Signals hinsichtlich Stör- und Übertragungseffekte zu verbessern. Insbesondere durch den Einsatz zweier um 180° versetzter Piezosensoren zur Messung der Unwucht, konnten die detektierten Messsignale deutlich verfeinert und höhere Genauigkeiten erzielt werden. Zudem konnten durch konstruktive Maßnahmen Störquellen seitens des Rotorantriebes und der Systemeigenschwingungen erfasst und minimiert werden. In diesem Zusammenhang erwies sich ein neuartiger Friktionsantrieb als sehr praktikabel und störsicher. Die Minimierung der Systemeigen-schwingungen erfolgte durch die Installation entsprechender Elastomer-Dämpfungseinheiten. Hierdurch konnte eine vollständige Entkopplung zwischen Bearbeitungs- und Auswuchtstation gewährleistet werden, was die Basis für die zeitgleiche Messung bzw. Bearbeitung der Rotoren bei hoher Taktzeit war.

Neben messtechnischen konstruktiven Maßnahmen wurden zudem neuartige Algorithmen entwickelt, um Störeffekte direkt herausfiltern zu können. Zur Ermittlung der Unwucht wurde als primärer Algorithmus die Kreuzkorrelation verwendet, welche sich als robustes und wenig störanfälliges Verfahren erwies. Darüber hinaus wurden auch neuartige Ansätze zur Unwuchtmessung auf Basis der Fourier-Transformation erfolgreich und vielversprechend betrachtet. In

Verbindung mit der entwickelten Messtechnik und Anlagensteuerung wurden die entwickelten mathematischen Modelle am rechnergestützten Versuchsstand in Betrieb genommen und erfolgreich erprobt. Die zusätzliche Entwicklung einer Bediener-Interface ermöglichte die Bedienung und Beobachtung der Anlagenteile und –stationen des Auswuchtsystems.

Die Entwicklung des rechnergestützten Versuchsstandes, welcher sowohl die Unwuchtmessung als auch zeitgleich die Unwuchtkorrektur realisieren soll, stellte hohe Anforderungen an die Handhabe- und Sicherheitstechnik. Hierfür wurden das gesamte Handling und die Strategie zur automatisierten Bearbeitung der Werkstücke entwickelt. Insbesondere die Anforderungen hinsichtlich des zeitgleichen Bearbeitens und Auswuchtens der Rotoren erforderte einen hohen ingenieurtechnischen Aufwand zur Gewährleistung der angestrebten Taktzeiten. In den rechnergestützten Versuchsstand flossen zudem alle erarbeiteten Ergebnisse der Projektpartner bezüglich Konstruktion, Software- bzw. Messtechnik und Strategien zur Korrekturunwucht ein.

Im Rahmen von Untersuchungen zur Korrekturunwucht wurden bestehende Verfahren, der Masseabtrag durch Fräsen bzw. Bohren, weiterentwickelt. Durch die zusätzliche Berücksichtigung der anlagenspezifischen Fehler konnten hierdurch Genauigkeiten bei der Unwuchtkorrektur von ca. 0,001g erzielt werden. Weiterführend wurde das Potenzial des Mikro-Plasma-Auftraglöten und der geregelten Kurzlichtbogentechnologie als Masseauftragstrategie untersucht, wobei ebenfalls Genauigkeiten von ca. 0,001g bei hoher Taktzeit erzielt werden konnten. Die abgeleiteten Erkenntnisse wurden schließlich mathematisch formuliert und in die Softwareentwicklung des rechnergestützten Versuchsstandes integriert.

Mit dem rechnergestützten Versuchstand steht noch keine industrielle Anlage aber ein hervorragendes Werkzeug für die Weiterentwicklung des AWUSYS-Systems zu einem kommerziellen Produkt zur Verfügung. Insofern wurde die Zielstellung des FuE-Projektes vollständig erreicht und in Teilen übertroffen.

11. Literaturverzeichnis

- [1] H. Schneider: Auswuchttechnik (2007), Springer Verlag
- [2] G. Kirchberg: Auswuchten schwerer Läufer hoher Drehzahl. In: Forschung im Ingenieurwesen (1935), Springer Verlag
- [3] J. Drechsler et al.: Computergestütztes Auswuchten elastischer Rotoren nach Eigenformtheorie und Einflusskoeffizientenverfahren. In: Ingenieur-Archiv (1978), Springer Verlag
- [4] G. Deissler et al.: Mit In-Process-Auswuchten die volle Drehzahl nutzen. In: Werkstatt-Betrieb Band 1-2 (2004)
- [5] R. Ramlau: Unwuchtbestimmung in rotierenden Systemen – Theorie und Anwendungen. Johann Radon Institute for Computational and Applied Mathematics, Linz (2006)
- [6] A. Meldahl: Auswuchten elastischer Rotoren. In: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Band 34 (1954)
- [7] M. Müller: Ein neues Verfahren zum Auswuchten elastischer Rotoren. In: Ingenieur-Archiv 54 (1984)
- [8] E. Hübner: Das Auswuchten elastischer Rotoren, ein Problem der Strukturanalyse. In: Archive of Applied Mechanics (1961), Springer Verlag
- [9] B. Ryzhik et al.: Zum Sommerfeldeffekt beim selbsttätigen Auswuchten in einer Ebene. In: Technische Mechanik, Band 21 – Heft 4 (2001)
- [10] W. Kellenberger: Elastisches Wuchten – Modale Verfahren, EK-Technik, Sondertechniken, automatisches und thermisches Wuchten. (1987), Springer Verlag
- [11] Internet-Portal der SCHENK RotTec GmbH
- [12] A. Pröll et al.: Aufbau eines Mendocino – Motors. Projektseminar in der Studienrichtung Mechatronik, Johannes Kepler Universität Linz
- [13] R. Gasch et al.: Der starre Rotor in aktiven Magnetlagern. In: Rotordynamik (2006), Springer Verlag

- [14] E. Maldfeld et al.: Statische und dynamische Auslegung des Turbinenläufers. In: Stationäre Gasturbinen (2003), Springer – Verlag
- [15] N.G. Buro: Regelung elektromagnetisch gelagerter Rotoren mit parallelen Strukturen. Universität der Bundeswehr Hamburg, Dissertation (2002)
- [16] F. Fomi Wamba: Automatische Auswuchtstrategie für einen magnetgelagerten elastischen Rotor mit Auswuchtaktoren. TU Darmstadt, Dissertation (2008)
- [17] J. Fischer et al.: Berechnung instationärer Schwingungen gleitgelagerter Turbomaschinen. In: Tagungsband zur 8. Internationalen Tagung „Schwingungen in rotierenden Maschinen, Wien (2009)
- [18] Ch. Daniel et al.: Identifikation des Einflusses konstruktiver Lagerparameter eines in Schwimmbuchsen gelagerten Rotorsystems. In: Tagungsband zur 10. Internationalen Tagung „Schwingungen in rotierenden Maschinen, Berlin (2013)
- [19] A. Scholz: Ein Beitrag zur Optimierung des Schwingungsverhaltens komplexer Rotorsysteme mit viskoelastischen Dämpfungselementen. TU Berlin, Dissertation (2011)
- [20] C. Bavastri et al.: Optimally designed dynamic vibration absorbers applied on rotating systems - results comparison. In: Schwingungen in rotierenden Maschinen (SIRM) - Tagungsbeiträge: 23. - 25. Februar 2009, Wien, Österreich, Techn. Univ., 2009, S. Paper ID–22
- [21] A. Bormann: Fortschritt-Berichte VDI. Bd. 330: Elastomerringe zur Schwingungsberuhigung in der Rotordynamik: Theorie, Messungen und optimierte Auslegung: Technische Universität Berlin, Dissertation. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2005
- [22] J. K. Dutt: Stability of rotor systems with viscoelastic supports. In: Journal of Sound and Vibration 153 (1992), Nr. 1, S. 89–96
- [23] J. K. Dutt: Vibration Response Reduction of a Rotor Shaft System Using Viscoelastic Polymeric Supports. In: Journal of Vibration and Acoustics 115 (1993), Nr. 2, S. 221–223

-
- [24] J. K. Dutt: Rotor vibration reduction with polymeric sectors. In: Journal of Sound and Vibration 262 (2003), Nr. 4, S. 769–793
- [25] T. Olschewski: VibroMatrix – Dynamisches Propellerauswuchten. In: Fachartikel der IDS Innomic Gesellschaft für Computer- und Messtechnik mbH (2007)
- [26] N.N.: Das Auswuchten von Schneidwerkzeugen für die HSC-Bearbeitung. In: Der Stahlformbauer Heft 4 (2009)
- [27] N.N.: Auswuchten von Schneidwerkzeugen und Maschinenspindeln: Direkt auf der Maschine. In: Schweizer Maschinenmarkt Band 102 (2001)
- [28] M. Weber: Applikationsschrift VibroMetraSystem – Auswuchtsystem VM-BAL. Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K. (2010)
- [29] N.N.: Informationsbroschüre zum Auswuchtsystem „ACURO“ – Schunk Spann- und Greiftechnik
- [30] N.N.: Informationsbroschüre zum „Auswuchtmaschinen Vertikal Typ BMT200 – Eigenschaften. Micro Präzision Marx GmbH
- [31] N.N.: Informationsbroschüre zur halbautomatischen Rotorenauswuchtmaschine DMK4. Balance Systems s.p.a.
- [32] N.N.: Informationsbroschüre zur Auswuchtmaschine Typ 110 MBRS für Turbolader-Rumpfgruppen. Schenk RoTec GmbH
- [33] B. Perovic: Spanende und abtragende Fertigungsverfahren – Grundlagen und Berechnung. Expert – Verlag (2000)
- [34] S. Piltz: Grundlagen und Prozessstrategien der Mikrofunktenerosion für die Bearbeitung von Rotationsbauteilen. TU Berlin, Dissertation (2007)
- [35] H.K. Tönshoff: Abtragen und Bohren mit Festkörperlasern. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben BMFT 13 N 5757 (1993)
- [36] F. Klocke et al.: Fertigungsverfahren 3 - Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung (2007), Springer-Verlag

- [37] J. Jandeleit: Materialabtrag mit intensiven, ultrakurzen Laserpulsen für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik. RWTH Aachen, Dissertation (2007)
- [38] U. Sutor: Formabtrag mit CO₂-Laserstrahlung. RWTH Aachen, Dissertation (1994)
- [39] W. Kippes: Feine Verbindungen mittels Mikroplasmenschweißen. In Schweissen und Schneiden 10 (2008)
- [40] N.M. Voropai et al.: Pulsed microplasma welding of thin aluminium gaskets. In: Chemical and Petroleum Engineering – Volume 7 (1971)
- [41] A.S. Slepokurov et al.: Use of microplasma welding in component construction. In: Chemical and Petroleum Engineering – Volume 7 (1971)
- [42] F. Karizadeh et al: Effect of microplasma arc welding process parameters on grain growth and porosity distribution of thin sheet Ti6Al4V alloy weldment. In: Materials and Manufacturing Processes 20 (2005)
- [43] L. Sandu et al.: Experimental studies on microplasma welding in dental laboratory. In: Timisoara Medical Journal 2-3 (2008)
- [44] X. Chengbao et al. A process to repair the worn main shaft of motor based on the technology of micro-plasma arc cladding. In: New Technology & New Process 12 (2010)
- [45] M. Fischer: Untersuchungen zum Mikro-Plasma-Auftragschweißen von Ni-WSC Hartauftragungen. Magisterarbeit am Fachgebiet Fertigungstechnik der TU Ilmenau (2014)
- [46] S.F. Goecke; Energiereduziertes Lichtbogen-Fügeverfahren für wärmeempfindliche Werkstoffe. Fachartikel der EWM HighTec Welding GmbH, Mündersbach (2005)
- [47] P. Kah et al.; Advanced gas metal arc welding processes. In: Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology 67 (2013)

- [48] J. Bergmann et al.; Aufmischungsarmes, endkonturnahes Auftragschweißen hartstoffverstärkter Fe-Hartpanzerungen mittels geregelter, energiereduzierter MSG-Kurzlichtbogentechnik. Schweißen und Schneiden 65 (2013)
- [49] J. Wilden et al.: Cladding with new short arc devices. In: Proc. Of ITSC, Seattle, (2006)
- [50] J. Herrmann; Aufmischungsarmes Auftragschweißen. Bericht zum Forschungsvorhaben 362/03, Halle (2005)
- [51] Skript zur Vorlesung „Rotordynamik“ an der TU Darmstadt