



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Institut für
Fertigungstechnik und
Photonische Technologien



Diplomarbeit

Experimentelle Untersuchung und Optimierung einer Linearaktorik basierend auf dem Prinzip der variablen Reluktanz zur mechanischen Oberflächenbearbeitung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplomingenieurs unter der Leitung von

Assistant Prof. Dipl.-Ing. (FH) Dr. techn. Stephan Krall, MSc
(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Florian Wadl, BSc

01611414 (066 445)

Wien, im November 2023

Florian Wadl

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Wien, im November 2023

Florian Wadl

Danksagung

Diesen Teil meiner Diplomarbeit möchte ich nutzen, um mich bei meinen Wegbegleitern herzlich zu bedanken. Zuerst gebührt mein Dank den Kollegen des Instituts für Fertigungstechnik und Photonische Technologien (IFT), die mich während meiner Anstellung als studentischer Mitarbeiter umfassend unterstützt haben. Einen besonderen Dank möchte ich dabei dem Betreuer meiner Diplomarbeit, Herrn Dr. Stephan Krall, aussprechen. Herr Krall stand mir stets mit Rat und Tat zur Seite und war immer äußerst bemüht, meine Fragestellungen bezüglich der Arbeitsvorgänge am IFT als auch beim Verfassen meiner Diplomarbeit zu beantworten.

Weiters möchte ich mich bei meinen Eltern Elisabeth und Günther sowie meinen Geschwistern Victoria und Mathias bedanken, die mir durch ihren Rückhalt zu jedem Zeitpunkt einen sicheren Rückzugsort darstellten und mich in allen Phasen meines Studiums unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt auch meinem Kommilitonen Sebastian, der mich vom ersten bis zum letzten Semester meines Studiums nicht nur als Studienkollege, sondern auch als Freund mit viel Geduld, Hilfsbereitschaft und Ehrlichkeit sowohl im Studium als auch privat begleitet hat.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meinen Freunden und insbesondere bei Jakob, der den Großteil meines Studiums nicht nur mein Mitbewohner, sondern auch ein treuer Freund und Weggefährte in jeder Lebenslage war.

Zu guter Letzt sei meiner Freundin Melissa gedankt, die zwar erst gegen Ende meines Studiums in mein Leben getreten ist, diesen Abschnitt jedoch durch ihre Empathie, den emotionalen Beistand und motivierenden Zuspruch deutlich erleichtert hat.

Kurzfassung

Beim maschinellen Oberflächenhämmern (MHP – engl. Machine Hammer Peening) handelt es sich um eine mechanische Oberflächenbearbeitung mit dem Ziel, die Oberflächenintegrität zu beeinflussen. Verantwortlich dafür ist ein in einer Werkzeugmaschine oder einem Roboter geführtes Aktorsystem, dessen Werkzeug mit einer vertikalen Hubbewegung auf die Werkstückoberfläche trifft. Dies hat zur Folge, dass die Oberflächenhärte erhöht, Druckeigenspannungen erzeugt, die Oberflächenrauheit verringert oder eine Oberflächenstrukturierung erzeugt werden kann. Die meisten bisherigen Aktoren arbeiten auf dem Prinzip eines harmonischen Oszillators, womit Einzelschläge nicht bzw. nur schwer umsetzbar sind. Um einen gesteuerten Bearbeitungsprozess zum maschinellen Oberflächenhämmern realisieren zu können, wurde am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien der TU Wien ein Aktor auf Basis der Reluktanz entwickelt, der eine zeit- bzw. wegdiskrete Auslenkung des Hammerkopfes ermöglicht.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Untersuchung und Optimierung dieses neuen Aktorsystems, welches nach dem elektromagnetischen Prinzip arbeitet. Dabei wurde in einem ersten Schritt das Aktorsystem in einer Werkzeugmaschine mit unterschiedlichen Eingangsparametern getestet und das Verhalten bei verschiedenen Belastungsversuchen eruiert. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurde der Aktor in einem zweiten Schritt konstruktiv überarbeitet und mit den eingepflegten Änderungen erneut zusammengebaut. Im Anschluss daran wurde die überarbeitete Aktorik einer neuerlichen Versuchsreihe unterzogen, um die erwarteten Verbesserungen zu verifizieren.

Mit den durchgeführten Versuchen und den eingebrachten Änderungen des Aktors konnten wesentliche Fortschritte hinsichtlich der Wirkleistung erzielt werden. Die durch die Aktorik generierbaren Auszugskräfte, die auf die Werkstückoberfläche auftreffenden Kontaktkräfte als auch die eingebrachte kinetische Energie konnten deutlich erhöht werden. Einzig das thermische Verhalten konnte aufgrund der zahlreichen Verbesserungen in der Leistungsfähigkeit des Aktors nicht im selben Ausmaß weiterentwickelt werden und bedarf weiterer Untersuchungen. Dies dient als Ausgangspunkt für zukünftige Forschungsarbeiten, in denen mit Hilfe von numerischen Simulationsmodellen, speziell im Bereich der thermischen Analyse, eine Vorhersage der experimentellen Ergebnisse getroffen werden könnte.

Abstract

Machine hammer peening (MHP) is a mechanical surface treatment with the aim of influencing surface integrity. Responsible for this is an actuator system guided in a machine tool or a robot, whose tool hits the workpiece surface with a vertical lifting movement. This results in an increase of the surface hardness, generation of compressive residual stresses, reduction of surface roughness or creation of surface structure. Most previous actuators work on the principle of a harmonic oscillator, which means that individual strokes cannot be implemented or are difficult to implement. However, to be able to implement a controlled machine process for machine hammer peening, an actuator based on reluctance, which enables a discrete deflection of the hammer head in time and distance was developed at the Institute for Manufacturing Engineering and Photonic Technologies at the Vienna University of Technology.

The subject of the present work is the experimental investigation and optimization of this new actuator system, which works according to the electromagnetic principle. In a first step, the actuator system was tested in a machine tool with different input parameters and the behavior under various load tests was determined. With the gained knowledge, the actuator was structurally revised in a second step and reassembled with the changes made. The revised actuator system was then subjected to a new series of tests to verify the expected improvement.

With the tests carried out and the changes made to the actuator, significant progress was made in terms of active power. The pull-out forces which can be generated by the actuator, the contact forces hitting the workpiece surface and the introduced kinetic energy could be considerably increased. Only the thermal behavior of the system could not keep pace due to the numerous improvements in the performance of the actuator and requires further investigation. This serves as a starting point for future research in which a prediction of the experimental results could be made with the help of numerical models, especially in thermal analysis.

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current
CNC	Computergestützte Numerische Steuerung
DC	Direct Current
DIP	Deterministic Impact Peening
E-MHP	Elektrodynamisches MHP-System
engl.	Englisch
HM	Hartmetall
HSK63	Hohlschaftkegel 63
IFT	Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien
KSS	Kühlschmierstoff
MHP	Maschinelles Oberflächenhämmern
NC	Numerische Steuerung
P-MHP	Pneumatisches MHP-System
PZ-MHP	Piezoelektrisches MHP-System
RT	Raumtemperatur
TU	Technische Universität
UIT	Ultrasonic Impact Treatments

Symbolverzeichnis

A	mm^2	Querschnittsfläche des Kupferdrahtes
A_W	mm^2	durchströmte Querschnittsfläche der Wärmeleitung
b	mm	Wandstärke der Wärmeleitung
c_p	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Wärmekapazität
d	mm	Durchmesser des Kupferdrahtes
E_{kin}	J	kinetische Energie
I	A	Stromstärke
I_{gem}	V	der primären Stromstärke proportionales Ausgangssignal
L	m	Länge des Kupferdrahtes
m	kg	Masse der bewegten Bauteile des Aktors
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
P_V	W	Verlustleistung
\dot{Q}_K	W	Wärmeleistung aufgrund von Konvektion
\dot{Q}_W	W	Wärmeleistung aufgrund von Wärmeleitung
R	Ω	elektrischer Widerstand des Kupferdrahtes
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
v	m/s	Geschwindigkeit des HM-Stößels
V	l	Volumen
\dot{V}	l/min	Volumenstrom
x	μm	Weg des HM-Stößels
x_0	V	der Nullposition des HM-Stößels proportionales Ausgangssignal
x_{gem}	V	dem gemessenen Weg des HM-Stößels proportionales Ausgangssignal
λ	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	Wärmeleitfähigkeit
ρ	$\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$	spezifischer Widerstand von Kupfer bei $20\text{ }^\circ\text{C}$

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	8
2. Grundlagen und Stand der Technik	10
2.1. Grundlagen	11
2.1.1. Druckeigenspannungen	12
2.1.2. Härtesteigerung durch plastische Verformung	12
2.1.3. Modifikation der Oberflächentopografie	13
2.2. Stand der Technik	14
3. Zielsetzung und methodische Vorgehensweise	20
4. Systembeschreibung	22
4.1. DIP-System	23
4.1.1. Aufbau der Aktorik	23
4.1.2. Schnittstellen	33
4.1.3. Sensorik	34
4.2. Elektronik	35
4.3. Bedienersoftware	38
5. Systemtestung der bestehenden Aktorik	41
5.1. Spulencharakterisierung	41
5.2. Messung der Auszugskraft	43
5.2.1. Versuchsaufbau	43
5.2.2. Versuchsdurchführung	44
5.2.3. Ergebnisse	45
5.3. Messung der Kontaktkraft	46
5.3.1. Versuchsaufbau	47
5.3.2. Versuchsdurchführung	47
5.3.3. Ergebnisse	49
5.4. Messung der Temperaturentwicklung	50
5.4.1. Versuchsaufbau	51
5.4.2. Versuchsdurchführung	52
5.4.3. Ergebnisse	53
5.5. Ermittlung der Hammerkopfgeschwindigkeit und der kinetischen Energie	56
5.6. Zusammenfassung und Erkenntnisse	58
5.6.1. Flankenbreite	59
5.6.2. Pneumatische Feder	59
6. Weiterentwicklung der Aktorik	60
6.1. Flankenbreite	60

6.2.	Stator	62
6.2.1.	Kühlsystem	62
6.2.2.	Referenzmarke	66
6.3.	HSK63-Aufnahme	67
6.4.	Läufer.....	68
6.4.1.	Referenzmarke	68
6.4.2.	Bohrung zur Kontrolle der Überdeckung	69
6.5.	Gehäuse.....	70
6.6.	Messsystemhalterung	71
6.7.	Grundplatte	72
6.8.	Federbolzen.....	73
6.9.	Zusammenbau der überarbeiteten Aktorik.....	74
7.	Systemtestung der überarbeiteten Aktorik	78
7.1.	Kalibrierung des Messsystems	78
7.2.	Spulencharakterisierung.....	81
7.3.	Auszugskraft	84
7.4.	Kontaktkraft.....	86
7.5.	Temperaturentwicklung	88
7.6.	Hammerkopfgeschwindigkeit und kinetische Energie	92
7.7.	Auswertung der plastischen Eindrücke	95
8.	Zusammenfassung und Ausblick	100
9.	Literaturverzeichnis	102
10.	Abbildungsverzeichnis.....	104
11.	Tabellenverzeichnis.....	107
12.	Anhang	108

1. Einleitung

Das maschinelle Oberflächenhämmern stellt ein Fertigungsverfahren zur gezielten Oberflächenbearbeitung von Werkstoffen dar, welches sich in den letzten Jahren in diversen Bereichen der Metallverarbeitung etabliert hat. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, bei dem durch wiederholtes Auftreffen eines sogenannten Hammerkopfes auf die Werkstückoberfläche deren Eigenschaften gezielt verändert werden können. Mögliche Verbesserungen werden dabei durch eine Steigerung der Härte, Induzierung von Druckeigenspannungen, Glättung der Oberfläche sowie einer gezielten Einbringung von Strukturierungen erreicht.

Viele Antriebssysteme der im Bereich der mechanischen Oberflächenbearbeitung verbreiteten Aktoren sind kontinuierlich oder periodisch erregt, womit es nicht möglich ist, die Bewegungsschwankungen der Maschine auszugleichen. Durch diese Eigenschaft in der Ansteuerbarkeit ist eine exakte Einbringung der Schlagenergie sowie die Ausführung eines gezielten Einzelschlages nicht realisierbar. Am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien der TU Wien wurde nun ein neuer Aktor zum maschinellen Oberflächenhämmern auf Basis der variablen Reluktanz entwickelt, um einen gesteuerten Bearbeitungsprozess zu realisieren. Dabei handelt es sich um einen NC-geführten Prozess, der eine zeit- bzw. wegdiskrete Auslenkung des Hammerkopfes ermöglicht und somit jede Bewegung dieses Hammerkopfes exakt einstellen kann. Die Werkzeugmaschine, in der der Aktor eingespannt ist, übernimmt dabei die Aufgabe als Führung und Positionierung über dem Werkstück. Die Aktorik mit der dazugehörigen Elektronik ist für sämtliche Bearbeitungsparameter, wie zum Beispiel die Einschaltzeit und die Hämmerfrequenz, verantwortlich. Dadurch soll eine gleichbleibende Umformarbeit der Werkstückoberfläche erzielt werden, welche mit den bisherigen Systemen nicht möglich war.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Untersuchung und Optimierung des auf Basis der variablen Reluktanz arbeiteten Aktors. Als Ausgangsprototyp dient dabei der Aktor zum Zeitpunkt der Übernahme im Februar 2023, welcher für die Untersuchungen in dieser Arbeit herangezogen wurde. In einem ersten Schritt werden umfangreiche Untersuchungen mit einer Variation der Eingangsparameter wie zum Beispiel der Einschaltdauer, der Frequenz oder des Abstandes von Aktor zu Werkstückoberfläche vorgenommen. Dadurch soll ein verbessertes Verständnis im Hinblick auf das Verhalten und die Grenzen des Aktors

erlangt werden. Eruiert werden dabei die Auszugs- und Kontaktkräfte des Aktors als auch das Temperaturverhalten bei unterschiedlichen Parametereinstellungen. Mit der Ermittlung der kinetischen Energie beim Auftreffen des Hammerkopfes auf die Werkstückoberfläche sowie der Auswertung der erzeugten Einschläge können Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit des Aktors getroffen werden. Nach Auswertung der Versuchsergebnisse und den daraus resultierenden Schlussfolgerungen soll der Aktor im nächsten Schritt sowohl konstruktiv als auch prozesstechnisch optimiert werden, um einen bestmöglichen Hämmervorgang realisieren zu können. Dabei werden Änderungen vorgenommen, die einerseits den Zusammenbau des Aktors vereinfachen bzw. beschleunigen und andererseits zu einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Aktors führen. Mit den eingearbeiteten Revisionen wird der Aktor erneut zusammengebaut und abschließend einer neuerlichen Versuchsreihe unterzogen.

Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen einen Aufschluss über die Relevanz und Effektivität der Änderungen geben und als Basis für zukünftige Forschungsarbeiten dienen.

2. Grundlagen und Stand der Technik

Bereits zu der Zeit um 2700 v. Chr. existierten erste Berichte über Arten der mechanischen Oberflächenbearbeitungen zur Verbesserung von Goldhelmen. Ebenso bekannt sind Schriften über die Verstärkung der Schwerter der Kreuzritter aus dem späten Mittelalter. Erste modernere Anwendungen gehen einerseits auf den Militärbereich im Jahr 1789 zurück, indem Außenflächen von Artilleriegeschützen gehämmert wurden und andererseits auf die Eisenbahnindustrie die Radachsen und Lagerbolzen einer mechanischen Oberflächenbearbeitung durch Walzen unterzogen hat [1].

Auf der Suche nach effizienteren Methoden zur Bearbeitung von Werkstückoberflächen hat sich in den letzten Jahren das maschinelle Oberflächenhämmern (MHP) etabliert. Neben dem MHP gibt es eine Reihe weiterer mechanischer Oberflächenbehandlungen, die in einen indirekten und direkten Prozess unterteilt werden. Einen Überblick über diverse mechanische Oberflächenbehandlungsmethoden und die Einordnung des maschinellen Oberflächenhämmerns ist in VDI 3416 [2] gegeben, siehe Abbildung 1.

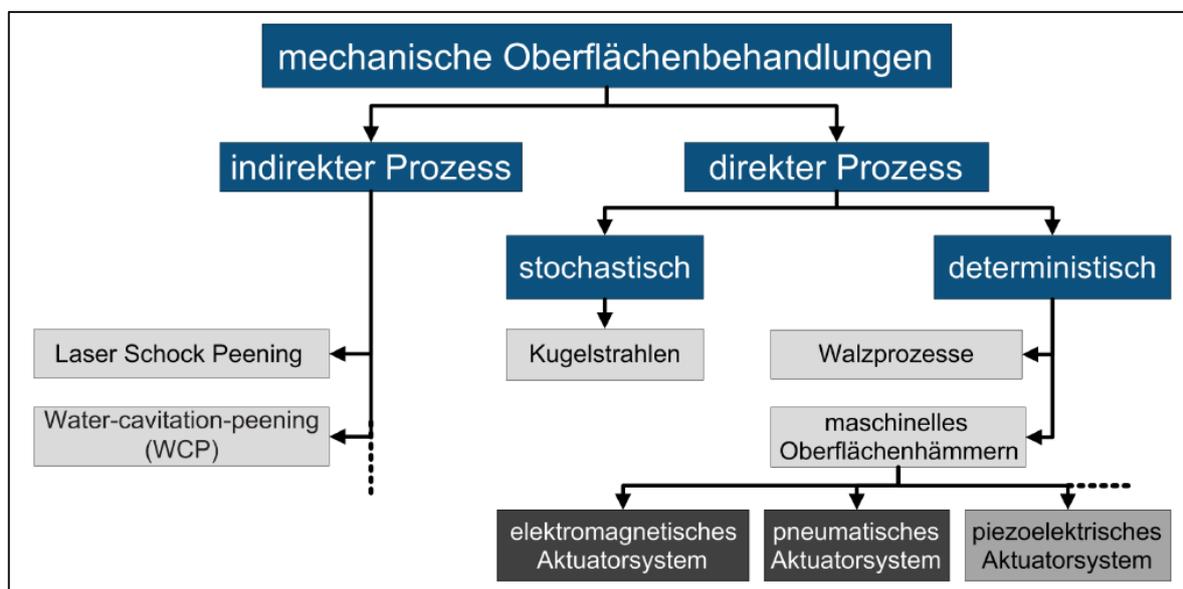


Abbildung 1: Einteilung und Überblick der mechanischen Oberflächenbehandlungen [2]

Bei einem indirekten Prozess handelt es sich um ein Verfahren, bei dem kein direkter Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück vorhanden ist. Stattdessen wird die Kraftübertragung und somit die Bearbeitung der Oberfläche durch ein Zwischenmedium, wie zum Beispiel einer Druckwelle, generiert. Ist das Werkzeug selbst für die makroskopische Deformation an der Werkstückoberfläche verantwortlich,

spricht man von einem direkten Prozess, welcher weiter in einen stochastischen und deterministischen Prozess unterteilt wird. Durch die exakte NC-gesteuerte Führung des Aktors beim MHP ist die Position der einzelnen Kontaktpunkte zwischen Hammerkopf und Werkstück deterministisch definiert und unterscheidet sich dadurch vom stochastischen Kugelstrahlen. [2]

2.1. Grundlagen

Beim maschinellen Oberflächenhämmern handelt es sich um einen Prozess, bei dem ein Aktor eine oszillierende Bewegung des Hammerkopfes oder Stößels ausführt und mit diesem auf die Oberfläche trifft. Als Aktor wird dabei ein Bauteil bzw. eine gesamte Konstruktion bezeichnet, welches ein definiertes Ausgangssignal in eine mechanische Bewegung umsetzt und somit den gewünschten Schlag ausführt. Im Gegensatz zu bekannten Oberflächenbearbeitungen wie z.B. das Kugelstrahlen, bei der die Oberfläche durch Beschießen mit Partikel unterschiedlicher Größe und Form stochastisch verteilt modifiziert wird, erfolgt beim MHP eine gezielte Schlagserie des Hammerkopfes durch den gesteuerten Aktor. Der schematische Aufbau eines Aktorsystems mit den wichtigsten Komponenten ist in Abbildung 2 dargestellt.

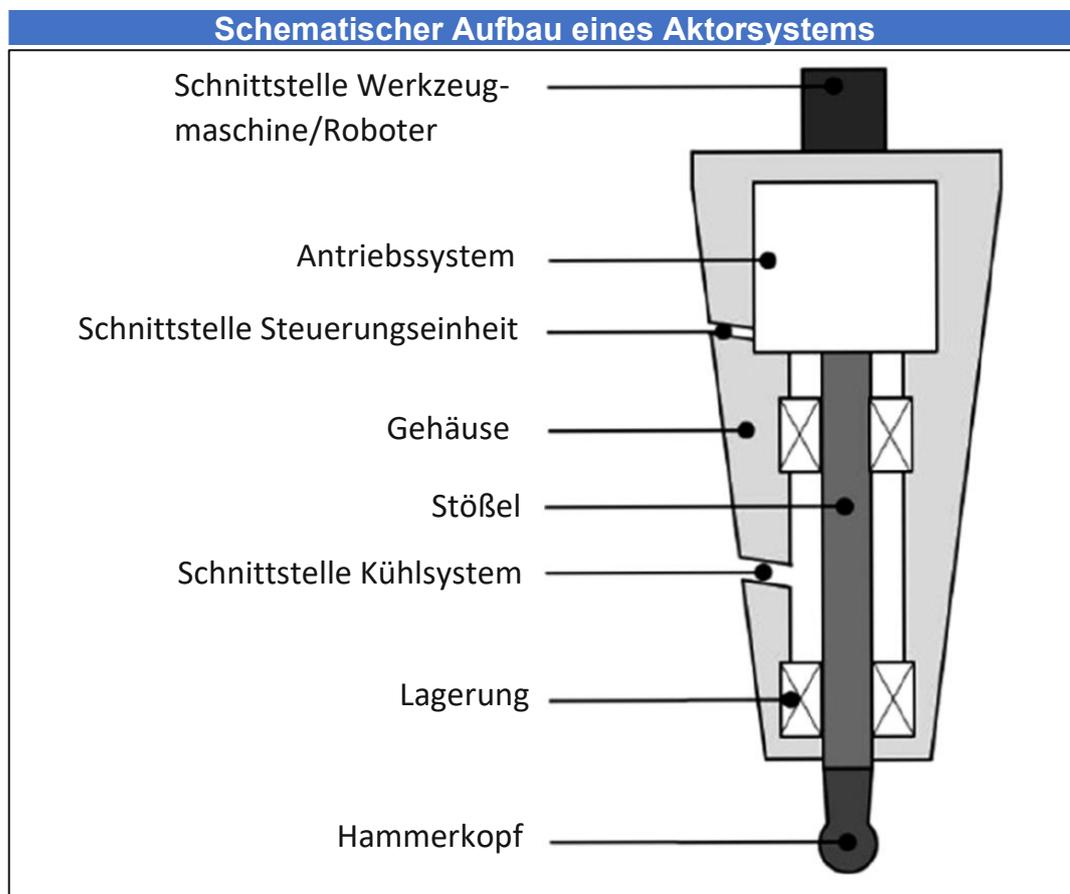


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Aktorsystems – [3] modifiziert

Wie Abbildung 2 zeigt, verfügt jeder Aktor über eine Schnittstelle, mit der dieser mit einer Werkzeugmaschine oder einem Roboter verbunden werden kann, um gezielt über die Werkstückoberfläche bewegt zu werden. Ein weiteres, wesentliches Merkmal einer Aktorik ist die Antriebseinheit, welche für die Umsetzung der axialen Bewegung des Stößels und des Hammerkopfes verantwortlich ist. Stößel und Hammerkopf bilden dabei die bewegliche Einheit, die der Einbringung der Eigenschaften in die Werkstückoberfläche dienen. Eine Lagerung, die den Stößel während der Axialbewegung führt und ein Gehäuse, welches die inneren Komponenten vor äußeren Einflüssen schützt, sind ebenfalls Teil jedes Aktorsystems. Weiters sind sowohl eine Schnittstelle für die Steuerungseinheit, welche die Antriebseinheit koordiniert, als auch eine weitere Schnittstelle für das Kühlsystem unerlässlich für die Funktion und das längerfristige Hämmern eines Aktors.

Die Verwendung von MHP-Prozessen ist durch unterschiedliche Zielvorgaben bedingt. Einerseits werden durch das kontinuierliche Auftreffen des Hammerkopfes auf die Werkstückoberfläche Druckeigenspannungen sowie eine Härtesteigerung durch Kaltumformung erzeugt. Andererseits kann durch dieses Verfahren die Werkstücktopografie verändert werden, indem eine gewünschte Struktur eingebracht oder ein definierter Bereich der Werkstückoberfläche geglättet wird.

2.1.1. Druckeigenspannungen

Ein allgemeines Merkmal von MHP-Bearbeitungen ist das Induzieren von anisotropen Druckeigenspannungen in die Werkstückoberfläche, wobei diese in Vorschubrichtung niedriger sind als normal zu dieser. Dennoch entsteht durch den Hämmerprozess eine erhebliche Steigerung der Druckeigenspannungen, die eine Rissbildung verhindern bzw. verzögern und sich damit positiv auf das Verhalten des Materials bei einer definierten Belastung auswirken. Eine sehr häufige Anwendung ist dabei das Oberflächenhämmern in schweißnahen Zonen, um die durch die Schweißnaht verursachten Zugspannungen zu reduzieren und in Druckspannungen überzuführen [3].

2.1.2. Härtesteigerung durch plastische Verformung

Metalle können im Allgemeinen elastisch und plastisch verformt werden. Erfolgt die Belastung rein elastisch, geht das Bauteil nach Wegnahme der Belastung ohne verbleibende Veränderung wieder in seine Ursprungsform zurück. Bei einer

plastischen Verformung kann der Ausgangszustand nicht mehr (ohne weitere Maßnahmen wie z.B. einem Glühvorgang) erreicht werden. Der Grund dafür liegt in der Anordnung der Atome in der Gitterstruktur eines Metalls. Bereits nach der Erstarrung der Schmelze befinden sich in einem metallischen Werkstoff zahlreiche eindimensionale Gitterfehler, welche zu Versetzungen in der Gitterstruktur führen. Bei einer plastischen Verformung und einer Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur, dem sogenannten Kaltumformen, erhöht sich mit steigendem Verformungsgrad die Versetzungsdichte, wobei sich der mittlere Abstand der Versetzungen zueinander verringert. Das bedeutet, dass sich die Versetzungen durch die gegenseitige Wechselwirkung behindern, das Wandern somit erschwert wird und dadurch eine Verfestigung bzw. Härtesteigerung eintritt. [4]

2.1.3. Modifikation der Oberflächentopografie

Durch das gezielte Auslösen einzelner Schläge bis hin zu umfangreichen Schlagserien kann das MHP auch dafür verwendet werden, mittels plastischer Deformation die Rauheitsspitzen der Werkstückoberfläche umzuformen und somit die Oberflächenrauheit zu reduzieren. Die Anwendung des maschinellen Oberflächenhämmerns zur Verringerung der Oberflächenrauheit wurde bereits in einigen Veröffentlichungen wie z.B. in [5] für den unlegierten Vergütungsstahl C45E, den hochlegierten Kaltarbeitsstahl X155CrVMo12-1, den rost- und säurebeständigen Stahl X3CrNiMo13-4 und der Aluminiumlegierung AlMgSi0,5 behandelt und nachgewiesen. Sowohl der gewählte Werkstoff als auch die definierten Bearbeitungsparameter haben dabei einen wesentlichen Einfluss auf das Resultat der Oberflächenglättung. Des Weiteren spielt sowohl der Hammerkopfdurchmesser als auch der Zeilenabstand der bearbeiteten Fläche eine entscheidende Rolle für die Qualität der Oberflächenglättung. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, führt die Oberflächenbehandlung des Vergütungsstahls C45E mit Hilfe eines großen Hammerkopfdurchmessers und kleinen Zeilenabstandes zu einer besseren Oberflächenglättung [6].

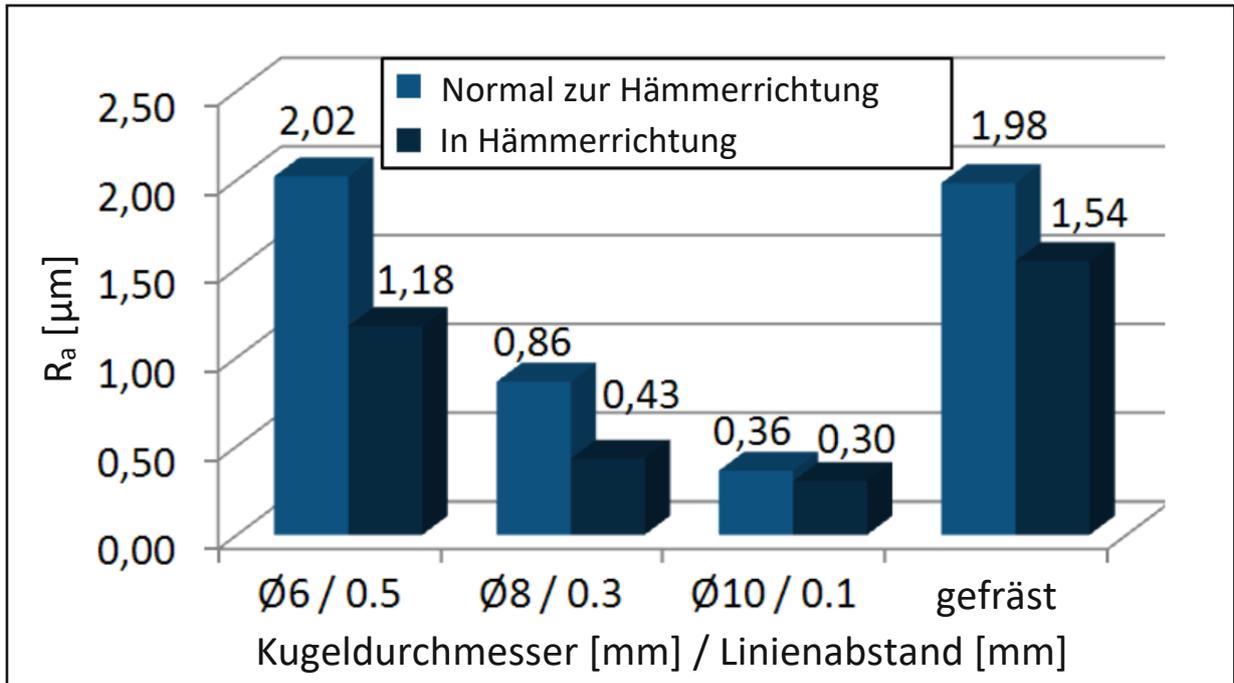


Abbildung 3: Oberflächenrauheit durch MHP in Abhängigkeit des Hammerkopfdurchmessers und des Zeilenabstandes im Vergleich zur gefrästen Werkstückoberfläche [4] - modifiziert

Durch das deterministische Ausgangssignal und den geometrisch eindeutig bestimmbaren Bearbeitungsbahnen kann das maschinelle Oberflächenhämmern auch für eine gezielte Strukturierung der Werkstückoberfläche eingesetzt werden, welche positive Effekte auf das Strömungsverhalten und die Tribologie zur Folge haben. Dabei spielen die Hämmerfrequenz, die Vorschubbahn und -geschwindigkeit eine entscheidende Rolle. Beispielsweise können dadurch mit Hilfe geeigneter Werkzeugspitzen mikroskopische Schmierfächer für die Optimierung tribologischer Reibverhältnisse implementiert werden [7].

2.2. Stand der Technik

Seit den ersten Anwendungen in der Neuzeit im 18. und 19. Jahrhundert haben sich die Hämmerprozesse stetig weiterentwickelt. Von der Erfindung des ersten geführten Hämmerprozesses, dem Ultrasonic Impact Treatments (UIT), in den 1970er Jahren für Anwendungen in der Schifffahrt über die Realisierung eines Hämmerystems basierend auf einem elektrodynamischen Antrieb für Tiefziehprozesse 1996 bis hin zu pneumatisch und piezoelektrisch angetriebenen Prozessen gibt es in der Zwischenzeit eine breite Palette an Hämmerssystemen [8].

Um die Systeme zu kategorisieren, erfolgt die primäre Einteilung der Wirkprinzipien in Technologien mit periodischem und kontinuierlichem Kontakt zwischen Werkzeug und

Werkstückoberfläche [3]. Da in der vorliegenden Arbeit das maschinelle Oberflächenhämmern mittels Aktors auf Basis der Reluktanz behandelt wird, werden lediglich die Technologien mit periodischem Kontakt zusammengefasst. Weiters werden die Systeme mit periodischem Kontakt über die Art der Wirkungsweisen eingeteilt. Dabei unterscheiden sich die Systeme durch die physikalischen Mechanismen, die zur Energiebereitstellung herangezogen werden.

Pneumatisches System (P-MHP)

Ein pneumatisch angetriebenes Aktorsystem basiert auf einem Rohrkolbenelement und verwendet als Eingangsgröße Luft als Medium zur Druckübertragung. Je nach Position des Kolbenelements schließen und öffnen sich unterschiedliche Kanäle im System. Durch dieses Verhalten ist ein Druckausgleich zwischen den verschiedenen Kammern, der Umgebung und der Druckluftversorgung möglich, wobei durch die axiale Verschiebbarkeit des Kolbens eine oszillierende Hubbewegung entsteht. Durch vorgespannte Linearfedern und den Rückstoß des Werkstücks wird der Kolben wieder in seine Ausgangslage geführt. Eine genaue Beschreibung des Funktionsprinzips ist in [9] enthalten. Ein Vorteil dieses Systems ist eine konstante Behandlung der Werkstückoberfläche sowie eine hohe Arbeitsgeschwindigkeit bei einer Schlagfrequenz von über 200 Hz. Die für den Antrieb des Kolbens verwendete Luft kann auch für die Reinigung und Kühlung des Systems genutzt werden [3]. Weiters existieren handgeführte, pneumatische Hammersysteme, welche primär für schwer zugängliche Bearbeitungsumgebungen wie zum Beispiel Schweißnahtbehandlungen verwendet werden [7].

Elektrodynamisches System (E-MHP)

Bei einem elektrodynamischen System erfolgt die Beschleunigung der bewegten Massen basierend auf dem Lorentz-Prinzip. Dabei sind der Läufer und der Stößel axial verschieblich gelagert und mit einer Spule verbunden. Die Spule wiederum befindet sich zwischen zwei Polplatten in einem Magnetfeld und wird durch Anlegen einer Spannung in Schwingung versetzt. Der Aufbau eines elektrodynamischen Aktorsystems der Firma Accurapuls ist in Abbildung 4 dargestellt [10]. Der bewegliche Läufer führt eine oszillierende Bewegung aus und wird einerseits durch die elastoplastische Rückprallenergie, die beim Auftreffen des Stößels auf die Werkstückoberfläche entsteht, und andererseits durch das Aufbringen einer alternierenden Spannung in die Ausgangslage zurückbewegt [9]. Da die Aufbringung

der Kraft im offenen Regelkreis erfolgt, gibt es keine implementierten Messsysteme, die die Lage oder Geschwindigkeit des Hammerkopfes ermitteln.

Die Kontaktenergie korreliert dabei mit der elektrischen Eingangsleistung. Vorteilhaft zeigt sich bei diesem System die gleichmäßige Schlagintensität über den bearbeiteten Bereich, ein großer variabler Bereich der Schlagfrequenz (20 – 500 Hz) als auch die Prozessschnelligkeit, die um den Faktor drei höher ist als beim manuellen Polieren [3].

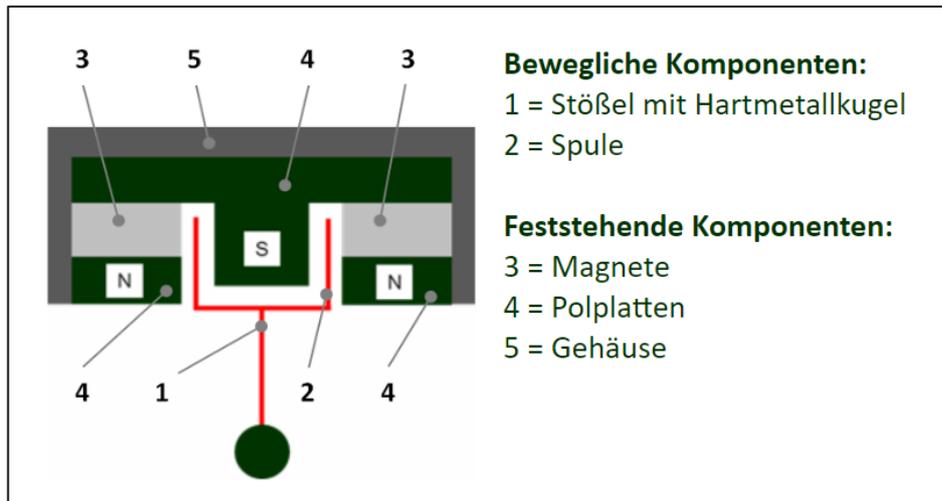


Abbildung 4: Aufbau eines elektrodynamischen Aktorsystems der Firma Accurapuls [8]

Piezoelektrisches System (PZ-MHP)

Diese Technologie nutzt ein piezoelektrisches Element, um die Kraft auf die Werkstückoberfläche zu übertragen. Dabei wird eine Spannung angelegt, welche eine Dehnung des Piezostapelaktors zur Folge hat und somit für die Bewegung des Hammerkopfes verantwortlich ist. Da die Dehnungen dieser Aktoren in einem Bereich von wenigen Zehntel-Mikrometer liegen, wird der Hammerkopf mittels Linearfedern auf die Werkstückoberfläche vorgespannt. Gegenüber anderen Wirkprinzipien hat diese Vorspannung jedoch den Nachteil, dass die kinetische Energie des Hammerkopfes beim Aufprall auf die Werkstückoberfläche nicht ausgenutzt werden kann [9]. Aufgrund der geringen Hübe und der Nähe zur Werkstückoberfläche sind Vorschubgeschwindigkeiten von 2,2 – 3 m/s erreichbar und damit schnelle Prozesszeiten möglich [3]. Abbildung 5 zeigt den Aufbau eines piezoelektrischen Aktorsystems nach [11].

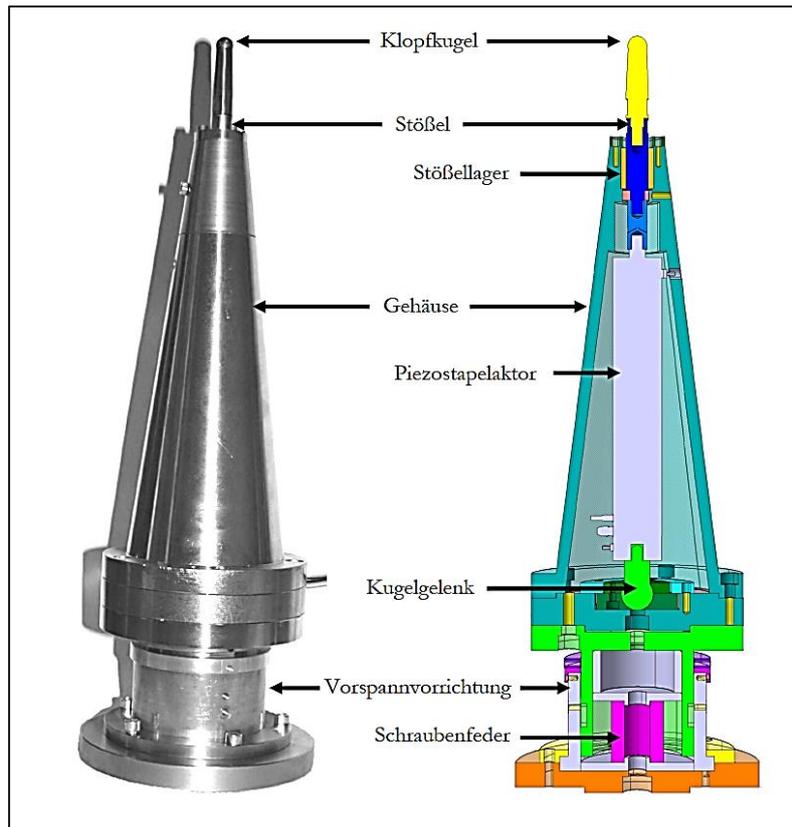


Abbildung 5: Aufbau eines piezoelektrischen Aktorsystems nach [8]

Mechanisches System (M-MHP)

Mechanisch angetriebene Aktorsysteme werden meist in eine Werkzeugmaschine oder ein Robotersystem integriert. Die Realisierung der Hubbewegung des Hammerkopfes erfolgt über eine Antriebsspindel der Werkzeugmaschine bzw. des Roboters. Verantwortlich dafür ist ein Taumelring, der die kontinuierliche Rotationsbewegung der Antriebsspindel in eine alternierende, lineare Hubbewegung des Hammerkopfes umwandelt. Über die Amplitude der Taumelbewegung und die Spindeldrehzahl können die Bearbeitungsparameter des Hämmerprozesses variiert werden. Dabei ist ein Frequenzbereich von 200 – 400 Hz und ein Hub zwischen 0 und 4 mm möglich. Nachteilig zu erwähnen ist die Masse solcher Aktoren, welche zwischen 21 und 30 kg liegt [7].

Elektromagnetisches System (DIP-MHP)

Das Wirkprinzip eines elektrodynamischen Aktorsystems beruht auf dem Prinzip der Änderung des magnetischen Widerstandes, der Reluktanz. Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Technologien handelt es sich bei diesem Aktorsystem um einen

geregelten Kurzhub-Linear-Aktor. Aufgrund der Steuerbarkeit des Aktors wird dieser als DIP-MHP-Aktor (deterministic impact peening) bezeichnet. Der Aktor besteht aus einem feststehenden Stator und einem beweglichen Läufer, wobei der Stator mit einer Spule versehen ist. In der Ausgangsposition befindet sich der Läufer mit einem axialen Versatz zum feststehenden Stator. Durch Anlegen einer Spannung wird ein Stromfluss erzeugt und ein Magnetfeld sowohl im Stator als auch im Läufer generiert. Aufgrund des Versatzes von Läufer zu Stator in der Ausgangsposition ist ein Maximum an magnetischem Widerstand und ein Minimum an Induktivität vorhanden, die zu der gewünschten Reluktanzkraft führt. Durch die generierte Reluktanzkraft bewegt sich der Läufer in Richtung Endposition, in der der Versatz zwischen Stator und Läufer minimal und die Überdeckung am größten wird. Dies entspricht in etwa dem Hub des Hammerkopfes. In der Endposition, bei vollständiger Überdeckung, ist schließlich der magnetische Widerstand minimal und die Induktivität maximal. Der Aufbau des DIP-MHP-Aktors sowie die Darstellung des magnetischen Flusses in der Ausgangs- und Endposition ist in Abbildung 6 ersichtlich [7].

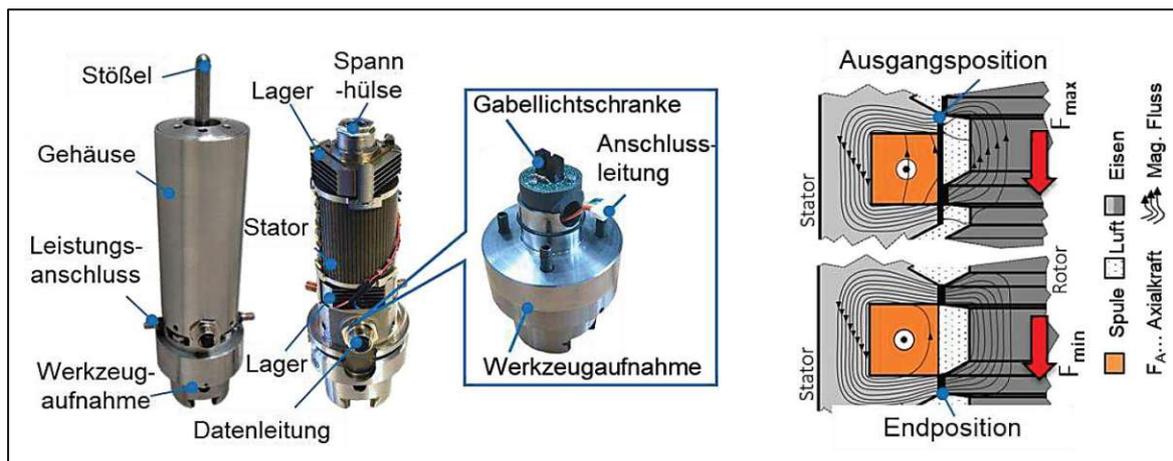


Abbildung 6: Aufbau des DIP-MHP-Aktors (links) und Darstellung des magnetischen Flusses in der Ausgangs- und Endposition (rechts) [7]

Eine Leistungselektronik sorgt für die Steuerung des Aktors und somit die Energieeinbringung in die Werkstückoberfläche. Für die Aufnahme der Messdaten und die Überwachung des Schlagprozesses dient eine integrierte Sensorik. Mit dem genannten DIP-MHP-Aktor ist ein Frequenzbereich von 1 – 1000 Hz realisierbar [7].

Gegenüberstellung der Technologien

Der Frequenzbereich als auch die eingebrachte, kinetische Energie in die Werkstückoberfläche sind bedeutsame Kennwerte eines Aktorssystems. Da diese von

der zugrundeliegenden Technologie des Aktors abhängen und stark variieren können, sind die genannten Hammersysteme in Abbildung 7 abgebildet und gegenübergestellt.

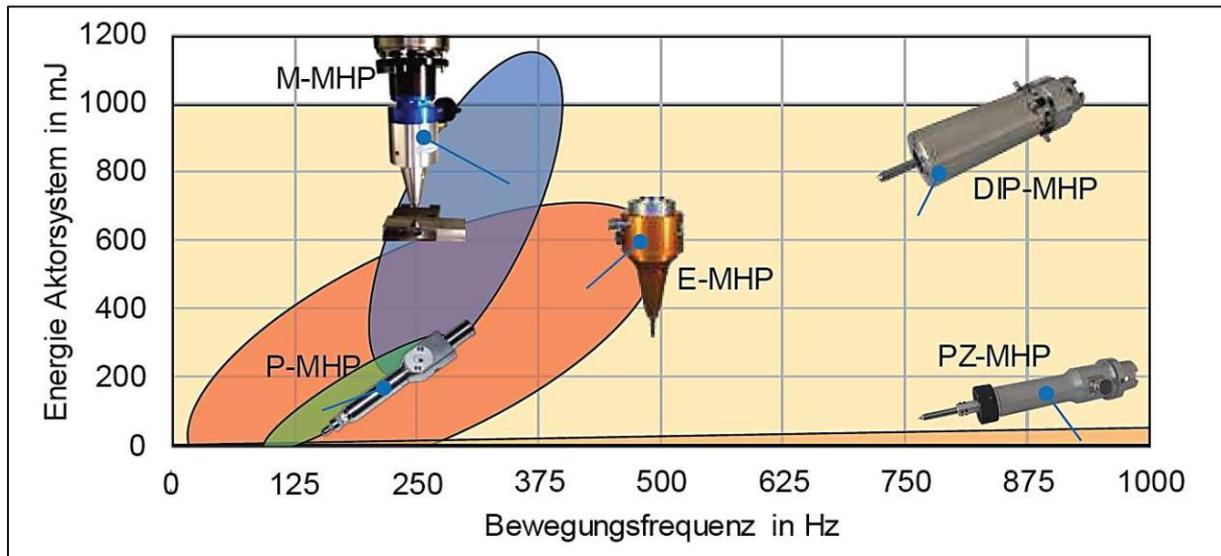


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Frequenzbereiche und der kinetischen Energie unterschiedlicher MHP-Systeme [7]

In Abbildung 7 ist zu erkennen, dass M-MHP-Systeme (blauer Bereich) den höchsten Energieeintrag liefern können. Begründet wird das durch die Baugröße und den entsprechend großen bewegten Massen des Aktors. Im Gegensatz dazu weist das P-MHP (grün) aufgrund der geringen Massen und des geringen Frequenzbereiches einen kleinen Arbeitsbereich auf. Bedingt durch einen großen Variationsbereich der Hämmerparameter kann das E-MHP (rot) hingegen in einem größeren Anwendungsbereich eingesetzt werden. Piezoelektrisch arbeitende Systeme (orange) decken aufgrund der kleinen, bewegten Massen einen geringen Bereich der Umformenergie ab, können jedoch über einen großen Frequenzbereich genutzt werden. Das DIP-MHP-System (gelb) ist über den gesamten, in Abbildung 7 dargestellten, Frequenzbereich einsetzbar und ermöglicht aufgrund der Beschleunigungsfähigkeit des Systems auch einen hohen Energieeintrag auf die Werkstückoberfläche. Möglich macht dies die Antriebseinheit, welche eine direkte Steuerung der Hammerkopfgeschwindigkeit zulässt und somit keine harmonische Schwingung erfordert [7].

3. Zielsetzung und methodische Vorgehensweise

Wie bereits eingangs erwähnt, findet das maschinelle Oberflächenhämmern seit vielen Jahren eine verbreitete Anwendung in der Bearbeitung von meist metallischen Werkstückoberflächen. Es haben sich mehrere Aktorsysteme mit unterschiedlichen Wirkprinzipien etabliert, die in ihrer Anwendung Vor- und Nachteile aufweisen. Die meisten Aktorsysteme sind schwingungserregt und ermöglichen deshalb keine gezielte Anpassung der Bewegungsschwankung der Maschine. Die Ausführung von Einzelschlägen für eine gezielte Oberflächenbearbeitung ist dadurch ebenfalls nicht realisierbar. Ein neuartiges Hammersystem am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien der TU Wien, welches auf dem Prinzip der Reluktanz basiert (DIP-MHP), ermöglicht eine Steuerung der einzelnen Schläge des Hämmerprozesses. Dieses System soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstmalig getestet und charakterisiert werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Verständnis über das Verhalten dieser Aktorik zu erlangen und mögliche Grenzen des Systems aufzuzeigen. Mithilfe einer Variation der Eingangsparameter wie zum Beispiel der Einschaltzeit, der Frequenz sowie des Abstandes von Aktor zu Werkstückoberfläche sollen die Kenngrößen des Systems bestimmt werden. Dabei werden das statische und dynamische Verhalten als auch die thermische Energieentwicklung untersucht. Weiters erfolgt eine Charakterisierung der Spule, welche sich im feststehenden Stator befindet. Mit der Ermittlung der Umformarbeit, welche der kinetischen Energie beim Auftreffen des Hammerkopfes auf die Werkstückoberfläche entspricht, sowie der Auswertung der verbleibenden Einschläge sollen Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit des Aktors getroffen werden.

Für die Umsetzung der genannten Zielsetzung ist es zunächst notwendig, Kenntnisse über den Aufbau und die Funktionsweise des Aktorsystems zu erlangen. Dafür soll in Kapitel 4 das System ausführlich erläutert und auf diverse Schwierigkeiten im Zusammenbau des Aktors hingewiesen werden. Ebenso ist die Beschreibung der dazugehörigen Sensorik, Elektronik und die für die Steuerung notwendige Bedienersoftware in diesem Kapitel angeführt. In einem zweiten Schritt wird das System in Kapitel 5 charakterisiert und experimentell untersucht. Mit den gewonnenen

Erkenntnissen wird die Aktorik in Kapitel 6 überarbeitet und weiterentwickelt. Im Anschluss daran wird der Aktor mit den eingearbeiteten Anpassungen erneut gefertigt, zusammengebaut und in Kapitel 7 einer neuerlichen Systemtestung unterzogen. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich zwischen der ursprünglichen und der überarbeiteten Aktorik und soll die positiven Auswirkungen der Anpassungen experimentell belegen. Abschließend werden die erzielten Erkenntnisse in Kapitel 8 zusammengefasst, die aufgetretenen Probleme aufgezeigt und Ansätze für die Weiterentwicklung des Aktorsystems gegeben.

4. Systembeschreibung

Jede Technologie des maschinellen Oberflächenhämmerns bedarf einer genauen Systembeschreibung, um die einzelnen Komponenten vorzustellen und ein Verständnis für das Funktionsprinzip zu erlangen. Das behandelte System in der vorliegenden Arbeit besteht aus den Komponenten DIP-System, Elektronik, Bedienersoftware, Trägersystem und Werkstück. Da der Fokus auf der Validierung und Charakterisierung des Aktors liegt und die Leistungsfähigkeit des Aktors nur unwesentlich von der Werkzeugmaschine als Trägersystem und dem Werkstück abhängt, werden in diesem Kapitel die ersten drei Komponenten des Systems erläutert. Eine Übersicht über alle für den Hämmerprozess erforderlichen Komponenten ist in Abbildung 8 gegeben sowie in Tabelle 1 beschrieben.

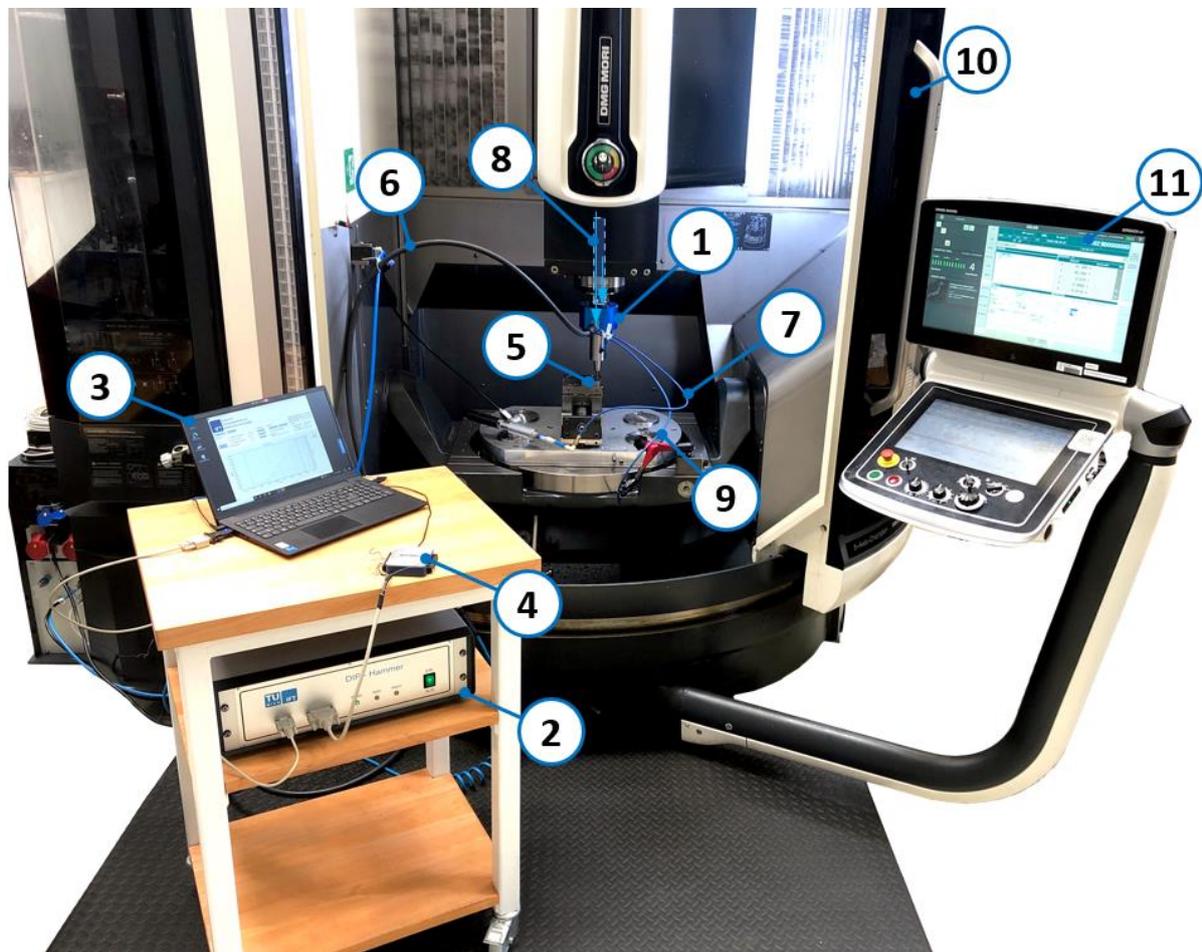


Abbildung 8: Übersicht über die für den Hämmerprozess notwendigen Komponenten - [12] modifiziert

Tabelle 1: Bezeichnung der für den Hämmerprozess notwendigen Komponenten - [12] modifiziert

Systemkomponenten	
(1) DIP - Aktor	(7) Eingang Druckluftschlauch
(2) DIP – Steuerung	(8) Eingang interne Flüssigkeitskühlung
(3) Steuerungsrechner mit DIP – Software	(9) Ausgang Flüssigkeitskühlung
(4) Datenerfassungskarte NI USB-6002	(10) Werkzeugmaschine
(5) Werkstück	(11) Werkzeugmaschinensteuerung
(6) Leistungs- und Datenleitung	

4.1. DIP-System

Das DIP-System umfasst die Gesamtheit der mechanischen und elektrischen Bauteile, die Sensorik sowie die Schnittstellen zur Werkzeugmaschine und der Steuerung.

4.1.1. Aufbau der Aktorik

Bei dem in diesem Kapitel beschriebenen Aktor handelt es sich um die Ausgangsvariante, die zum Stand der Übernahme im Februar 2023 noch keine Optimierungen erfahren hat. Der grundsätzliche Aufbau des untersuchten Aktors ist in Abbildung 9 dargestellt und mit den dazugehörigen Komponenten gekennzeichnet. Für eine bessere Übersicht wurde dabei entgegen der technischen Schnittdarstellung eine farbliche Abbildung gewählt.

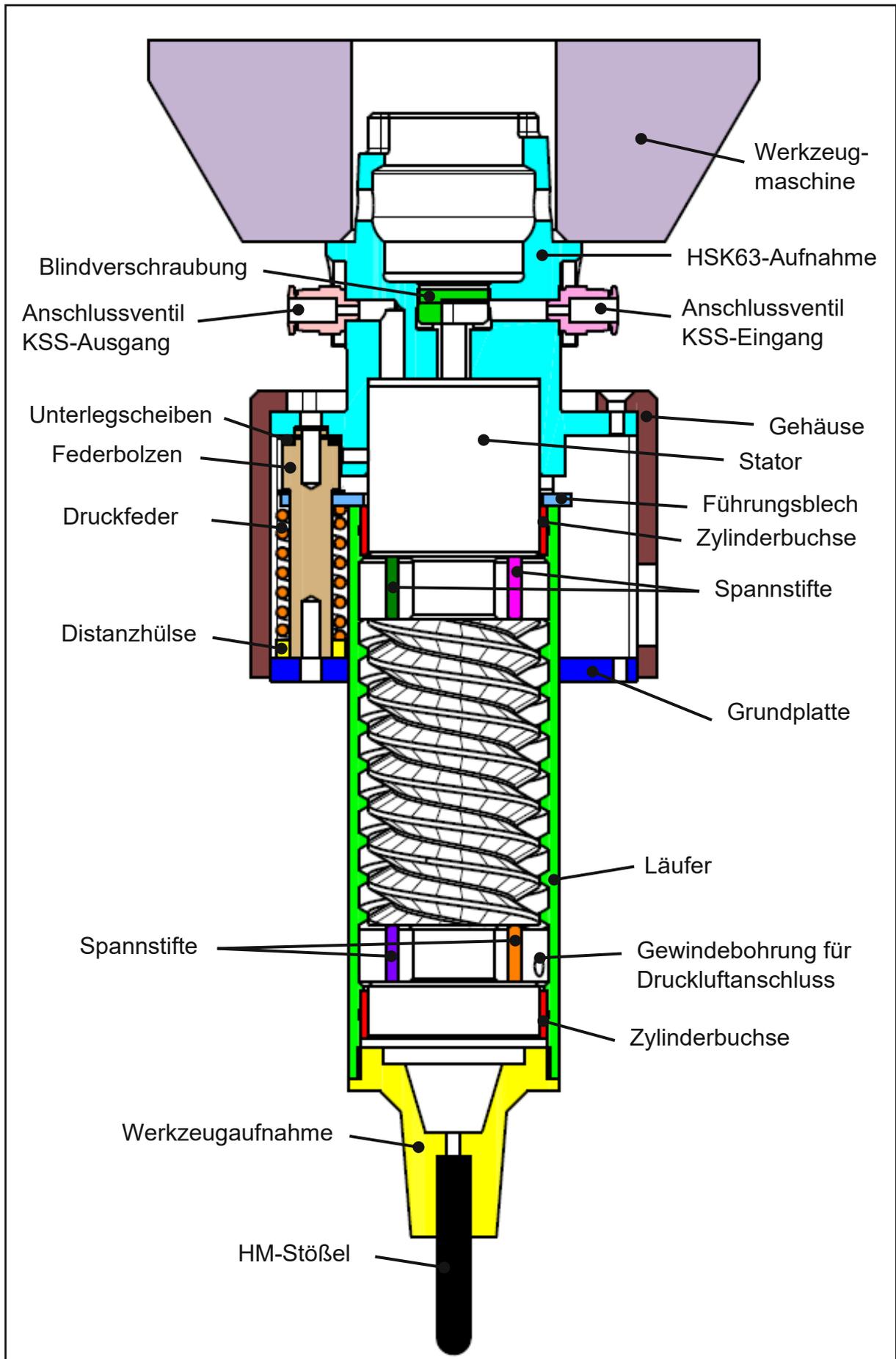


Abbildung 9: Schnittansicht des Aktors inkl. Bezeichnung der Komponenten

Wie bei den meisten Aktorsystemen und auch in der obigen Abbildung 9 zu erkennen, besteht ein Aktor aus einem beweglichen und einem feststehenden Teil. Die Definition des beweglichen und feststehenden Teils bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die Relativbewegung des Aktors selbst und nicht auf dessen Absolutbewegung in der Werkzeugmaschine. Der feststehende Teil wird in der Werkzeugmaschine eingespannt und von dieser in Position gehalten oder bewegt. Im Gegensatz dazu wird der bewegliche Teil über zwei Zylinderbuchsen axial geführt und durch die Linearfedern bzw. die Grundplatte begrenzt. Der Stator besteht aus zwei identischen Zylinderflächen, die einerseits dazu dienen, den Läufer axial zu führen und damit den gewünschten Hub zu ermöglichen und andererseits den Stator kraftschlüssig mit der HSK63-Aufnahme zu verbinden. Realisiert wird diese kraftschlüssige Verbindung mittels Übermaßpassung. In Abbildung 9 nicht dargestellt ist der Kupferdraht, welcher in das Statorgewinde gewickelt und an den Spannstiften umgelenkt wird. Eine weitere Übermaßpassung befindet sich zwischen Werkzeugaufnahme und Hartmetall-Stößel (HM-Stößel). Für die Kraftübertragung zwischen Aktor und Werkstückoberfläche sorgt ein zylindrischer HM-Stößel mit einem Durchmesser von 8mm, siehe Abbildung 9. Alle weiteren Komponenten werden mittels Schraubenverbindungen miteinander fixiert.

Wirkprinzip

Bei dem in der vorliegenden Arbeit untersuchten Aktor handelt es sich um einen DIP-MHP-Aktor. Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, entspricht dieser dem elektromagnetischen System und basiert auf dem Prinzip des magnetischen Widerstandes, der Reluktanz. In der Ausgangsposition befinden sich die Flanken von Stator und Läufer mit einer minimalen Überdeckung zueinander positioniert. Durch das Anlegen der Spannung wird ein Stromfluss erzeugt, der sowohl im Stator als auch im Läufer ein Magnetfeld generiert, siehe Abbildung 6 rechts. Aufgrund des Versatzes von Stator zu Läufer besteht ein hoher magnetischer Widerstand, welcher durch die axiale Bewegung des Läufers verringert wird. Befindet sich der Läufer schließlich in der Endposition, bei der Stator und Läufer auf gleicher Höhe stehen, wird der magnetische Widerstand und somit die axiale Kraftkomponente minimal. Nach dem Auftreffen des HM-Stößels auf die Werkstückoberfläche wird dieser einerseits durch dessen Rückstoß und andererseits durch die Druckfedern in die Ausgangsposition zurückbewegt.

Zusammenbau der Aktorik

Für den Zusammenbau der Aktorik wurden zuerst die Spannstifte in die dafür vorgesehenen Bohrungen des Stators platziert. Anschließend wurde der Stator für die kraftschlüssige Verbindung mit der HSK63-Aufnahme vorbereitet, indem dieser auf eine Temperatur von -10°C abgekühlt und zur selben Zeit die HSK63-Aufnahme auf eine Temperatur von 190°C erwärmt wurde. Durch diesen Temperaturunterschied von 200°C war es möglich, den Stator in die mit einer Übermaßpassung versehene HSK63-Aufnahme mit Hilfe einer handelsüblichen Handpresse einzupressen. Im Anschluss daran wurde auf das Gewinde des Stators ein hitzebeständiger Lack aufgetragen und die Spannstifte mit einem Isolierband ergänzt, um ein Beschädigen des Kupferdrahtes zu verhindern. Nach diesen Schritten erfolgte das Wickeln des Stators mit dem Kupferdraht. Da der Kupferdraht über das Gewinde von Statoranfang bis Statorende gelegt, an den Spannstifte umgeleitet und erneut über das Gewinde zurückgewickelt wurde, wurde der Stator mit einer sogenannten bifilaren Wicklung konstruiert. Aufgrund des anspruchsvollen Wickelvorgangs, bei dem der Stator mehrmals rotiert werden muss, wurde dieser in eine Drehmaschine eingespannt, um den Rotationsvorgang zu erleichtern. Während des Wickelvorgangs wurde der IC-Temperatursensor, der für die Überwachung der thermischen Entwicklung des Aktors verantwortlich ist, einerseits stoffschlüssig mit Hilfe einer Wärmeleitpaste und andererseits kraftschlüssig durch den Kupferdraht befestigt. Der in die HSK63-Aufnahme eingepresste und für den Wickelvorgang in die Drehmaschine eingespannte Stator ist in Abbildung 10 zu sehen.

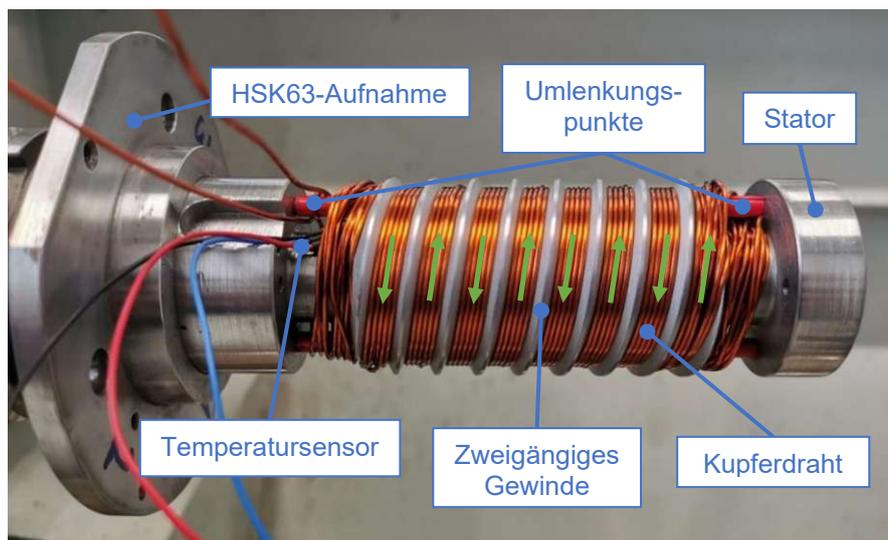


Abbildung 10: Mit Kupferdraht und integriertem Temperatursensor gewickelter Stator inkl. HSK63-Aufnahme – grüne Pfeile deuten die Wickelrichtung an

Aufgrund des begrenzten Platzangebotes an den Umwicklungspunkten der Spannstifte wurde eine maximale Anzahl von 15 Wicklungen bei einem Kupferdrahtdurchmesser von 1 mm ohne Isolierlack erreicht. Im nächsten Schritt wurde der Läufer mit den für die axiale Führung notwendigen Zylinderbuchsen verpresst. Da die Zylinderbuchsen vom Typ TEF-MET TFZ als geschlitzte Variante ausgeführt sind, konnten diese mit geringem Kraftaufwand und ohne thermische Behandlung eingepresst werden. Anschließend wurde die Werkzeugaufnahme, welche zu diesem Zeitpunkt noch ohne Bohrung für die Aufnahme des HM-Stößels ausgestattet war, mit dem Läufer verschraubt. Mit dem Anschrauben des Führungsblechs an die Unterseite des Läufers konnte die Vermessung der Flanken von Stator und Läufer durchgeführt werden, siehe nachfolgendes Unterkapitel „Vermessung“. Die ermittelte Differenz zwischen den Flanken von Stator und Läufer konnte anschließend mit Hilfe von Unterlegscheiben, welche zwischen der HSK63-Aufnahme und dem Führungsbolzen platziert sind, ausgeglichen werden. Die restlichen Komponenten konnten mit einfachen Schraubenverbindungen befestigt werden und erfordern keine nähere Beschreibung. Lediglich für die Aufnahme des HM-Stößels in die Werkzeugaufnahme war es erforderlich, den Rundlauf im Universalmessgerätes für Zerspanungswerkzeuge „Zoller smarTcheck 600“ zu überprüfen, um die gemessene Exzentrizität durch die Bohrung für den HM-Stößel auszugleichen. Da der HM-Stößel und die Werkzeugaufnahme ebenfalls kraftschlüssig über eine Übermaßpassung miteinander verbunden sind, musste für den Zusammenbau dieser zwei Komponenten die Werkzeugaufnahme auf eine Temperatur von 200 °C erhitzt werden. Abbildung 11 zeigt die äußeren Komponenten des Aktors, wobei das Gehäuse zur besseren Darstellung ausgeblendet ist.

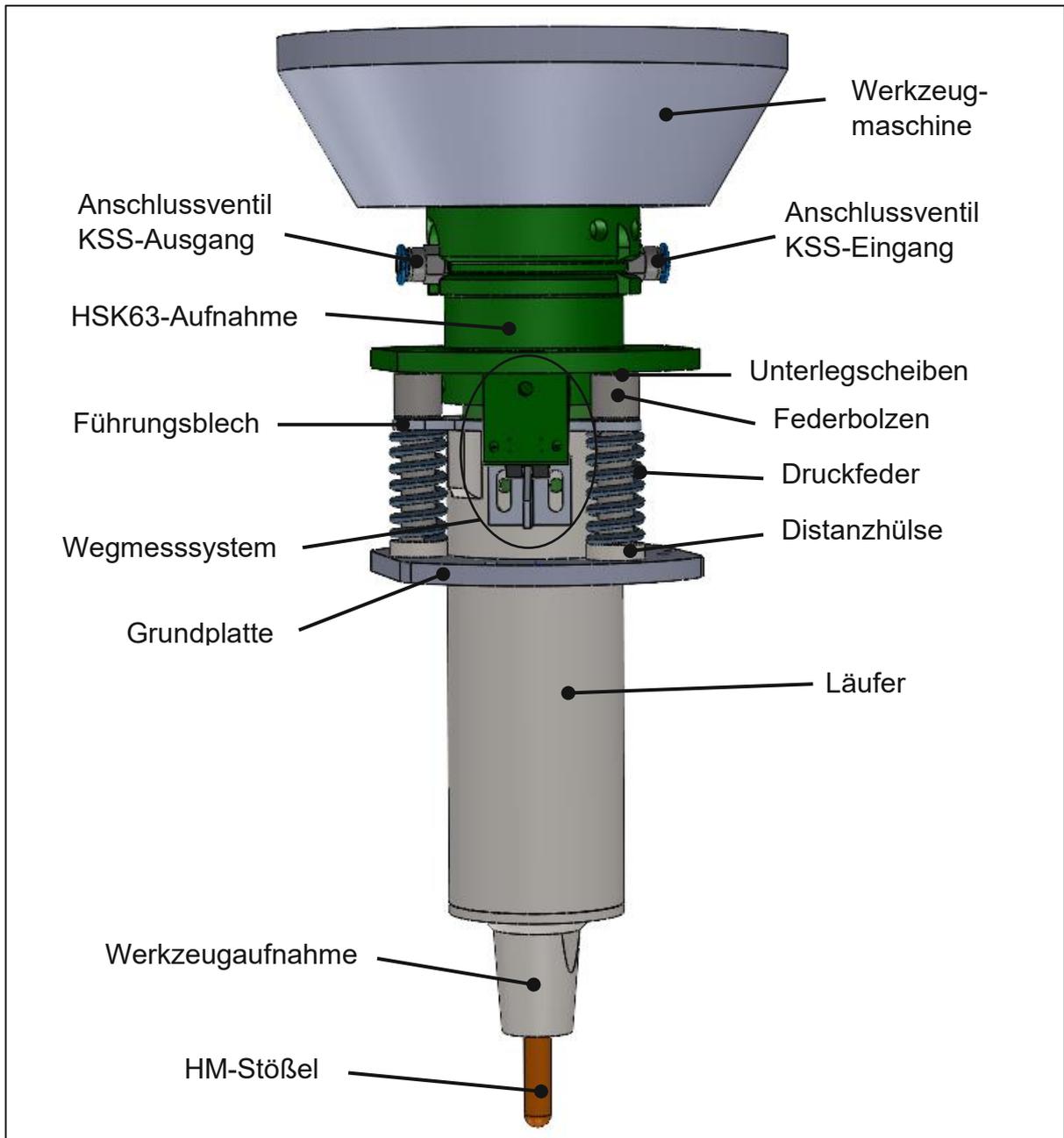


Abbildung 11: Darstellung der äußeren Komponenten des Aktors bei ausgeblendetem Gehäuse

Nach dem Zusammenbau aller Komponenten am Läufer, welcher den beweglichen Teil des Aktors darstellt, wurde die Masse mit 0,89 kg bestimmt. Diese hat einen großen Einfluss auf die erzeugte kinetische Energie, mit der der HM-Stößel auf die Werkstückoberfläche trifft und ist somit ein wesentlicher Faktor für die Leistungsfähigkeit des Aktors. Für das Zurückbewegen aller beweglichen Teile nach dem Auftreffen auf die Werkstückoberfläche in die Ausgangsposition sorgen drei Druckfedern mit einer Federrate von jeweils 34,15 N/mm, die parallel angeordnet und durch den Federbolzen geführt sind.

Einstellung der Läuferposition

Beim Zusammenbau des Aktors ist besonders darauf zu achten, dass die Höhe des Läufers an die Flanken des Stators angepasst ist. Der Anteil der Flanken von Stator und Läufer, der sich dabei überschneidet, wird als Überdeckung bezeichnet. Wie bereits in Kapitel 2.2 und Abbildung 6 erläutert, ist eine minimale Überdeckung in der Ausgangsposition eine Grundvoraussetzung für eine hohe Leistungsfähigkeit des Systems. Aufgrund dessen wird bei der Einstellung der Läuferposition eine Überdeckung zwischen 0,1 – 0,2 mm angestrebt, um ein Maximum der axialen Kraftkomponente F_A zu generieren, wie Abbildung 12 zeigt.

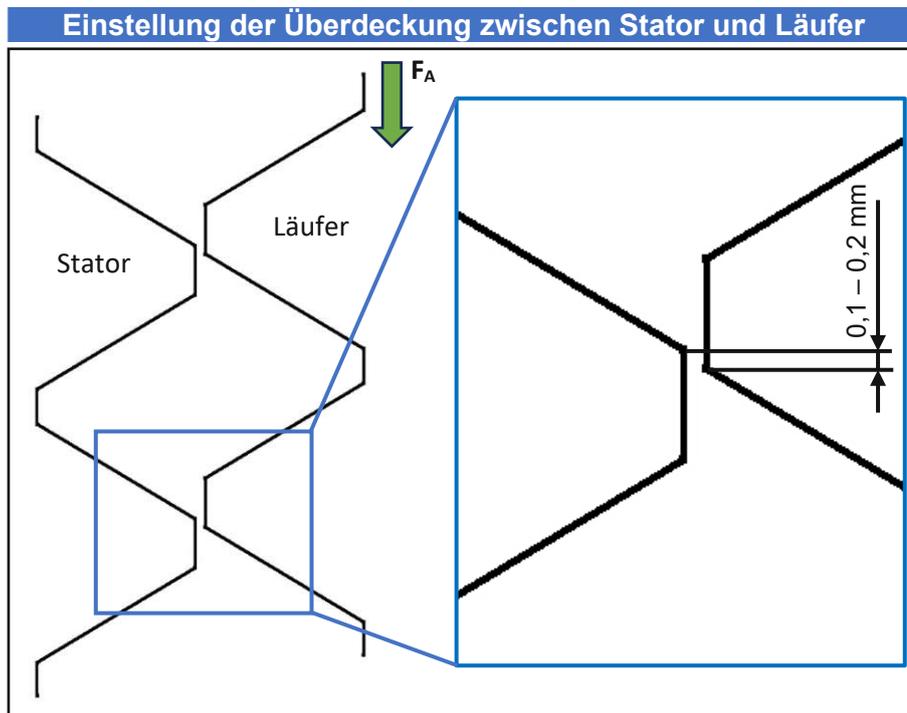


Abbildung 12: Ausgangsposition von Stator und Läufer mit einer Überdeckung von 0,1 - 0,2 mm

Da aufgrund fertigungstechnischer Abweichungen und Abweichungen im Zuge des Einpressens des Stators in die Aufnahme davon auszugehen ist, dass die Flankenübereinstimmung nicht exakt gegeben ist, müssen die jeweiligen Flanken mit geeigneten Messinstrumenten gemessen werden, um im Anschluss daran die Höhe des Läufers einstellen zu können.

Die Vermessung des Läufers hat sich, bedingt durch die Position der Flanken an der Innenseite und die dadurch erschwerte Sicht auf die Flanken, als sehr herausfordernd dargestellt. Hierfür wurde eine Silikonpaste auf den Flanken des Läufers aufgetragen und nach einer Einhärtzeit von zwei Minuten vom Läufer entfernt. Anschließend wurde anhand der Silikonpaste der Abstand von der Unterkante bis zur ersten Flanke

des Läufers mittels optischen Messgerätes ermittelt. Abbildung 13 zeigt die Messung mit eingezeichnetem Messwert der Silikonpaste mit Hilfe des verwendeten Messgerätes „Alicona Infinite Focus G5“.



Abbildung 13: Vermessung der Silikonpaste mit dem optischen Messgerät „Alicona Infinite Focus G5 Focus G5“

Der Stator als Gegenstück dazu wird mit Hilfe des Universalmessgerätes für Zerspanungswerkzeuge „Zoller smarTcheck 600“ auf derselben radialen Position von der Auflagerfläche bis zum Beginn der ersten Flanke vermessen, wie in Abbildung 14 zu sehen ist.

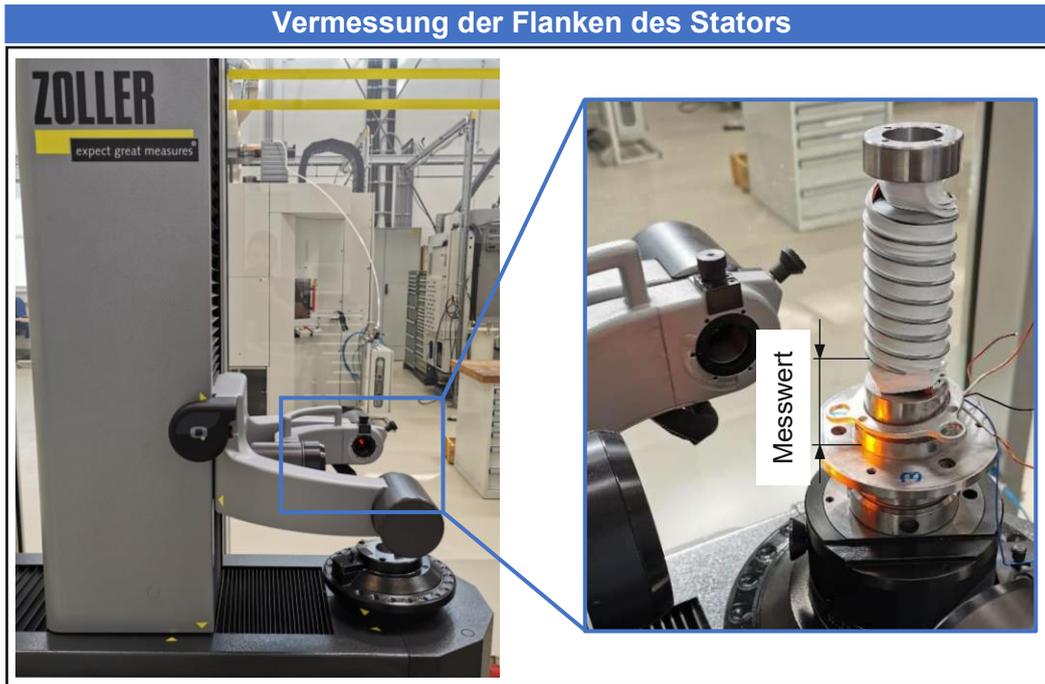


Abbildung 14: Vermessung der Flanken des Stators mittels Zoller smarTcheck 600

Mit diesen zwei ermittelten Messwerten kann nun der Läufer mit den entsprechenden Einstellscheiben unterlegt werden und die Höhe für die erforderliche Überdeckung der Flanken erreicht werden.

Wegmesssystem

Für die Erfassung der wegdiskreten Auslenkung des Läufers wurde ein eigens am IFT konzipiertes Wegmesssystem verwendet, welches in Kapitel 4.1.3 genauer erläutert wird. Die dafür notwendigen Komponenten sind in Abbildung 15 ersichtlich.

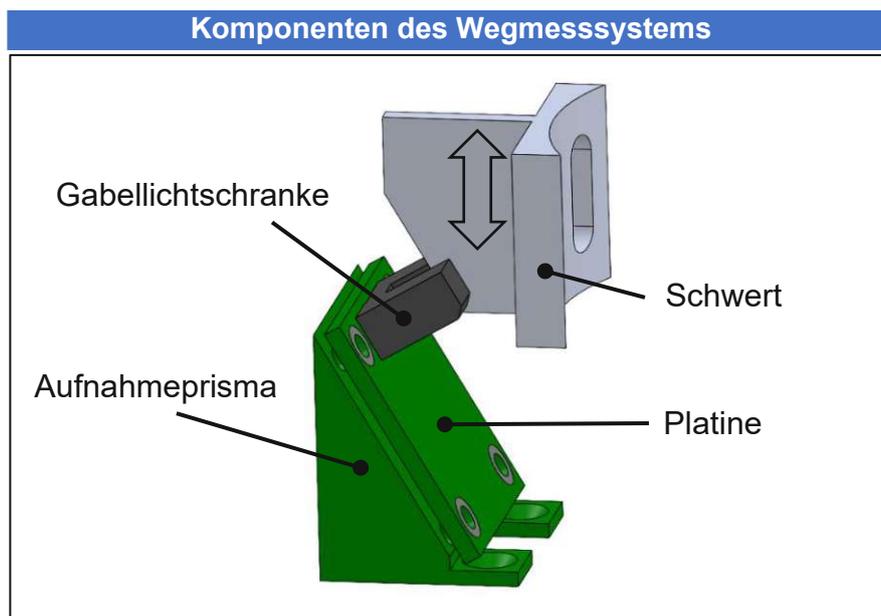


Abbildung 15: Darstellung der Komponenten des Wegmesssystems

Die Platine ist dabei mit der Gabellichtschränke mittels Lötverbindung befestigt und mit dem Aufnahmeprisma verschraubt. Diese drei Komponenten werden mit Senkschrauben mit der HSK63-Aufnahme verbunden und bilden den feststehenden Teil des Wegmesssystems. Im Gegensatz dazu wird das Schwert mittels Schraubenverbindung an den Läufer angebracht und stellt somit die bewegliche Komponente dar.

Kühlsystem

Um der thermischen Energieentwicklung des Systems entgegenzuwirken, wurde ein Kühlsystem in die Aktorik implementiert. Als Kühlmedium wird einerseits Druckluft und andererseits der in einer Werkzeugmaschine bereits vorhandene Kühlschmierstoff (KSS) verwendet. Abhängig von diesen zwei Kühlmedien stehen zwei separate Kühlkreisläufe zur Verfügung. Die Druckluft wird über ein Pneumatikventil am Läufer eingebracht und läuft an den Flanken von Stator und Läufer vorbei, bis sie durch die Entlüftungsbohrungen in der Grundplatte wieder entweicht. Der Verlauf der Druckluft ist in Abbildung 16 links dargestellt. Für die Kühlung mittels KSS stehen zwei Kreisläufe zur Verfügung, welche sich in der Art der KSS-Zufuhr unterscheiden. Wird der Kühlschmierstoff über eine externe Pumpe bereitgestellt (Option I), erfolgt der Zulauf über eine in der HSK63-Aufnahme montierte Steckkupplung, siehe Abbildung 16 mittig. Für die Umleitung in den Kühlkanal nach unten und die Bewerkstelligung der Dichtheit in die Werkzeugmaschine nach oben sorgt eine spezielle Verschlusschraube. Als zweite Variante (Option II) wird der KSS über die Innenkühlung der Werkzeugmaschine direkt durch die Werkzeugmaschinenspindel generiert, wie in Abbildung 16 rechts ersichtlich ist. Dafür ist es jedoch notwendig, die Verschlusschraube (Option I) durch ein Übergaberohr zu ersetzen und die Steckkupplung mit einem Blindstopfen zu schließen.

Kühlkreisläufe des Aktors

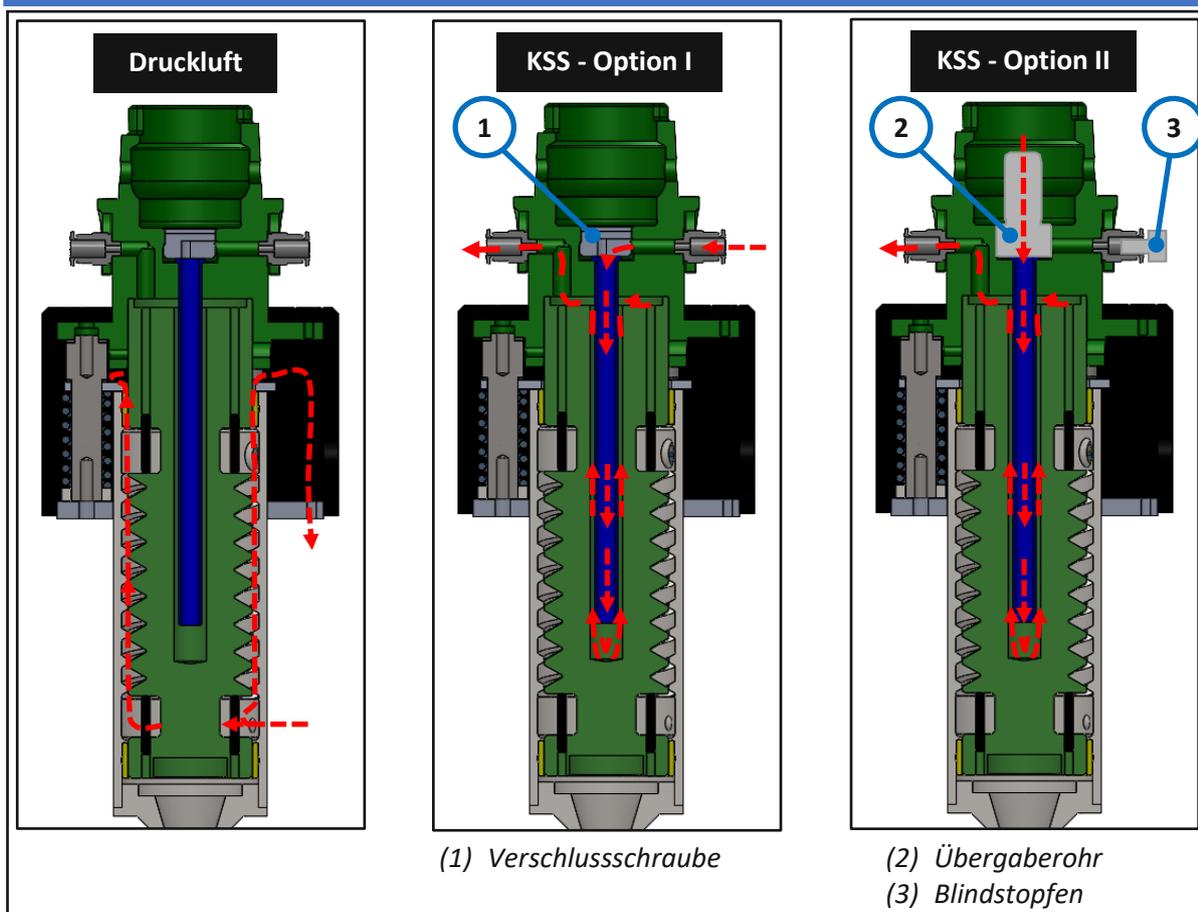


Abbildung 16: Darstellung der Kühlkreisläufe mittels Druckluft (links) und Kühlschmierstoff über eine externe Pumpe (mittig) und die Innenkühlung der Werkzeugmaschine (rechts)

4.1.2. Schnittstellen

Die Schnittstellen des Aktorsystems untergliedern sich in eine mechanische und elektrische Schnittstelle, wie dies in Abbildung 8 zu sehen ist. Die mechanische Schnittstelle beschreibt dabei die Anbindung des Aktors an das Maschinensystem, welche im vorliegenden Fall mit einer Standard-Maschinenanbindung vom Typ HSK63 ausgeführt wird. Die elektrische Schnittstelle hingegen wird als Leistungs- und Datenleitung zwischen Aktor und DIP-Steuerung realisiert. Bei dieser Verbindungsleitung handelt es sich um eine vorkonfektionierte Hybridleitung der Firma Beckhoff Automation GmbH & Co. KG mit einer Baugröße von B23. Diese dient einerseits der Übertragung der gemessenen Daten der Sensoren im Aktor (Kapitel 4.1.3) und andererseits dem Transport der von der DIP-Steuerung (Kapitel 4.2) bereitgestellten Leistung an die Aktorik. Dafür werden sowohl die Leitungen ausgehend von der Platine als auch der Kupferdraht der Spule mit dem Stecker

stoffschlüssig über Lötverbindungen miteinander verbunden. Klemm- oder Steckverbindungen konnten aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse im Gehäuse nicht verwendet werden. Die Hybridleitung, angeschlossenen an das Gehäuse der Aktorik und dargestellt im Querschnitt, sowie die Anschlüsse und Leitungen für den Kühlschmierstoff und die Druckluft sind in Abbildung 17 ersichtlich [13]. Eine genaue Zuordnung der Kontaktbelegung der Hybridleitung am Aktor ist im Anhang 12 zu finden.

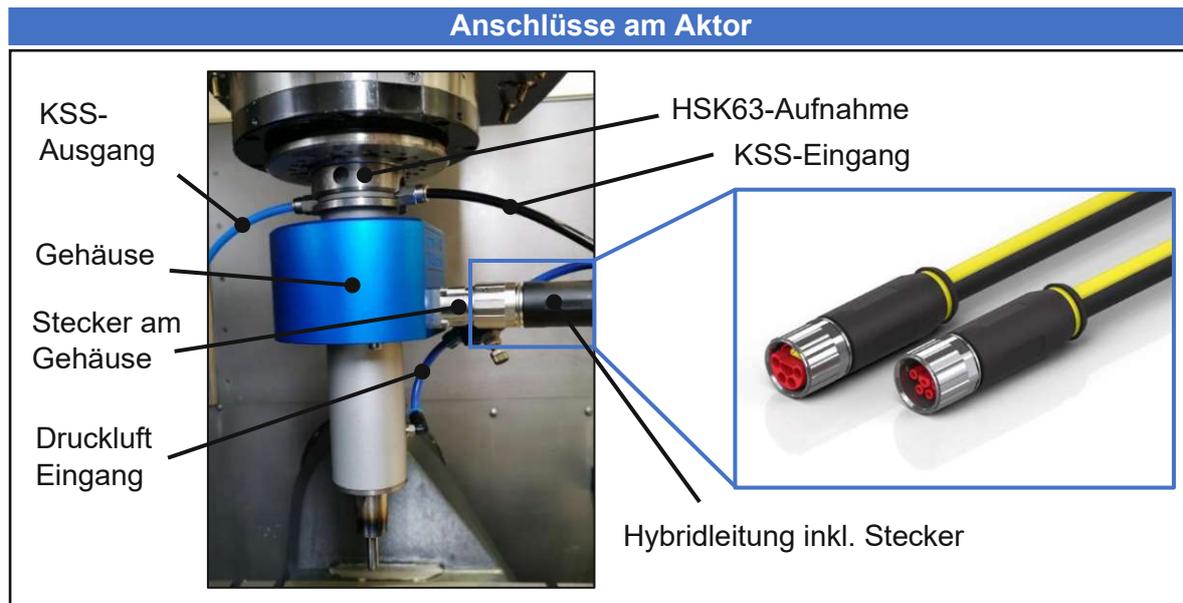


Abbildung 17: Schnittstellen des Aktors – vorkonfektionierte Hybridleitung, KSS-Eingang und -Ausgang sowie Druckluft-Eingang [13]

4.1.3. Sensorik

Um den Aktor und dessen Verhalten in unterschiedlichen Belastungssituationen charakterisieren zu können, sind mehrere Messsysteme zur Datenerfassung in der Aktorik verbaut. Das bereits in Abbildung 15 vorgestellte Wegmesssystem sowie der Temperatursensor werden in diesem Unterkapitel erläutert.

Wegmesssystem

Für die Dokumentation der Bewegungsdaten des Läufers enthält der Aktor ein eigenes vom IFT der TU Wien konzipiertes Wegmesssystem. Dieses besteht aus einem photoelektrischen Detektor, welcher auf dem Prinzip der Gabellichtschranke (eng. forked light barrier) basiert. Das dafür am Läufer montierte Schwert taucht dabei in die Gabellichtschranke ein und liefert ein der Läuferposition proportionales, analoges Ausgangssignal zwischen 0 und 10 Volt. Voraussetzung dafür ist die Position des Schwertes in der Gabellichtschranke, welche sich im linearen Messbereich befinden

muss. Zusätzlich muss für die Kalibrierung des Wegmesssystems ein Umrechnungsfaktor für die Umrechnung zwischen Spannung und Weg messtechnisch bestimmt werden. Mit der anschließenden Anwendung der Gleichung (10) kann das dem gemessenen Weg proportionale Ausgangssignal, welches in der Einheit Volt ausgegeben wird, in die gewünschte Längeneinheit umgerechnet werden [12].

Temperatursensor

Für die Überwachung der thermischen Energieentwicklung des Systems sorgt ein Temperatursensor-IC im TO-92-3 Gehäuse. Wie bereits erwähnt, wird dieser beim Wickeln der Spule direkt unter dem Kupferdraht platziert (siehe Abbildung 10), um die Temperatur direkt an der wärmeerzeugenden Quelle zu messen. Die Messgröße Temperatur wird dabei in eine analoge Ausgangsspannung konvertiert. Aufgrund des verwendeten Typs der „linear active thermistor integrated circuits“ wird keine zusätzliche Elektronik für die Konditionierung des Ausgangssignals benötigt. Ein weiterer Vorteil dieses Temperatursensors ist die kleine Bauweise, welche sich für die begrenzten Platzverhältnisse beim Einbau besonders gut eignet. Der Arbeitsbereich des Temperatursensor liegt bei einer Ausgangsspannung zwischen 0 und 5 V und einer maximalen Temperatur von 150 °C. Um ein Überhitzen des Systems und in weiterer Folge beschädigen des Temperatursensors zu verhindern, wird in der Elektronik eine Maximaltemperatur von 125°C hinterlegt, bei der das System abschaltet [12].

4.2. Elektronik

Die für die Funktion des Aktors erforderliche elektrische Leistung wird mittels der Elektronik, welche auch als DIP-Steuerung bezeichnet wird, bereitgestellt, siehe Abbildung 8 Systemkomponente 2. Für die Erzeugung des Stromflusses wird eine Arbeitsspannung von 60 Volt DC über ein Schaltnetzteil mit AC-Eingang generiert, womit eine Ausgangsspannung mit einer Leistung bis 1,5 kW möglich ist. Grundsätzlich ist bei diesem Typ sowohl die Ausgangsspannung als auch der maximale Ausgangsstrom programmierbar. Um die Ausgangsspannung bei Stromspitzen, die über den Nennstrom des Schaltnetztes hinausgehen, zu stützen, wird eine Kondensatorbank als Energiespeicher verwendet. Aufgrund der zulässigen Betriebsart „constant current“ toleriert das Schaltnetzteil den kurzzeitigen Spannungsabfall und versorgt die Kondensatorbank so lange mit Strom, bis die

programmierte Ausgangsspannung in der Betriebsart „constant voltage“ erneuert wird. Zusätzlich zur generierten Ausgangsspannung von 60 V stellt das Schaltnetzteil weitere 5 V galvanisch getrennte Hilfsspannung zur Verfügung, die für die Steuerung eines Mikrokontrollers verwendet werden kann [12].

Die Erfassung der Stromstärke wird dabei mit einem Stromsensor realisiert, der in der Elektronik implementiert ist. Jeder einzelne Hub des Läufers wird verursacht durch das Anlegen einer Spannung und die daraus resultierende Generierung eines Stromflusses. Durch diesen Stromfluss wird ein Magnetfeld erzeugt, das für die Bewegung des Läufers verantwortlich ist. Um die Stromstärke bei unterschiedlichen Bearbeitungsparametern zu überwachen, dient ein „current transducer“, welcher nach dem Prinzip des Hall Effekts arbeitet. Dieser ermöglicht Messungen von Stromstärken bis zu 150 A und Gleichspannungen bis 50 kHz, wobei die step response time unter 5 μ s liegt. Wie bereits das Wegmesssystem, liefert auch der Stromsensor ein analoges, dem primären Strom proportionales Ausgangssignal in der Einheit Volt, welches mit der Gleichung (1) in die Einheit Ampere umgerechnet werden kann. Außerdem bietet der Sensor eine galvanische Trennung zwischen dem primären und sekundären Stromkreis [12].

$$I = \frac{(I_{gem} - 2,5)}{0,0125} \quad (1)$$

Dabei entspricht I der ermittelten Stromstärke in der Einheit Ampere und I_{gem} dem primären Strom proportionalen Ausgangssignal in der Einheit Volt.

Die Verbindung zwischen Elektronik und Aktor erfolgt an der Rückseite der DIP-Steuerung mittels Leistungs- und Datenleitung (Kapitel 4.1.2). An der Frontplatte der Elektronik befinden sich zwei weitere Schnittstellen, LED-Anzeigeelemente und der Hauptschalter, wie dies in Abbildung 18 zu sehen ist.

Frontplatte der DIP-Steuerung

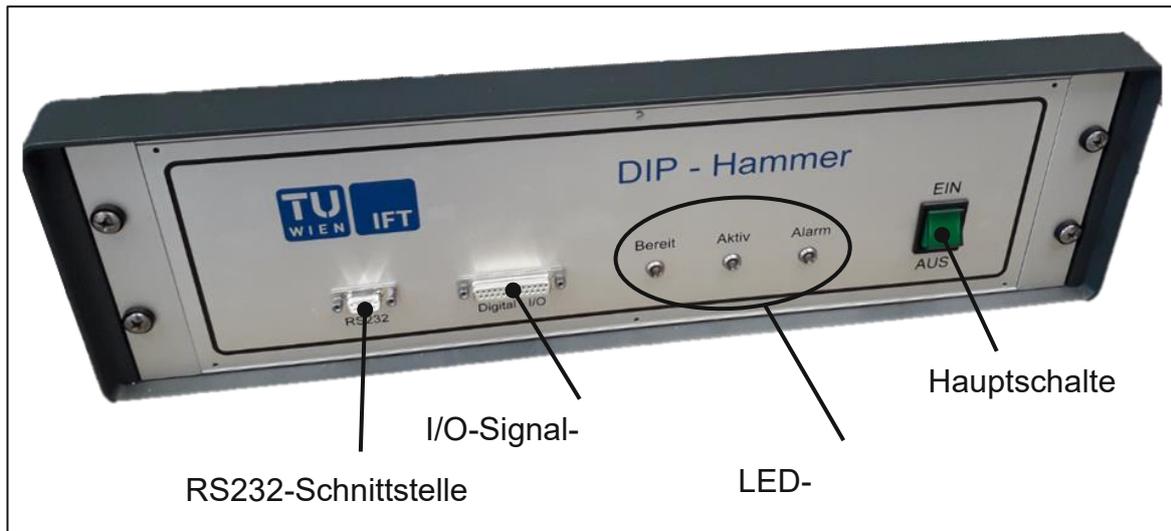


Abbildung 18: Komponenten der Frontplatte der DIP-Steuerung

Bei der RS232-Schnittstelle handelt es sich um eine Kommunikationsschnittstelle vom Typ V24, über die das DIP-System parametrierbar werden kann. Die dabei übertragenen Parameter definieren die Schlagenergie und die Schlagfrequenz. Die physische Verbindung erfolgt über eine 9-polige DSUB-Buchse mit Standardbelegung durch die Signale Tx (Output), Rx (Input) und GND (ground). Zusätzlich zur Parametrierung des Systems können über die Kommunikationsschnittstelle auch Aktionen definiert und ausgelöst werden. Zu diesen zählen Einzelschläge sowie das Starten und Beenden von Schlagserien, wie im folgenden Kapitel 4.3 näher beschrieben ist.

Bei der I/O-Signal-Schnittstelle handelt es sich um digitale Ein- und Ausgänge, die galvanisch durch einen Optokoppler isoliert sind. Der zulässige Signalpegel ist auf 24V ausgelegt, bleibt jedoch beim Unterschreiten bis etwa 12 V funktionsfähig. Die Ausgangssignale dieser Schnittstelle dienen der Information der Systembereitschaft für die Ausführung von Schlägen als auch der Fehlererkennung. Eine 25-polige DSUB-Buchse sorgt für die Verbindung an der Vorderseite der DIP-Steuerung.

Über die LED-Anzeigeelemente in Abbildung 18 werden dem Bediener der DIP-Steuerung die Betriebsbereitschaft des Systems (Bereit), die Ausführung eines Einzelschlages bzw. einer Schlagserie (Aktiv) oder eine Fehlermeldung (Alarm) angezeigt [12].

4.3. Bedienersoftware

Für die Steuerung des Hämmerprozesses steht eine eigens am IFT entwickelte Bedienersoftware zur Verfügung. Diese dient einerseits zur Überwachung des Systems hinsichtlich der Temperaturentwicklung und andererseits zur Parametrierung durch den Anwender. Für die Parametrierung sorgt dabei eine Kommunikationsschnittstelle nach V24/RS232, wohingegen der Temperatursensor die Wärmeentwicklung überwacht. Die Bedienersoftware ermöglicht es dem Anwender, die Einschaltzeit und die Frequenz zu variieren sowie einen Einzelschlag oder eine Schlagserie auszuführen. Weiters kann über die Bedienersoftware eine Messung der Weg- und Stromdaten über die Zeit aufgezeichnet und für eine anschließende Analyse aufgerufen werden. Abbildung 19 zeigt die Bedienersoftware mit der voreingestellten Konfiguration.

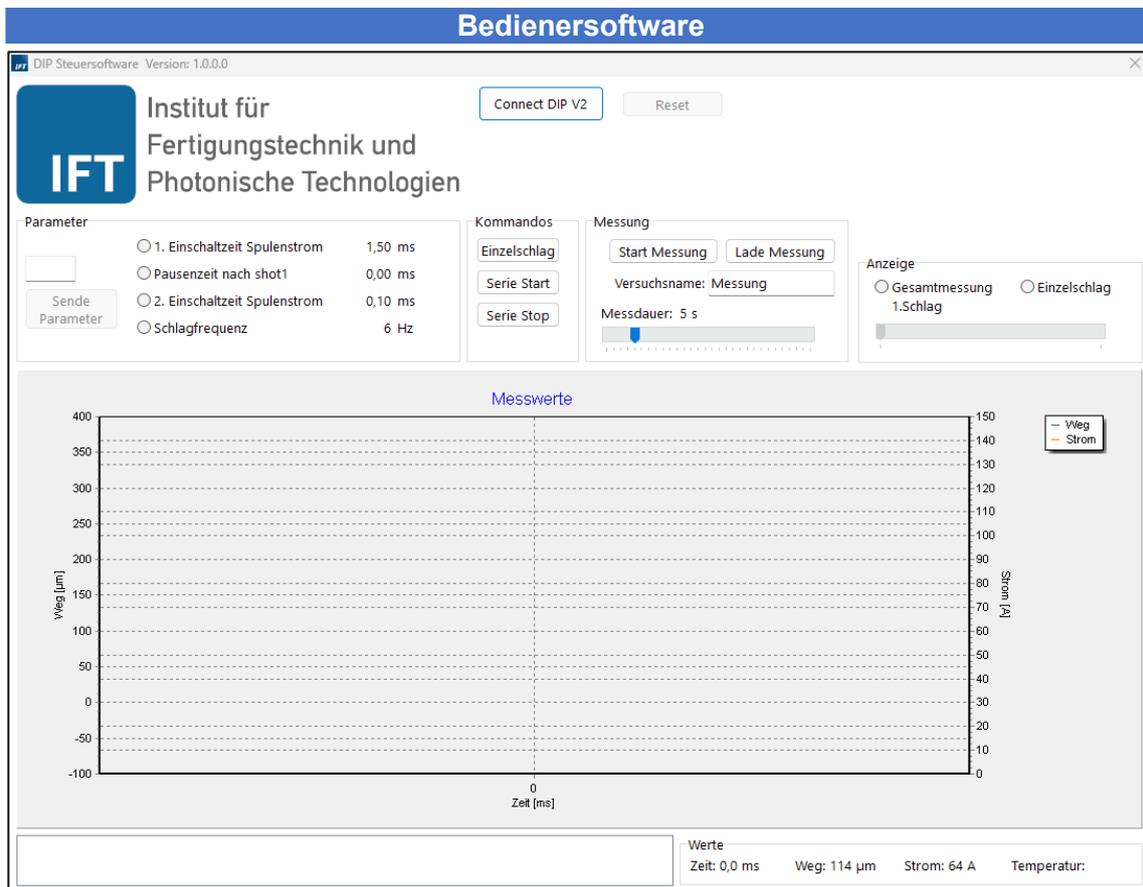


Abbildung 19: Bedienersoftware zur Überwachung und Parametrierung des Hämmerprozesses

Die Aktivierung der Bedienersoftware und die Herstellung einer Verbindung zum Aktor erfolgt über den Button „Connect DIP V2“. Mit der Funktion „Reset“ können alle Parameter auf die Konfigurationseinstellung zurückgesetzt werden. Um die Parametereinstellungen zu ändern, wird der entsprechende Parameter ausgewählt

und der gewünschte Wert mit dem Button „Sende Parameter“ übermittelt. Wie in Abbildung 19 zu sehen ist, gibt es eine Differenzierung zwischen erster und zweiter Einschaltzeit mit dazwischenliegender Pausenzeit. Bei genauer Kenntnis der Schlagdauer und dem Werkstückabstand kann dies dafür genutzt werden, mittels zweiter Einschaltzeit und definierter Pausenzeit den Rückprall des HM-Stößels in der Ausgangsposition abzdämpfen. Im Reiter „Kommandos“ können sowohl Einzelschläge als auch Schlagserien mit den zuvor definierten Parametern gestartet und gestoppt werden. Um solche Einzelschläge oder Schlagserien zu dokumentieren, kann mit Hilfe des Buttons „Start Messung“ ein Schlagprozess in einem Zeitbereich von 1 – 30 Sekunden aufgezeichnet werden. Die Analyse der letzten Messung erfolgt automatisch nach dem Ende der Messdauer, wohingegen andere Messungen aus dem hinterlegten Ordner aufgerufen werden können. Analysiert werden kann sowohl die gesamte Messung, die der definierten Aufnahmedauer entspricht, als auch jeder Einzelschlag aus der Gesamtmessung. Die Darstellung eines Einzelschlages mit einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einem Werkstückabstand von 0,3 mm ist in Abbildung 20 ersichtlich.

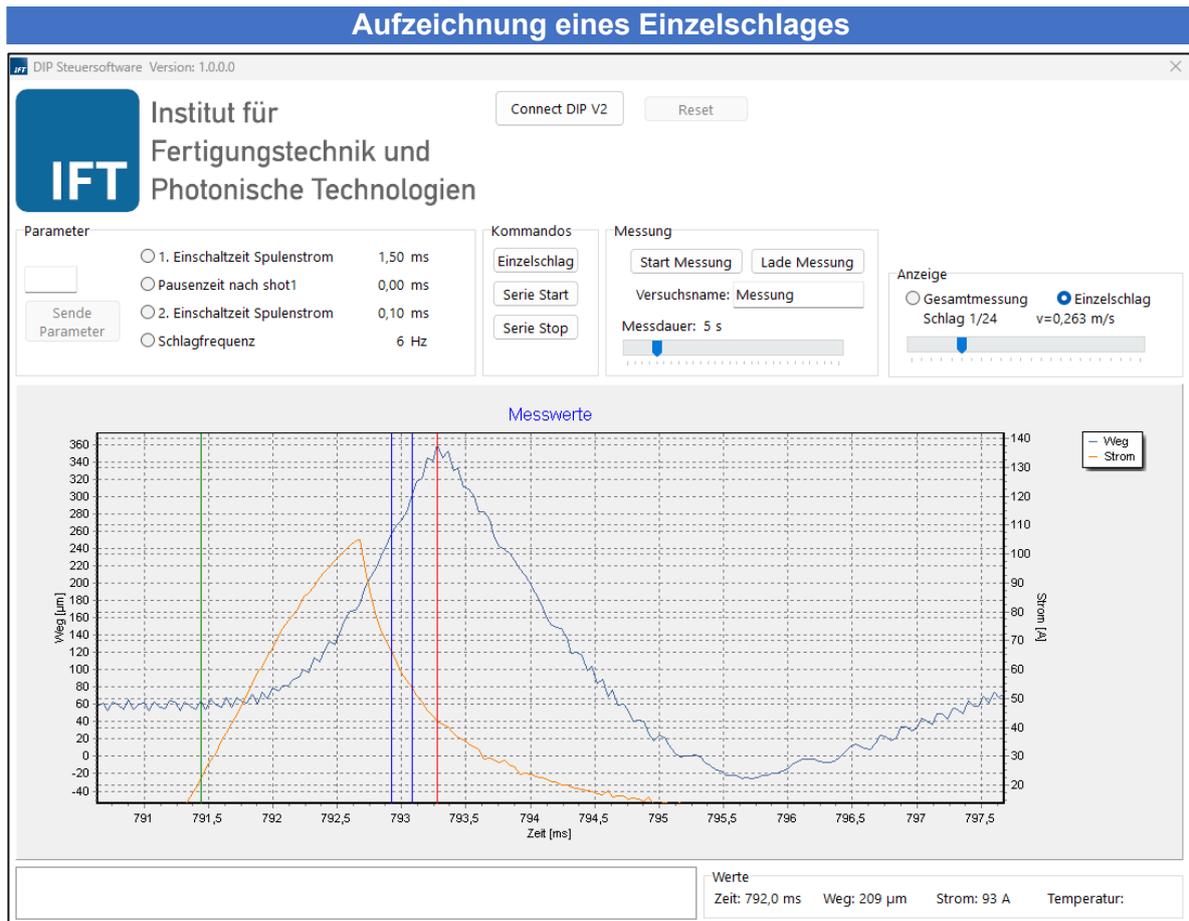


Abbildung 20: Bedienersoftware - Analyse eines mit einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einem Werkstückabstand von 0,3 mm aufgezeichnetem Einzschlages

Aufgezeichnet wird der Weg in μm (blau) und die Stromstärke in A (orange) auf der Ordinate sowie die Zeit in ms auf der Abszisse. Weiters wird der Zeitpunkt vom Start des Schlages (grüne vertikale Linie) bis zum Auftreffen auf der Werkstückoberfläche (rote vertikale Linie) ausgegeben. Die Geschwindigkeit kurz vor dem Schlag des HM-Stößels auf das Werkstück wird über das Steigungsdreieck der beiden blauen vertikalen Linien errechnet und im Reiter „Anzeige“ angegeben. Die zur Überwachung des Hämmerprozesses essenzielle Temperaturanzeige ist im Reiter „Werte“ zu sehen. Aufgrund der fehlenden Verbindung zum Aktor ist jedoch in Abbildung 20 kein Temperaturwert angegeben.

5. Systemtestung der bestehenden Aktorik

Um das in Kapitel 4 beschriebene Aktorsystem zu charakterisieren und Kenntnisse über das Verhalten der Aktorik bei variierenden Eingangsparametern zu erlangen, wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt und in diesem Kapitel beschrieben. Betrachtet und eruiert werden dabei die Charakterisierung der Spuleneigenschaften, die Kräfte in statischen und dynamischen Versuchen sowie das Temperaturverhalten bei unterschiedlichen Bearbeitungsparametern.

Als Ergebnis sollen Kenntnisse über das Systemverhalten gewonnen werden und in Verbesserungen des Systems resultieren, siehe Kapitel 6.

5.1. Spulencharakterisierung

Spannung und Stromstärke

Um einen Stromfluss erzeugen zu können, der für die Realisierung des magnetischen Flusses und in weiterer Folge für den axialen Hub des Läufers verantwortlich ist, wird eine Gleichspannung von 60 V für eine definierte Zeitspanne angelegt. Des Weiteren gibt die Frequenz die Häufigkeit des „Anlegens“ der Spannung pro Sekunde wieder und die Einschaltzeit definiert die Zeit, in der die Spannung angelegt ist und es dadurch zum Stromfluss kommt. In der folgenden Abbildung 21 ist dieser Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke für eine Frequenz von 200 Hz und einer Einschaltzeit von 1,5 ms dargestellt.

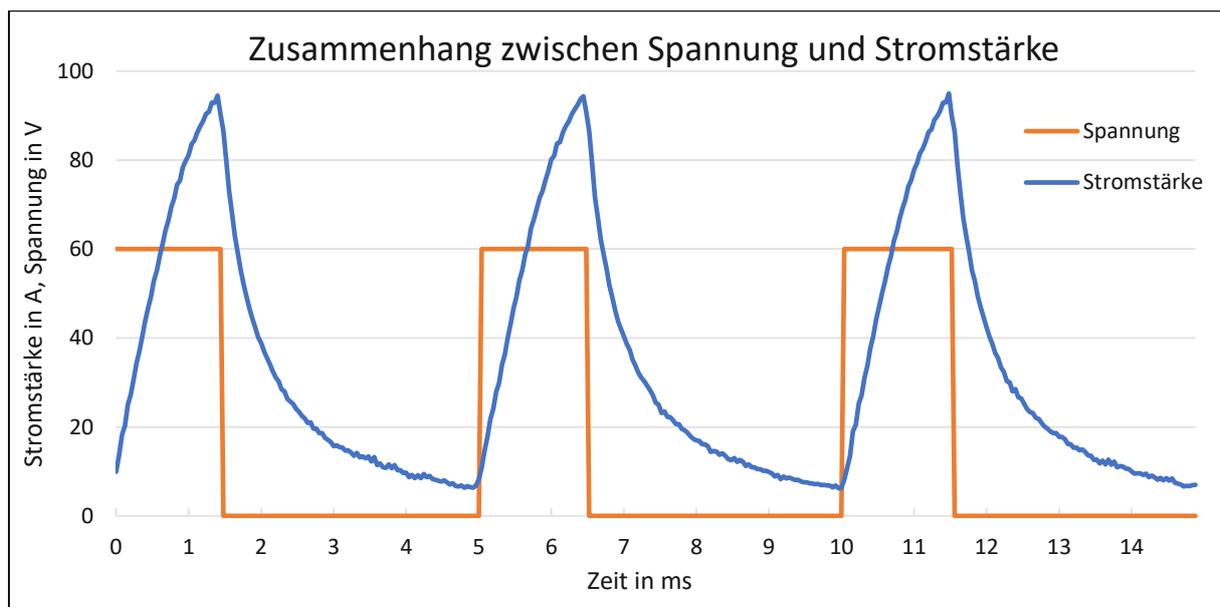


Abbildung 21: Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke bei einer Frequenz von 200 Hz und einer Einschaltzeit von 1,5 ms

Wie in der Abbildung 21 erkennbar ist, ergibt sich für die Gleichspannung ein Rechteckssignal zwischen 0 und 60 V, welches mit den genannten Parametern zu einem Strompeak von 95 A führt. Ebenso zeigt sich der kontinuierliche Anstieg der Stromstärke bei angelegter Spannung, welcher jeweils am Ende der Einschaltzeit nach 1,5 ms das Maximum erreicht und bis zum nächsten Anlegen der Spannung wieder annähernd an das Ausgangsniveau absinkt.

Widerstand

Wie bereits in Kapitel 4.1.1 erwähnt, wurde der Stator für die Wicklung des Kupferdrahtes zur Spule mit einem zweigängigen Gewinde konzipiert. Um ein möglichst großes Magnetfeld und somit eine große axiale Kraft erzeugen zu können, wurde mit einem Kupferdrahtdurchmesser von 1 mm die maximale Anzahl an Wicklungen mit 15 erreicht. Mit der sich daraus ergebenden Kupferdrahtlänge von 16,5m wird mit den Gleichungen (2) und (3) der elektrische Widerstand berechnet und das Ergebnis in Tabelle 2 zusammengefasst.

$$A = \frac{d^2 * \pi}{4} \quad (2)$$

$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (3)$$

Tabelle 2: Berechnung des elektrischen Widerstandes der gewickelten Spule

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Anzahl der Wicklungen	n	15	-
Kupferdraht-Durchmesser	d	1	mm
Kupferdraht-Querschnittsfläche	A	0,785	mm ²
Kupferdraht-Länge	L	16,5	m
Spezifische Widerstand von Kupfer bei 20°C	ρ	0,0174	Ω*mm ² /m
Elektrischer Widerstand der Spule bei 20°C	R	0,366	Ω

Der theoretische elektrische Widerstand der Spule bei einer Temperatur von 20°C ergibt sich zu 0,366 Ω. Bei experimentellen Messungen mit einem Multimeter bei Raumtemperatur (RT) konnte ein elektrischer Widerstand von 0,35 Ω gemessen

werden. Somit unterscheiden sich die analytischen und experimentellen Werte nur um 4,2%, was einer guten Näherung entspricht.

Verlustleistung

Um die Verlustleistung der Spule aufgrund des Widerstandes des Kupferdrahtes berechnen zu können, wird vorerst die Stromstärke gemittelt. Hierfür wird mit Hilfe des Programms Excel die Fläche unter der Stromstärke (Abbildung 21) im Bereich von 0 – 15 ms berechnet und anschließend durch diese Zeitspanne dividiert. Mit der sich daraus ergebenden gemittelten Stromstärke von 33,26 A und dem Einsetzen in folgende Gleichung (4) kann die Verlustleistung P_V berechnet werden.

$$P_V = I^2 * R \quad (4)$$

Es ergibt sich eine Verlustleistung von 404 W, welche über das Kühlsystem aus dem Aktor abtransportiert werden muss. Das dafür verwendete System, bestehend aus Druckluft und Kühlschmierstoff, und deren Verhalten bei unterschiedlichen Parametereinstellungen wird im Kapitel 5.4 näher behandelt. Wichtig sei hier zu erwähnen, dass die ermittelte Verlustleistung auf den elektrischen Widerstand bei RT zurückzuführen ist und somit nur eine Näherung darstellt. Für eine exakte Ermittlung der Verlustleistung der Spule müssen weitere Faktoren wie zum Beispiel die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes berücksichtigt werden.

5.2. Messung der Auszugskraft

Als Auszugskraft des Aktors wird die Kraft in Axialrichtung bezeichnet, die beim Anlegen einer Spannung und Definition einer Einschaltzeit ausgelöst wird. Da die Höhe der Auszugskraft von dieser Einschaltzeit und vor allem auch von der Überdeckung der Flanken zwischen Stator und Läufer abhängt, wird diese Kraft in Abhängigkeit dieser Parameter ermittelt.

5.2.1. Versuchsaufbau

Um die Auszugskraft des Aktors bei unterschiedlichen Überdeckungen und Einschaltzeiten messen zu können, wird ein Kraftmessaufnehmer der Firma HMB vom Typ U2B mit einer Maximalkraft bis 10 kN verwendet. Für die Adaptierung dieses Kraftmessaufnehmers an den beweglichen Läufer des Aktors ist es erforderlich, die Werkzeugaufnahme inklusive der HM-Hammerspitze durch eine Werkzeugaufnahme mit Gewindestange zu ersetzen. Um die Kraftmessdose, wie dieser

Kraftmessaufnehmer auch bezeichnet wird, in der Werkzeugmaschine zu fixieren, befindet sich am anderen Ende dieser ein Aluminiumquader, der einerseits mit der Kraftmessdose verbunden und andererseits in einem Schraubstock eingespannt ist, siehe Abbildung 22.

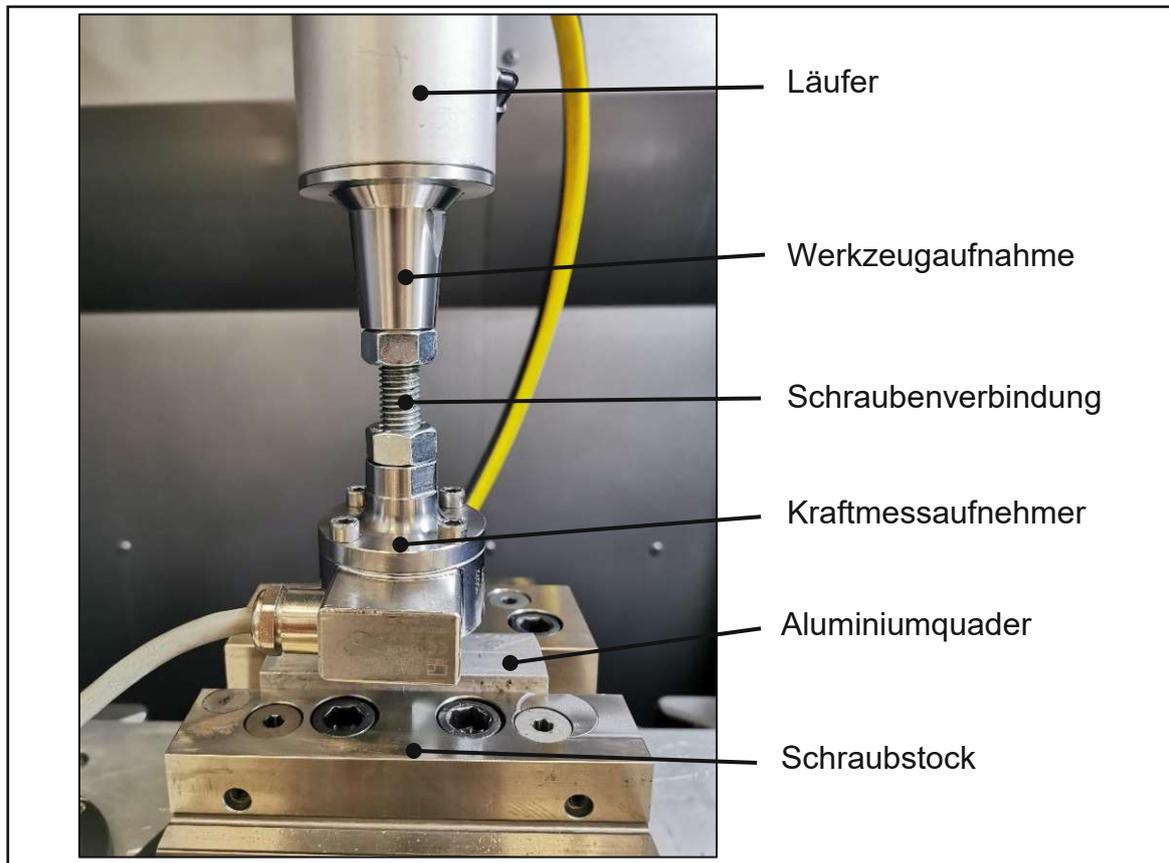


Abbildung 22: Versuchsaufbau für die Messung der Auszugskraft des Hammers

5.2.2. Versuchsdurchführung

Um den Einfluss der Überdeckung und der Einschaltzeit auf die resultierende Auszugskraft zu bestimmen, werden zwei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Einstellungen durchgeführt. Bei jedem Versuch wird der Aktor aus der Ausgangslage, mit einer Verschiebung von 0 mm, vertikal nach oben gezogen und somit die Überdeckung verändert. Weiters wird jeder Versuchsreihe eine Einschaltzeit zwischen 1 und 2,5 ms zugeordnet und die Auszugskraft in Abhängigkeit der Verschiebung und bedingt durch die Versuchsreihe auch der Einschaltzeit gemessen. Die Spannung bleibt konstant bei 60V, die Stromstärke erhöht sich hingegen mit steigender Einschaltzeit.

In einem ersten Versuch wird die Kraftmessdose lediglich in der Ausgangslage Null gesetzt, wobei hier bedingt durch die vertikale Bewegung des Aktors nach oben davon

auszugehen ist, dass diese Bewegung eine Zugkraft verursacht und dadurch nur die absolute Druckkraft, welche durch die Zugkraft vermindert ist, gemessen wird. Aus diesem Grund wird der Kraftmessaufnehmer in der zweiten Versuchsreihe nach jeder Bewegung des Aktors Null gesetzt und die relative Druckkraft in Abhängigkeit der Verschiebung und der Einschaltzeit gemessen.

Aufgrund der geringen Masse des Läufers von 0,89 kg und einer sich resultierenden Kraft von weniger als zehn Newton im Vergleich zu einer erwarteten Auszugskraft von einigen Hundert Newton, wird der Einfluss der Schwerkraft als vernachlässigbar klein angenommen.

5.2.3. Ergebnisse

Da die Performance des Aktors wesentlich von der Höhe der Überdeckung der Flanken von Stator zu Läufer abhängt, ist davon auszugehen, dass die Auszugskraft mit steigender Überdeckung abnehmen wird. In Abbildung 23 ist die Auszugskraft bei einmaliger Nullsetzung der Kraft in der Ausgangsposition dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Auszugskraft stetig über die Verschiebung des Aktors abnimmt, wobei sich in diesem Fall die Zugkraft mit zunehmender Verschiebung des Aktors erhöhen wird.

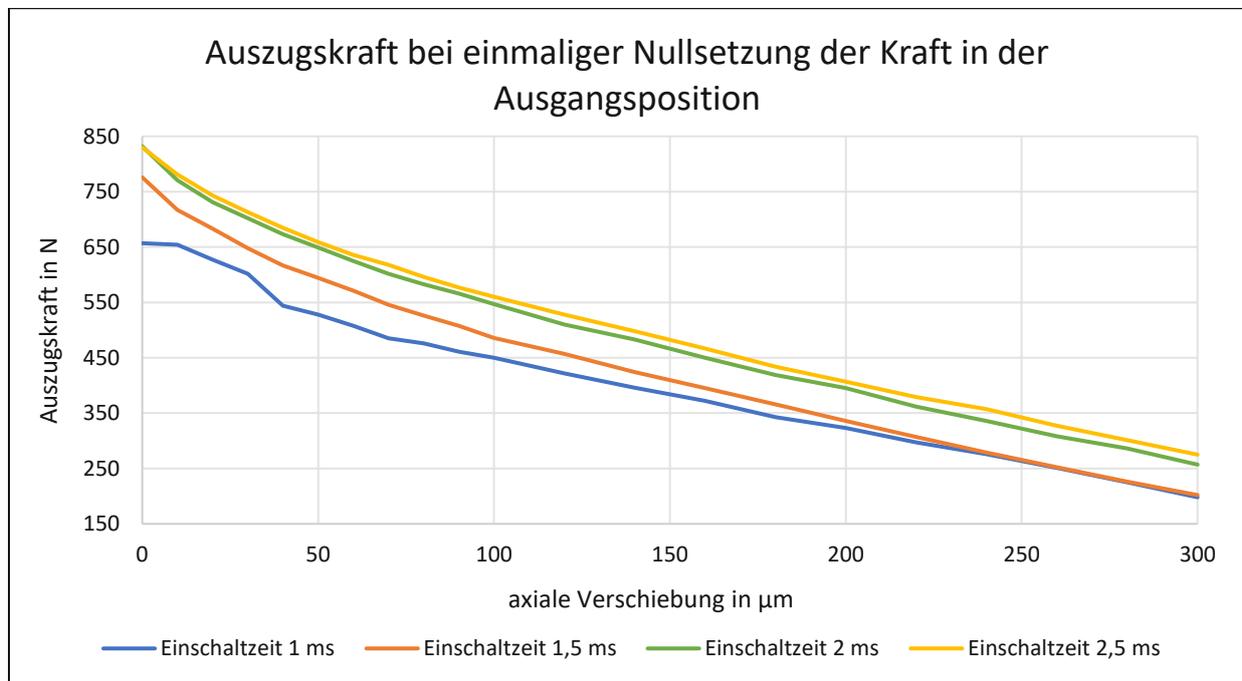


Abbildung 23: Auszugskraft bei einmaliger Nullsetzung der Kraft in der Ausgangsposition

Dem gegenüberstehend ist in Abbildung 24 die Auszugskraft bei Nullsetzung der Kraft nach jeder axialen Verschiebung des Aktors dargestellt. Durch diese Nullsetzung der

Kraftmessdose nach jeder vertikalen Bewegung des Aktors wird der Anteil der Zugkraft vernachlässigt und die reale Höhe der Druckkraft kann an jeder axialen Position des Läufers gegenüber dem Stator ermittelt werden.

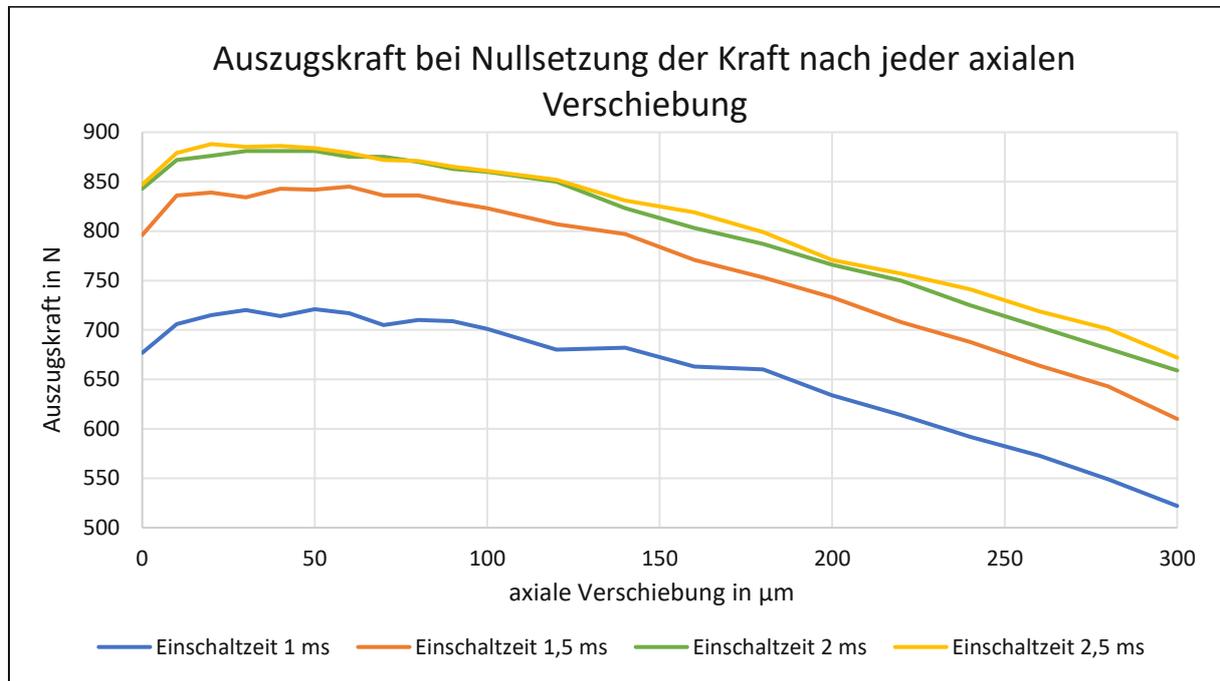


Abbildung 24: Auszugskraft bei Nullsetzung der Kraft nach jeder axialen Verschiebung des Aktors

In der obigen Abbildung 24 ist ein leichter Anstieg der Auszugskraft zwischen der Ausgangsposition bis zu einer Verschiebung von etwa ungefähr 30 μm zu erkennen. Dies könnte auf die nicht optimale Höheneinstellung des Läufers zum Stator zurückzuführen sein. Die kontinuierliche Abnahme der Auszugskraft ab einer axialen Verschiebung von 100 μm lässt erneut die Annahme zu, dass die sich annähernde, vollständige Überdeckung der Flanken zu einer Reduzierung der generierbaren Kraft führt.

5.3. Messung der Kontaktkraft

Als Kontaktkräfte werden jene Kräfte bezeichnet, die vom HM-Stößel des Aktors auf die Werkstückoberfläche übertragen werden. Da in der obigen Abbildung 24 die Auszugskräfte bei einer Einschaltzeit von 1,5 bis 2,5 ms in einem ähnlichen Bereich liegen und es davon auszugehen ist, dass die Temperaturentwicklung in der Spule aufgrund einer längeren Einschaltzeit signifikant zunimmt, wurden diese Versuche ausschließlich mit einer Einschaltzeit von 1,5 ms durchgeführt.

5.3.1. Versuchsaufbau

Für die Durchführung dieser Versuchsreihe wurde einerseits das Werkstück in eine Vorrichtung gespannt, welche mit einem Messgerät für die Aufnahme der Kontaktkräfte verbunden ist und andererseits dieses Messgerät über eine Platte in einem Maschinenschraubstock befestigt. Als Messgerät dient dabei ein Mehrkomponenten-Dynamometer der Firma Kistler vom Typ 9129AA, mit dem ein Messen der Kräfte und Momente in allen drei Koordinatenrichtungen möglich ist. Als Werkstoff wurde ein Werkzeugstahl mit einer ermittelten Härte von 206 HV 1 bei einer Standardabweichung von 10,46 verwendet. In Abbildung 25 ist der Versuchsaufbau in der Werkzeugmaschine mit einem bereits gehämmerten Werkstück zu sehen.

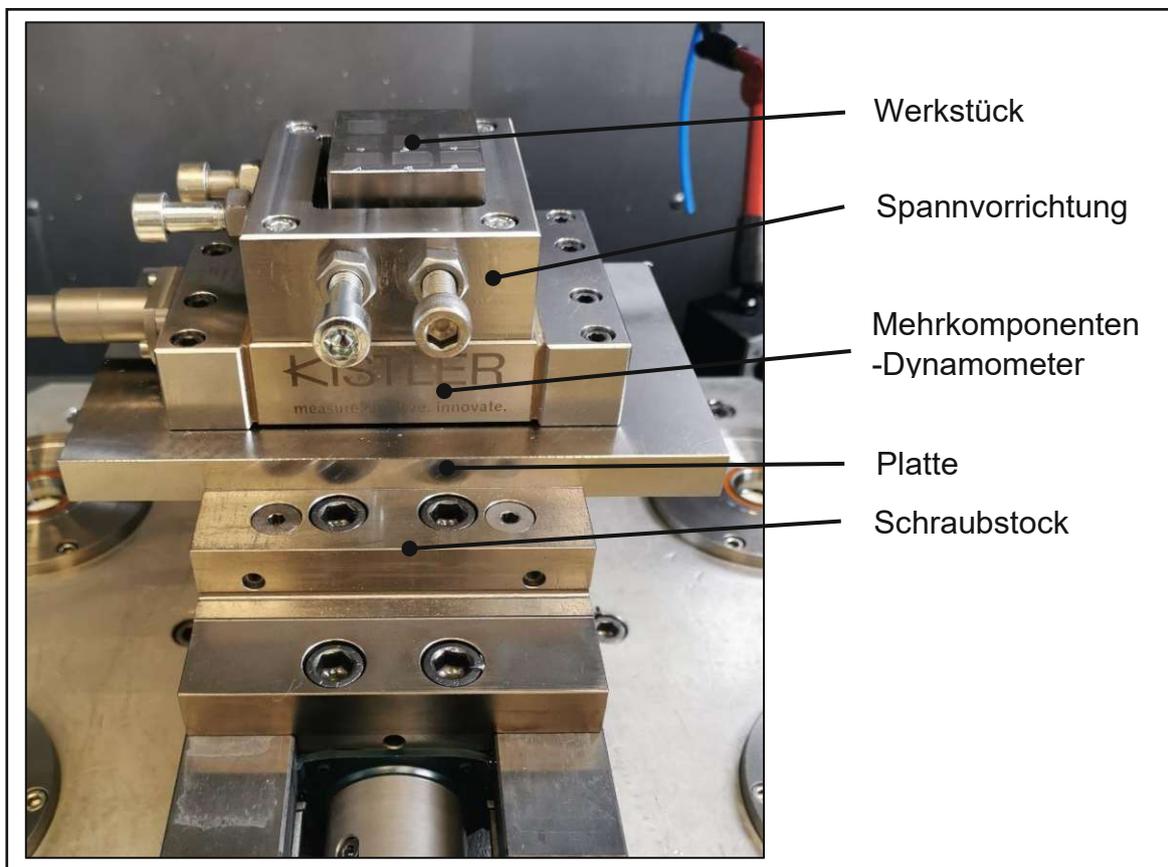


Abbildung 25: Versuchsaufbau für die Messung der Kontaktkräfte zwischen HM-Stößel und Werkstückoberfläche

5.3.2. Versuchsdurchführung

Da mittels der Kontaktkräfte auf die eingebrachte Energie des Aktors in die Werkstückoberfläche geschlossen werden kann, soll die Ermittlung dieser so realitätsnahe wie möglich gestaltet sein. Um dies zu gewährleisten, werden 10 x 10 mm Felder bearbeitet und dabei die auftretenden Kräfte in x-, y- und z-Richtung

gemessen. Die Bearbeitungsrichtung erfolgt dabei grundsätzlich in y-Richtung mit einer Zustellung von jeweils 0,1 mm in x-Richtung, wie in Abbildung 26 symbolisch dargestellt ist.

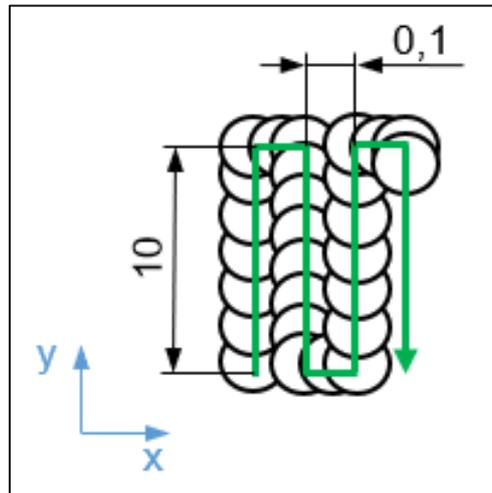


Abbildung 26: Symbolische Darstellung des Verfahrensweges (grün) des Aktors in der Werkzeugmaschine bei der 10x10 mm Feldbearbeitung

Da der maximal mögliche Hub dieses Aktors mit 0,4 mm limitiert ist und sich eine Frequenz von 200 Hz in Kombination mit einer Einschaltzeit von 1,5 ms als geeignet herausgestellt hat, werden die Prozessparameter wie folgt gewählt, siehe Tabelle 3.

Tabelle 3: Prozessparameter für die Ermittlung der Kontaktkräfte

Prozessparameter	Wert	Einheit
Frequenz	200	Hz
Einschaltzeit	1,5	ms
Abstand HM-Stößel zu Werkstück	0,3	mm
Vorschubgeschwindigkeit	1200	mm/min
Zeilenabstand	0,1	mm

Aufgrund der beträchtlich längeren Bearbeitungszeit im Vergleich zur Messung der Auszugskraft (siehe Kapitel 5.2) und einer Frequenz von 200 Hz wird dieser Versuch mit einer aufrecht gehaltenen Druckluft- und Kühlmittelzufuhr durchgeführt. Damit kann die Temperatur der Spule gering gehalten und die Randbedingungen realen Bedingungen angenähert werden. Für die Bereitstellung der Kühlmittelzufuhr dient eine extern angeschlossene Pumpe, die den Aktor nach Option I (siehe Abbildung 16) mit Kühlschmierstoff versorgt.

5.3.3. Ergebnisse

Da die Bewegungsrichtung des Aktors ausschließlich in z-Richtung, jedoch die Bearbeitungsrichtung der Werkzeugmaschine auch in x- und y-Richtung erfolgt, ist zu erwarten, dass auch geringe Kräfte in diesen Koordinatenrichtungen auftreten werden. Abbildung 27 zeigt die aufgezeichneten Kräfte von vier Schlägen bei einem Verfahrensweg des Aktors in y-Richtung.

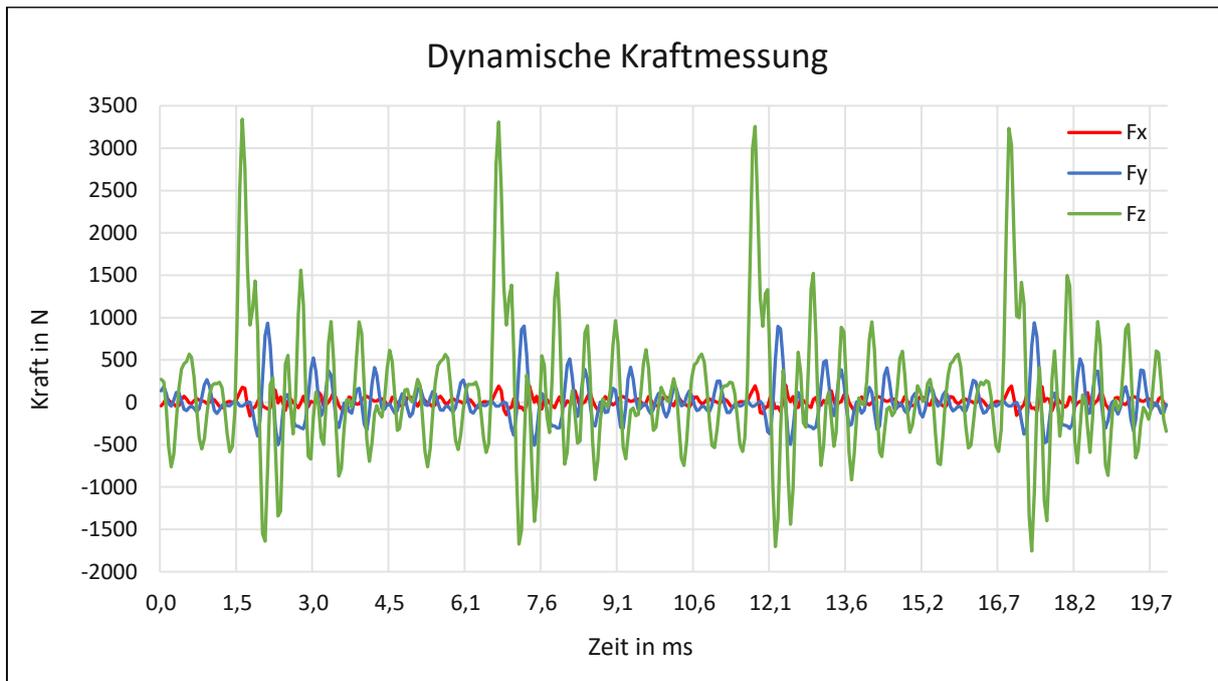


Abbildung 27: Dynamische Kraftmessung einer 10x10 Feldbearbeitung bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einem Werkstückabstand von 0,3 mm

Die maximal auftretenden Kräfte in vertikaler z-Richtung betragen 3340 N und in y-Richtung 940 N. Im Vergleich dazu sind die Kräfte in x-Richtung vernachlässigbar klein, was auf die bereits erwähnte Bearbeitungsrichtung der vier Schläge in y zurückzuführen ist.

5.4. Messung der Temperaturentwicklung

Beim MHP handelt es sich durch das Hämmern in Frequenzbereichen bis 200 Hz um einen sehr dynamischen Prozess. Das kontinuierliche, wiederholende Bestromen der Spule führt nicht nur zu der gewünschten mechanischen Bewegung des Läufers, der für die Umsetzung des Schlages verantwortlich ist, sondern auch zu einer thermischen Energieentwicklung, die als ungewünschter Nebeneffekt auftritt und aus dem Aktorsystem abtransportiert werden muss. Abhilfe schafft einerseits eine eingebrachte Druckluft, die direkt an der Spule vorbeiströmt und die entstehende Wärme per Konvektion abtransportiert und andererseits eine im Inneren des Stators befindliche Kühlleitung, durch die ein Kühlschmierstoff fließt und über Wärmeleitung und Konvektion für eine Reduzierung der entstehenden Wärme sorgt. Da für die Kühlung mittels KSS von entscheidender Bedeutung ist, mit welchem Volumenstrom der Stator durchflossen wird, wird dieser vor der Durchführung der Versuchsreihe ermittelt. Für die Berechnung des Volumenstroms wird ein Gefäß herangezogen, bei dem die Zeit der Befüllung bis zum Erreichen der 5-Liter-Markierung gemessen wird, wie in Abbildung 28 zu sehen ist. Die KSS-Zufuhr kann dabei über eine externe Pumpe mit zwei einstellbaren Stufen oder über die Werkzeugmaschine selbst über die HSK63-Aufnahme mittels Übergaberohr bereitgestellt (siehe Abbildung 16).



Abbildung 28: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Volumenstroms der KSS-Zufuhr, generiert durch die externe Pumpe

Über die nachfolgende Gleichung (5) mit dem Volumen V und der Zeit t ergeben sich folgenden Volumenströme \dot{V} für die drei Arten der KSS-Zufuhr.

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (5)$$

Tabelle 4: Einteilung der drei Arten der KSS-Zufuhr und deren Volumenströme

Art der Zufuhr	V in l	t in s	\dot{V} in l/min
Externe Pumpe - Stufe 1	5	501	0,60
Externe Pumpe - Stufe 2	5	325	0,92
Innenkühlung der Werkzeugmaschine	5	63	4,76

Zu erkennen ist einerseits der unterschiedliche Volumenstrom zwischen den zwei Stufen der externen Pumpe als auch der deutlich erhöhte Durchfluss bei der Generierung der KSS-Zufuhr über die Innenkühlung der Werkzeugmaschine. Demnach ist davon auszugehen, dass die Kühlleistung mittels Innenkühlung am besten geeignet ist, um die entstehende Wärme aus dem Aktor abtransportieren zu können.

5.4.1. Versuchsaufbau

Für die Durchführung dieses Versuches wird der Aktor erneut in die Werkzeugmaschine eingespannt und über einen definierten Abstand von 0,3 mm zum Werkstück platziert, siehe Abbildung 29 links. Als Werkstück wird derselbe Werkzeugstahl wie bei den Versuchen in Kapitel 5.3 herangezogen und direkt im Schraubstock befestigt. Der Versuchsaufbau und die notwendigen Anschlüsse für die Versuchsdurchführung sind in Abbildung 29 dargestellt.

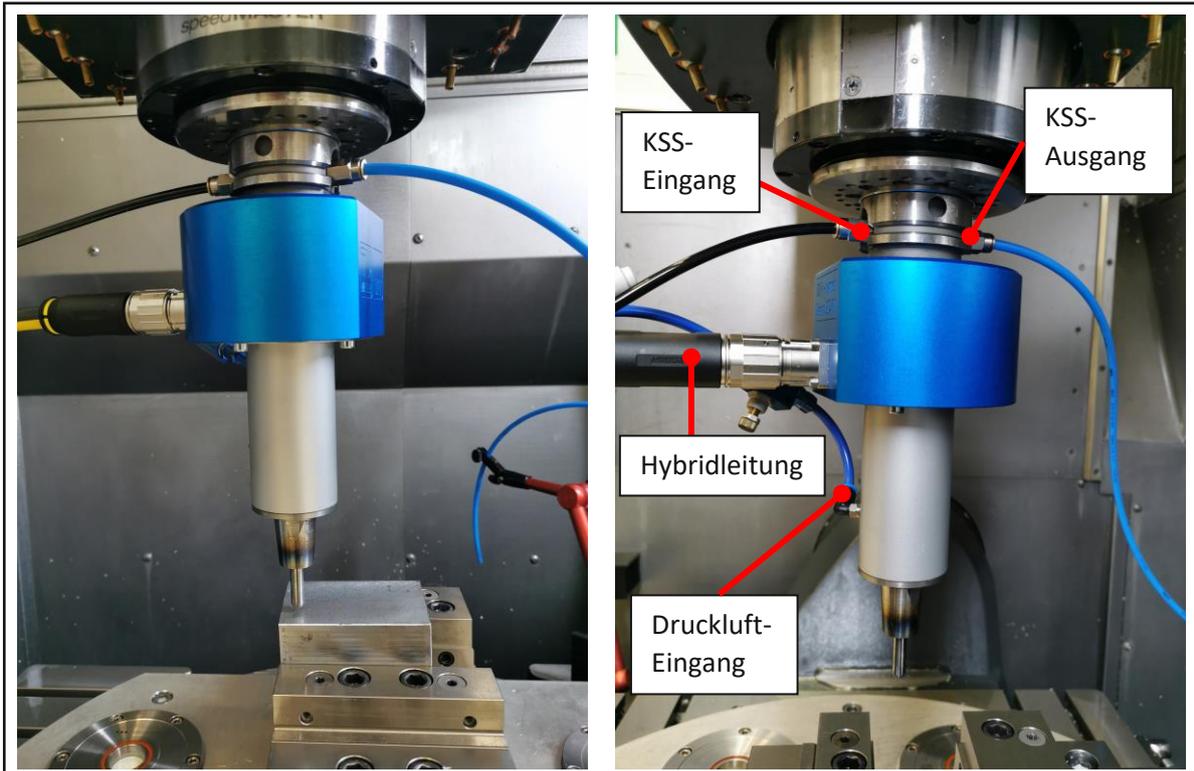


Abbildung 29: Versuchsaufbau für die Temperaturmessungen des Aktors bei Verwendung der externen KSS-Zufuhr

5.4.2. Versuchsdurchführung

Für die Ermittlung des Temperaturverhaltens des Aktors wurde dieser in der Werkzeugmaschine in Position gehalten und mit unterschiedlichen Frequenzen in einem Bereich zwischen 20 – 190 Hz so lange betrieben, bis sich eine annähernd stationäre Temperatur an der Spule eingestellt hat. Da sich herausgestellt hat, dass dies beim Großteil der durchgeführten Frequenzen nach 180 Sekunden gegeben ist, wurden die Versuche auch in diesem Zeitbereich durchgeführt und ausgewertet. In einer ersten Versuchsreihe wurde für die Bereitstellung der KSS-Zufuhr die externe Pumpe mit zwei unterschiedlichen Pumpenstufen verwendet. Mit der Pumpenstufe 1 wurden mehrere Versuche im Frequenzbereich 20 – 190 Hz und mit der Pumpenstufe 2 lediglich ein Versuch mit 190 Hz durchgeführt. Der Grund dafür liegt darin, dass die Elektronik bei einer Temperatur von 125°C automatisch abschaltet, um eine Überhitzung und in weiterer Folge Beschädigung des Temperatursensors zu verhindern. In der ersten Versuchsreihe wurde das thermische Verhalten bei Verwendung der zwei Stufen der externen Pumpe ermittelt. In einer zweiten Versuchsreihe wurde anschließend die Innenkühlung der Werkzeugmaschine verwendet und die Temperaturentwicklung an der Spule in den höheren

Frequenzbereichen zwischen 80 – 190 Hz eruiert. Wichtig zu erwähnen sei hier auch die Durchflussart der Innenkühlung der Werkzeugspindel, bei der es sich um einen sogenannten Drehdurchfluss handelt. Dies bedeutet, dass die Innenkühlung über die Werkzeugmaschine nur bei aufrecht gehaltener Rotation der Spindel verwendet werden kann, da es bei stillstehender Spindel zu einem Überdruck im System kommen könnte. Um dies zu bewerkstelligen und gleichzeitig die angeschlossenen Kabel und Schläuche des Aktors nicht zu beschädigen, wurde ein CNC-Programm implementiert, welches die Spindel jeweils um eine Viertel-Umdrehung im und anschließend gegen den Uhrzeigersinn drehen lässt.

Die Versuche wurden mit denselben Parametereinstellungen, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, durchgeführt, jedoch mit der Ausnahme, dass der Aktor auf horizontaler Ebene seine Position beibehält. Die hierfür verwendeten Parameter wurden mit einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einem Abstand von Aktor zu Werkstück von 0,3 mm gewählt.

5.4.3. Ergebnisse

Versuchsreihe 1 – externe Pumpe

In Abbildung 30 sind die Ergebnisse der Temperaturverläufe der einzelnen Versuche ersichtlich. Wie bereits erwähnt, wurde in der ersten Versuchsreihe die KSS-Zufuhr über die externe Pumpe mit der Stufe 1 bereitgestellt und die Versuche in einem Frequenzbereich von 20 – 190 Hz durchgeführt, wobei der Versuch mit 190 Hz auch mit der Pumpenstufe 2 wiederholt wurde (grüner Verlauf).

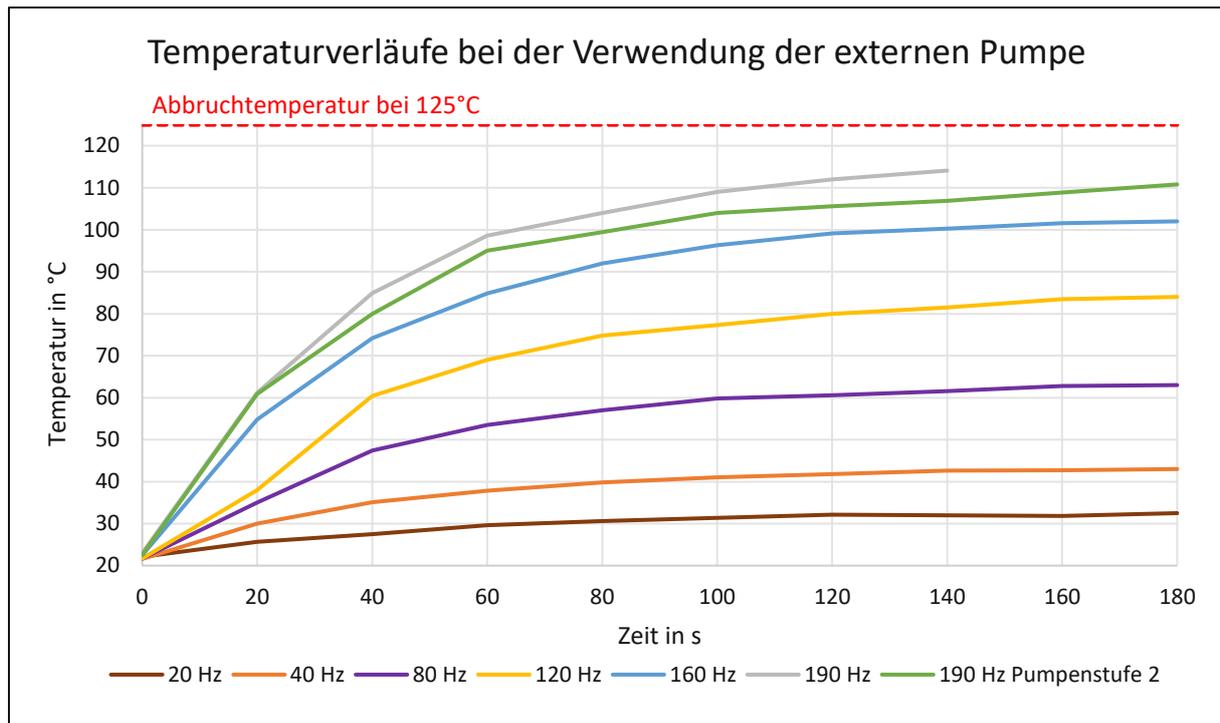


Abbildung 30: Temperaturverläufe bei Verwendung der KSS-Kühlung über die externe Pumpe bei variierender Frequenz – Einschaltzeit 1,5 ms und Werkstückabstand 0,3 mm

Es ist zu erkennen, dass sich nach 180 Sekunden Bearbeitungszeit beim Großteil der Versuche, mit Ausnahme der Versuche mit 190 Hz, eine annähernd konstante Temperatur an der Spule einstellt. Beim Versuch mit 190 Hz und der Pumpenstufe 1 (grau) kam es bereits bei einer Temperatur von ca. 115°C zum Abbruch des Systems. Der Grund dafür könnte darin liegen, dass die Abbruchtemperatur von 125°C in den Einstellungen hinterlegt ist, die hier dokumentierte Temperatur jedoch die ausgegebene Temperatur an der Bedienersoftware darstellt. Die an der Bedienersoftware angezeigte Temperatur entspricht dem Mittelwert der am Temperatursensor erfassten Temperatur einer Sekunde. Diese Vorgehensweise wird verwendet, um ein Signalrauschen der Leitung und dadurch eine sprunghafte Temperaturanzeige zu verhindern. Daher kann begründet werden, dass eine einzige Temperaturspitze einen Wert von 125°C überschritten hat und dadurch das System abgeschaltet wurde, die gemittelte Temperatur jedoch mit 115°C ausgegeben wurde. Bei einer neuerlichen Durchführung des Versuches mit 190 Hz und der Verwendung der Pumpenstufe 2 konnte anschließend ein niedrigeres Temperaturverhalten beobachtet werden. Aufgrund des höheren Volumenstroms konnte somit ein erneuter Abbruch des Systems verhindert werden.

Versuchsreihe 2 - Innenkühlung

Bei dieser Versuchsreihe kommt die KSS-Zufuhr mittels Innenkühlung der Werkzeugmaschine zum Einsatz. Die Ergebnisse der Temperaturverläufe dieser Versuchsreihe sind in Abbildung 31 zu sehen.

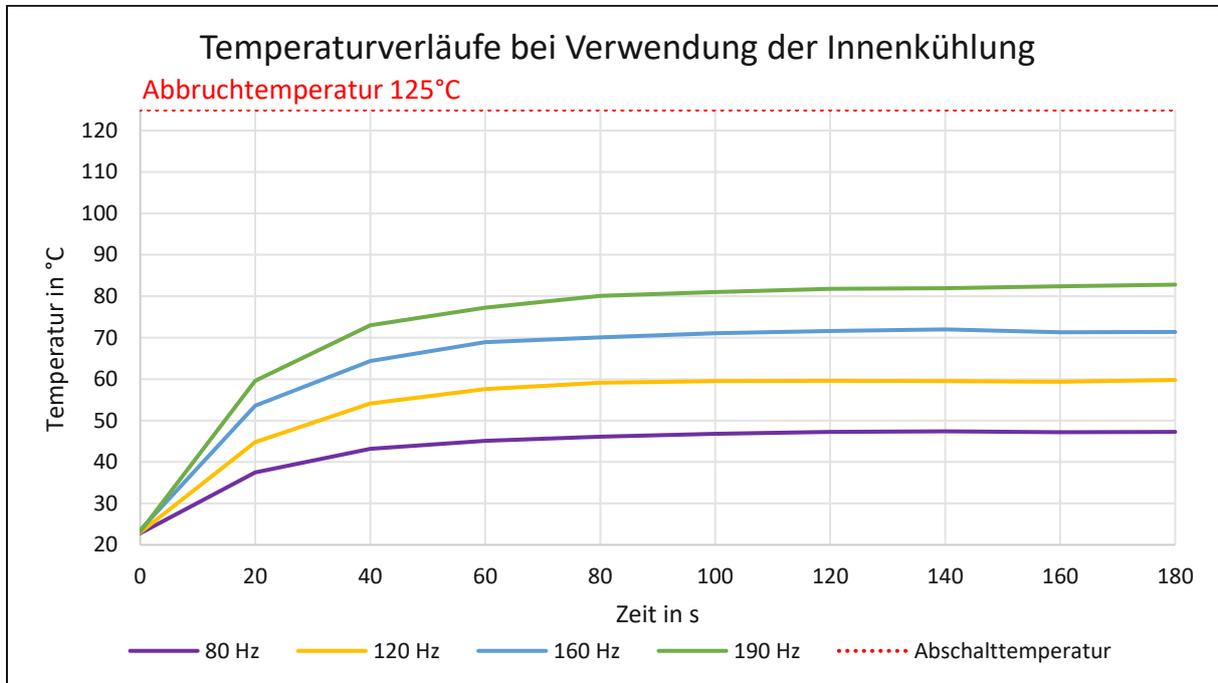


Abbildung 31: Temperaturverläufe bei Verwendung der Innenkühlung über die Werkzeugmaschine bei variierender Frequenz – Einschaltzeit 1,5 ms und Werkstückabstand 0,3 mm

In Abbildung 31 ist ersichtlich, dass sich eine stationäre Temperatur schon ab ungefähr 120 Sekunden einstellt und sich der Temperaturbereich bei allen Frequenzbereichen auf einem deutlich niedrigeren Niveau befindet als in der Versuchsreihe 1. Ebenfalls beim Versuch mit einer Frequenz von 190 Hz stagniert die Temperatur bei einem Wert von 83 °C.

Vergleich der Temperaturverläufe bei 190 Hz

Um die unterschiedliche Effektivität der verschiedenen KSS-Zufuhrarten und der sich daraus ergebenden Volumenströme zu verdeutlichen, werden nachfolgend die Temperaturverläufe bei einer Frequenz von 190 Hz gegenübergestellt, siehe Abbildung 32.

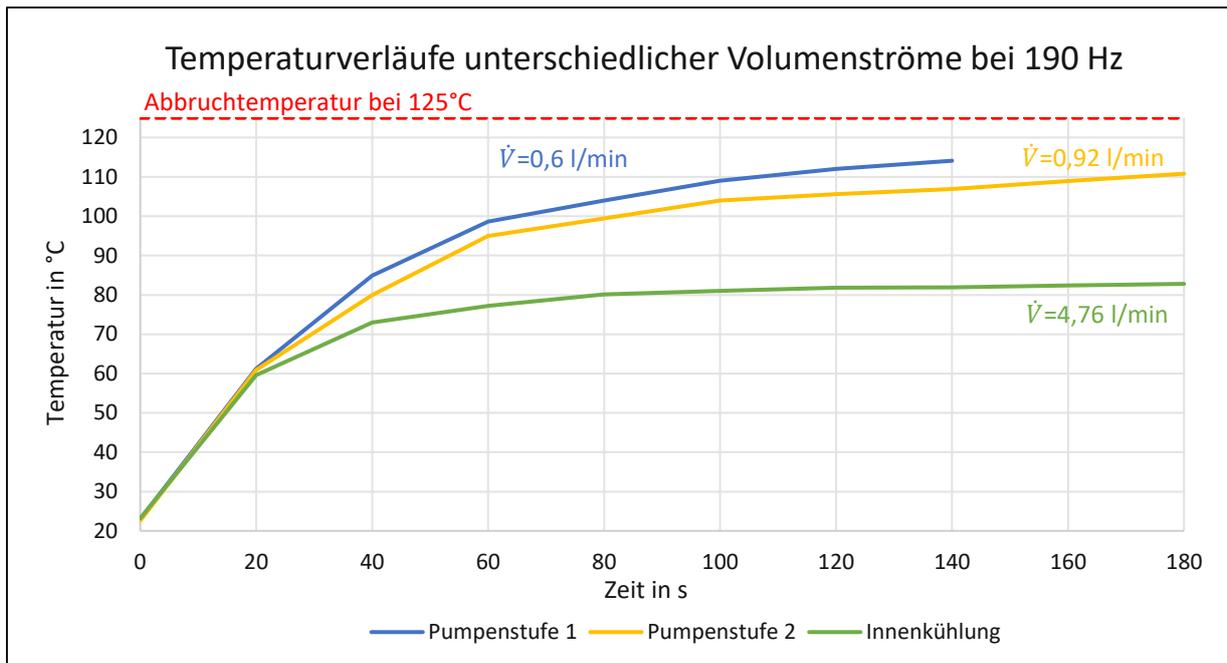


Abbildung 32: Vergleich des Temperaturverhaltens bei unterschiedlichen Volumenströmen

In Abbildung 32 lässt sich zeigen, dass bei Pumpenstufe 2 (gelb) ein günstigeres Temperaturverhalten als bei Pumpenstufe 1 (blau) vorliegt. Bei Verwendung der Innenkühlung (grün) ist aufgrund der Erhöhung des Volumenstroms um knapp 700% im Vergleich zur externen Pumpenstufe 1 eine deutliche Verbesserung der Kühlleistung festzustellen. Weiters ist zu erkennen, dass bei Verwendung der Innenkühlung für die KSS-Zufuhr eine stationäre Temperatur deutlich früher eintritt (nach 120 Sekunden).

5.5. Ermittlung der Hammerkopfgeschwindigkeit und der kinetischen Energie

Eine weitere Kenngröße für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Hämmerystems ist die eingebrachte kinetische Energie in das Werkstück, mit der auf die Umformarbeit der Werkstückoberfläche geschlossen werden kann. Dabei bedeutet eine größere kinetische Energie eine höhere Umformarbeit. Dies führt dazu, dass größere Rauheiten geglättet, höherfeste Stähle gehämmert und größere Hammerkopfdurchmesser verwendet werden können.

Für die Ermittlung der kinetischen Energie muss vorerst die Geschwindigkeit des Hammerkopfes beim Aufprall auf das Werkstück eruiert werden. Um dies bei den bisherigen Versuchsreihen entsprechend zu bestimmen, werden dieselben Parameter erneut verwendet, siehe Tabelle 5. Da weder ein horizontales Bewegen des Aktors in

der Werkzeugmaschine als auch die Höhe der gewählten Frequenz einen direkten Einfluss auf die Geschwindigkeit des Hammerkopfes haben, wird der Aktor in Position gehalten und mit einer Frequenz von 20 Hz betrieben.

Tabelle 5: Parameter für die Ermittlung der Hammerkopfgeschwindigkeit

Bezeichnung	Wert	Einheit
Frequenz	20	Hz
Einschaltzeit	1,5	ms
Abstand HM-Stößel zu Werkstück	0,3	mm

Für die Erfassung der Geschwindigkeit v wird während der Schlagserie eine Messung gestartet und mithilfe des Wegmesssystems der Gabellichtschranke das Strom/Zeit- und Weg/Zeit-Diagramm des Läufers und damit des Hammerkopfes aufgezeichnet, wie in Abbildung 33 zu sehen ist.

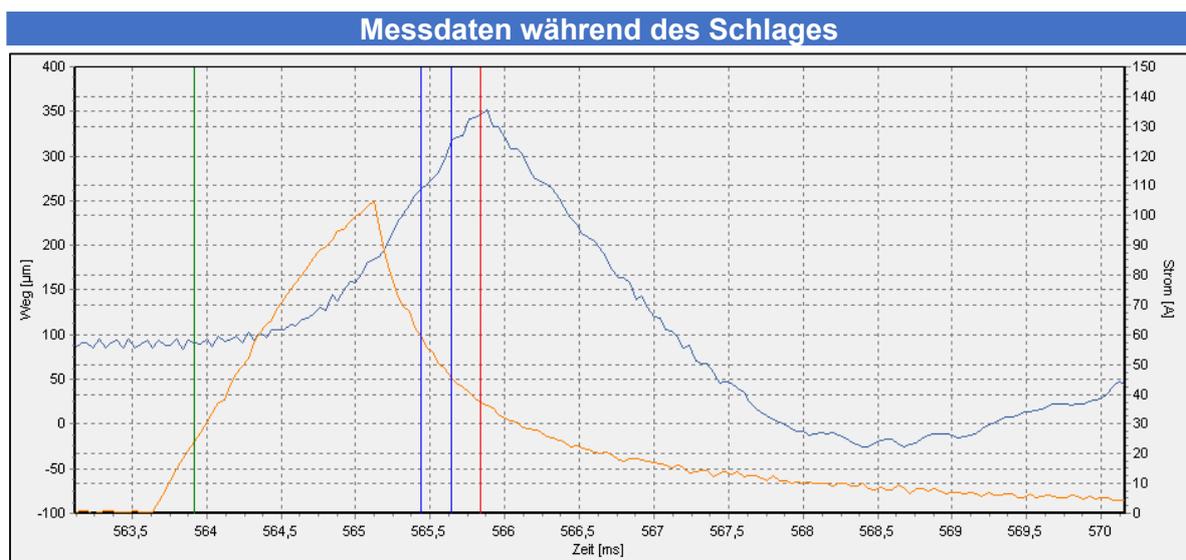


Abbildung 33: Aufnahme der Strom- und Wegmessdaten während eines Schlages bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einem Werkstückabstand von 0,3 mm

Wie in obiger Abbildung 33 ersichtlich ist, wird die Spannung bei einer gemessenen Zeit von 563,6 ms für die vorab definierte Einschaltzeit von 1,5 ms angelegt. Dadurch kommt es zum Anstieg der Stromstärke (orange Linie), bis diese bei 565,1 ms ihr Maximum erreicht und anschließend wieder absinkt. Mit einer minimalen Verzögerung von ca. 0,2 ms nach Anlegen der Spannung kommt es zur axialen Ausfahrbewegung des Läufers (grüne Linie). Der Läufer inkl. Stößel führt diese Bewegung fort, bis dieser bei einem Verfahrweg von 300 µm auf die Werkstückoberfläche auftrifft, bei 350 µm sein Maximum erreicht und anschließend wieder in seine Ausgangsposition

zurückfährt. Die Geschwindigkeit kurz vor dem Auftreffen des Stößels auf die Werkstückoberfläche wird dabei über das Steigungsdreieck, welches durch die zwei blauen, vertikalen Linien definiert ist, ermittelt und ausgegeben. Erwähnenswert ist ebenfalls, dass sich der Läufer in seiner Ausgangsposition vor dem Anlegen der Spannung auf einem Grundniveau von etwa 90 µm befindet. Der Grund könnte darin liegen, dass sich durch die Kühlung mittels Druckluft eine pneumatische Feder aufgebaut hat, der den Läufer nach dem vollständigen Zurückfahren nach dem Stoß in seiner anschließenden Ruheposition versetzt.

Mit nachfolgender Gleichung (6) und der gemessenen Masse m von 0,89 kg kann die kinetische Energie E_{kin} ermittelt werden. Tabelle 6 fasst die Ergebnisse zusammen. [14]

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (6)$$

Tabelle 6: Geschwindigkeit und kinetische Energie beim Aufprall des Hammerkopfes

Bezeichnung	Wert	Einheit
Geschwindigkeit des Hammerkopfes	0,25	m/s
Kinetische Energie	27	mJ

Mit einer gemessenen Geschwindigkeit von 0,25 m/s liegt die Hammerkopfgeschwindigkeit in einem ähnlichen Bereich wie [7] dies mit 0,24 m/s für das E-MHP bei einem Abstand von Aktor zu Werkstückoberfläche von 0,3 mm beschrieben hat. Die sich daraus ergebene kinetische Energie, welche in dieser Arbeit [7] mit 12 mJ angegeben wurde, ist mit 27 mJ hingegen um 225 % höher. Begründet werden kann dies durch die Steigerung der beweglichen Masse von 0,414 kg aus [7] mit der hier gemessenen Masse von 0,89 kg.

5.6. Zusammenfassung und Erkenntnisse

Durch die in diesem Kapitel 5 durchgeführten Versuchsreihen konnten viele Erkenntnisse zum Verhalten der Aktorik gewonnen werden. Die Charakterisierung der Spule, die Messungen der Auszugs- und Kontaktkräfte als auch die Temperaturmessungen führten zu einem deutlich besseren Verständnis zum Systemverhalten des Aktors während unterschiedlicher Belastungsfälle. Mit Hilfe der

Ermittlung der Hammerkopfgeschwindigkeit und der kinetischen Energie konnte eine weitere, wichtige Kenngröße des Aktors ermittelt werden.

5.6.1. Flankenbreite

Wie bereits erwähnt, liegt der maximal mögliche Hub des Aktors bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms bei 0,4 mm. Grund dafür ist eine Abweichung zwischen Konstruktion und Fertigung, welcher beim Zusammenbau des Aktors erstmalig bemerkbar wurde. Für die Höheneinstellung des Läufers muss, wie bereits in Kapitel 4.1.1 beschrieben, der Abstand zwischen HSK63-Aufnahme und Beginn einer ersten Flanke des Gewindes so exakt wie möglich eruiert werden, um anschließend den gewünschten Wert mit Unterlegscheiben zu erreichen. Beim Vermessen dieses Abstandes wurde eine sehr geringe Flankenbreite festgestellt und mit 0,9 mm anstatt 1,7 mm bestimmt. Diese verminderte Flankenbreite könnte für den geringen Hub des Aktors ausschlaggebend sein, da dadurch der Weg bis zum Erreichen einer vollständigen Überdeckung wesentlich kürzer ist im Vergleich zu einer Flankenbreite von 1,7 mm. Diese Unstimmigkeit ist auf eine fehlende Bemaßung in der Konstruktionszeichnung zurückzuführen, da die genannte Flankenbreite nicht explizit bemaßt und deshalb auch nicht gefertigt werden musste.

5.6.2. Pneumatische Feder

Aufgrund des sehr dynamischen Prozesses des maschinellen Oberflächenhämmerns ist ein Kühlsystem unvermeidbar, um die Wärmeentwicklung im Aktor zu verringern. Sowohl die Druckluftkühlung als auch die Kühlung mittels KSS sind daher unerlässlich, um die entstehende Wärme aus dem System abzutransportieren. Bei der Ermittlung des maximalen Hubes hat sich bei Verwendung der Druckluft jedoch ein nachteiliges Phänomen herausgestellt. Beträgt der maximale Hub ohne Verwendung der Druckluft 0,5 mm, beläuft sich dieser mit Druckluftkühlung auf 0,4 mm. Zurückzuführen könnte dies auf einen verminderten Abtransport der Druckluft über die Bohrungen der Grundplatte sein. Durch dieses Ungleichgewicht von einströmender zu ausströmender Druckluft kommt es zu einer pneumatischen Feder, die ein vollständiges Zurückfahren des Läufers verhindert. Dadurch ist der Weg bis zur vollständigen Überdeckung kürzer und der Hub verringert sich.

6. Weiterentwicklung der Aktorik

Nach der Systemtestung des Aktors und den daraus gewonnenen Erkenntnissen aus Kapitel 5 soll dieser überarbeitet und in weiterer Folge mit den eingepflegten Revisionen erneut getestet werden. Einerseits sollen konstruktive Änderungen vorgenommen werden, um Verbesserungen hinsichtlich des Zusammenbaus als auch der Kühlperformance zu erzielen. Andererseits sollen fertigungstechnische Anpassungen erfolgen, um die Flankenbreite zu vergrößern und damit den Hub und die Leistungsfähigkeit des Aktors zu erhöhen. Nachfolgend werden alle Überarbeitungen detailliert erläutert und deren Notwendigkeit begründet.

6.1. Flankenbreite

Wie bereits in Kapitel 4.1.1 beschrieben, ist die Überdeckung zwischen den Flanken des Stators und des Läufers als auch die Flankenbreite selbst von entscheidender Bedeutung für die Leistungsfähigkeit des Aktors. In der Ausgangsposition werden Stator und Läufer so positioniert, dass eine minimale Überdeckung der Flanken von 0,1 – 0,2 mm vorherrscht. Fließt nun Strom aufgrund der angelegten Spannung durch die Spule, beschleunigt der Läufer bis zur maximalen Überdeckung, bei der sich die Flanken des Stators und Läufers auf gleicher Höhe befinden. Dabei bedeutet eine geringere Flankenbreite auch einen kürzeren Weg, um den Läufer für den Schlag auf die Werkstückoberfläche zu beschleunigen. Beim Zusammenbau des Aktors und beim Einstellen der Flanken zueinander wurde erkannt, dass die Abmessungen der realen Flankengeometrie nicht exakt den theoretischen Werten der Konstruktionszeichnung entsprachen. Begründet ist dies nicht durch eine fehlerhafte Fertigung der Bauteile, sondern durch eine fehlende Bemaßung der Flankenbreite von Stator und Läufer. Abbildung 34 zeigt sowohl die Flankenbreite des aktuellen Aktors als auch die geforderte Flankenbreite des überarbeiteten Aktors.

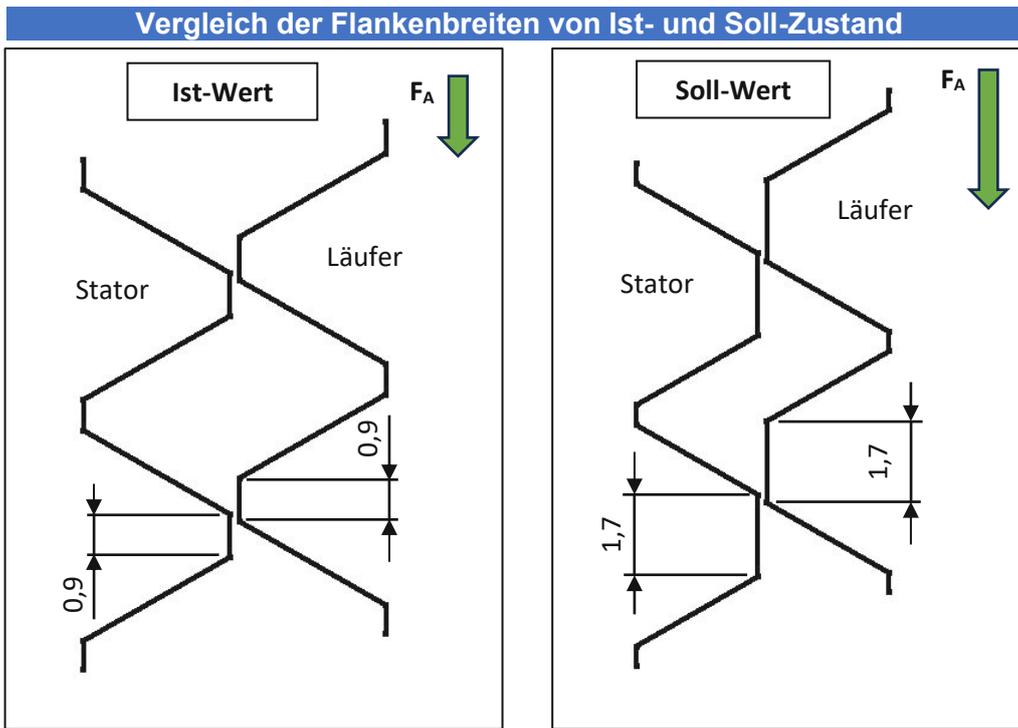


Abbildung 34: Flankenbreiten von Stator und Läufer im Ist- und Soll-Zustand laut Konstruktion

Wie in obiger Abbildung 34 ersichtlich, besteht eine große Diskrepanz zwischen dem Ist- und Sollwert der Flankenbreite von Stator und Läufer. Abbildung 35 verdeutlicht diesen Unterschied der Flankenbreite am Beispiel des realen Stators.

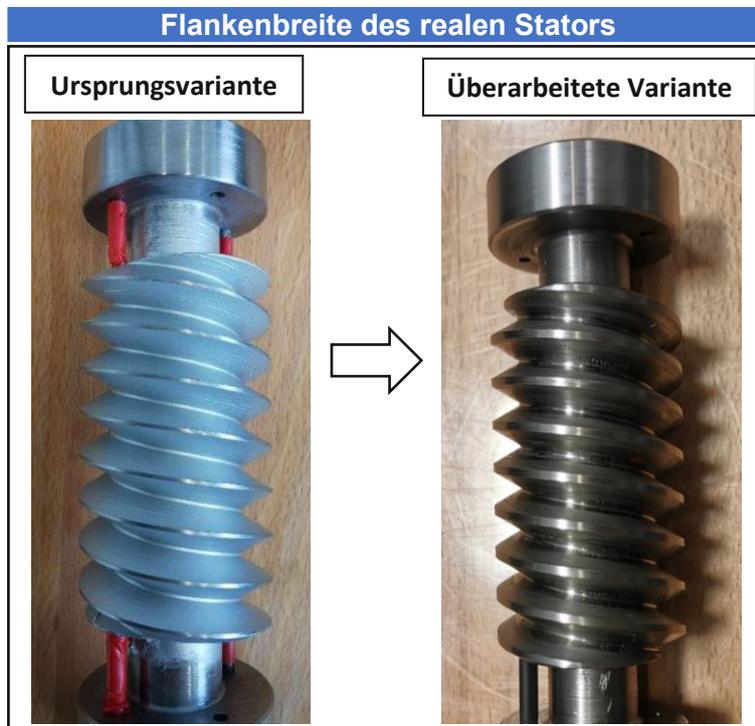


Abbildung 35: Gegenüberstellung der Flankenbreite zwischen ursprünglichem und überarbeitetem Stator

Durch die Erkenntnis dieser Abweichung und der Berücksichtigung bei der Revision des Aktors ist anzunehmen, dass sich der maximale Hub des Aktors wesentlich vergrößern wird. Infolgedessen ist auch von einer erhöhten Beschleunigung des Läufers auszugehen, die unmittelbar zu einer Verbesserung der kinetischen Energie bzw. der eingebrachten Umformarbeit in die Werkstückoberfläche führen sollte.

6.2. Stator

In einer zweiten Revision wurden mehrere Details des Stators verändert. Notwendig war dies einerseits wegen der zu geringen Flankenbreite des Stators und andererseits aufgrund der nicht ausreichenden Kühlleistung durch den Kühlschmierstoff. Zusätzlich zu diesen zwei Überarbeitungen des Stators wurde als Ziel festgesetzt, den Zusammenbau des Aktors zu beschleunigen. Dafür soll die zeitintensive Höheneinstellung für die Position der Flanken von Stator und Läufer zueinander vereinfacht und bereits in der Konstruktion berücksichtigt werden.

6.2.1. Kühlsystem

Die in Kapitel 5.4 durchgeführten Temperaturmessungen des Aktors ergaben eine Maximaltemperatur von 83°C bei einer Frequenz von 190 Hz und der Verwendung der Innenkühlung. Da davon auszugehen ist, dass der Aktor durch die Überarbeitungen leistungsfähiger wird, bedarf es auch einer Verbesserung der Kühlung im prophylaktischen Sinne. Aufgrund der unterschiedlichen Werte der Wärmekapazität von Luft ($c_p = 1,01 \frac{kJ}{kg \cdot K}$) und Wasser bzw. Kühlschmierstoff ($c_p = 4,18 \frac{kJ}{kg \cdot K}$) wurde das primäre Augenmerk auf die Verbesserung der Kühlleistung mittels KSS gelegt. Der Wärmestrom \dot{Q}_K , der mittels Konvektion vom durchströmenden Fluid aus dem Stator abtransportiert wird, kann mit folgenden Gleichungen (7) und (8) aus [15] abgeschätzt werden.

$$\dot{Q}_K = \dot{m} * c_p * (\Delta T) \quad (7)$$

$$\dot{m} = \dot{V} * \rho \quad (8)$$

Dabei ist \dot{m} der Massenstrom, c_p die Wärmekapazität, ΔT die Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Ablauf, \dot{V} der Volumenstrom und ρ die Dichte des Kühlschmierstoffs. Da sowohl die Dichte als auch die Wärmekapazität Konstanten eines Fluids sind und die Temperaturdifferenz aus den Messungen der Versuchsreihen ermittelt wurde,

verbleibt als variable Größe in dieser Gleichung (7) der Massen- bzw. Volumenstrom. Ein größerer Volumenstrom hat dabei eine höhere Wärmeabfuhr aus dem Stator zufolge. Dies lässt sich sowohl analytisch mit der Gleichung (7) als auch experimentell mit den variierenden Volumenströmen bei den durchgeführten Temperaturmessungen (0,6 l/min, 0,92 l/min, 4,76 l/min) bestätigen, siehe Abbildung 32.

Da zwischen dem Kupferdraht, der aufgrund des großen Stromflusses hauptsächlich für die Wärmeentwicklung verantwortlich ist, und dem durchströmenden KSS eine physische Barriere (Statorwand) vorliegt, ist die Wärmeleitung durch diese Wand ebenfalls von entscheidender Bedeutung für die Kühlleistung des Systems. Mit der Annahme, dass die Wärmeleitung des Stators nur zu geringen Anteilen axial abströmt und der Großteil des Wärmetransports radial nach innen erfolgt, kann mit folgender Gleichung (9) für die Wärmeleitung \dot{Q}_W im eindimensionalen Fall eine gute Näherung getroffen werden. [15]

$$\dot{Q}_W = \frac{\lambda * A_W * (\Delta T)}{b} \quad (9)$$

Abbildung 36 zeigt die Wärmeleitung für den eindimensionalen Fall nach [16] mit der durchströmten Querschnittsfläche A_W , der Temperaturdifferenz ΔT zwischen der Außen- (T_1) und Innenwand (T_2) und der Wandstärke b . Die Wärmeleitfähigkeit λ ist eine temperaturabhängige Stoffgröße und beträgt für einen unlegierten Baustahl 54 W/mK bei einer Temperatur von 20 °C.

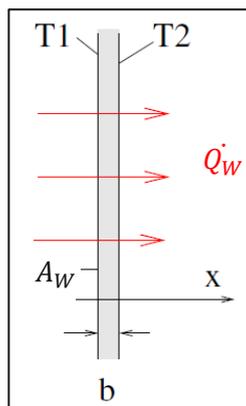


Abbildung 36: Wärmeleitung für den eindimensionalen Fall durch eine Wand - [11] modifiziert

Angelehnt an Gleichung (9) lässt sich durch Anpassen der Variablen eine gute Annäherung für die Wärmeleitung durch den Stator angeben. Dabei entsprechen T_1 und T_2 den Temperaturen an der Spule (D1) und der Bohrungswand (D2) des Stators

sowie A_W der Zylinderfläche zwischen diesen Radien. Da es sich bei dieser Gleichung (9) um eine Abschätzung der Wärmeleitung handelt und nicht alle Randbedingungen für eine vollständigen thermischen Berechnung herangezogen werden können, wird der äußere Radius, an der sich die Spule befindet, gemittelt. Abbildung 37 zeigt die Schnittansicht des Stators mit der Zuordnung der Variablen.

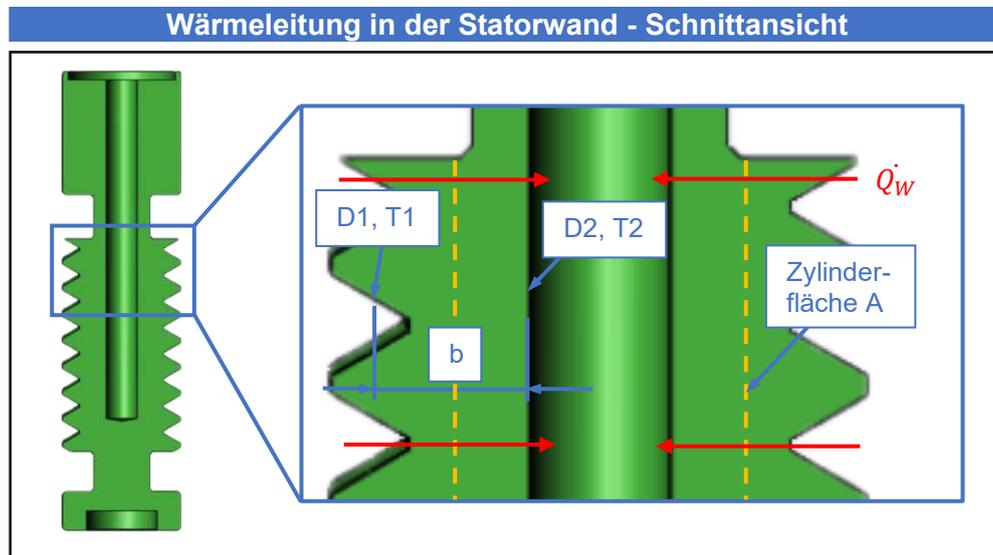


Abbildung 37: Wärmeleitung in der Statorwand – Darstellung der Variablen

Um die Wärmeleitung durch die Statorwand zu erhöhen, wurde einerseits der Bohrungsdurchmesser im Inneren des Stators und damit auch die Querschnittsfläche vergrößert und andererseits die Wandstärke reduziert. Die Wärmeleitfähigkeit ist eine werkstoffbezogene Größe und bleibt daher unverändert. Eine weitere Annahme betrifft die Temperatur T_2 an der Bohrungswand, welche für diese Abschätzung gleich der Temperatur des durchströmenden Fluids gewählt wurde. Für die Berechnung der Wärmeleitung wurden die geometrischen Abmessungen des Stators und die experimentell ermittelten Temperaturwerte bei einer Frequenz von 190 Hz und der Verwendung der Innenkühlung herangezogen, siehe Abbildung 31. Für die Bestimmung der Temperaturwerte am Ein- und Ausgang des Kühlschmierstoffs, wurde beim Versuch mit 190 Hz und der Verwendung der Innenkühlung jeweils ein Thermoelement vom Typ K in den Zu- und Ablauf des Kühlschmierstoffs platziert. Um den Einfluss der Wandstärke zwischen Spule und Bohrungswand auf die Wärmeleitung zu ermitteln, wurden dieselben Temperaturwerte aus der Testung des ursprünglichen Aktors auch für die Berechnung der Wärmeleitung des überarbeiteten Stators herangezogen. Tabelle 7 zeigt die Werte für die Berechnung der Wärmeleitung der ursprünglichen (alt) und der überarbeiteten Aktorik (neu).

Tabelle 7: Auswirkung des Bohrungsdurchmessers auf die Wärmeleitung durch die Statorwand

Bezeichnung	Symbol	Wert		Einheit
		alt	neu	
Durchmesser der Spule (gemittelt)	D1	36	36	mm
Durchmesser an der Bohrungswand	D2	11	18	mm
Länge der Spule	l	76	76	mm
Zylinderfläche	A	5611	6447	mm ²
Wärmeleitfähigkeit	λ	54	54	W/mK
Temperatur der Spule	T1	83	83	°C
Temperatur an der Bohrungswand	T2	22	22	°C
Wärmeleitung	\dot{Q}_W	1479	2359	W

Durch eine Vergrößerung der Bohrung im Inneren des Stators von einem Durchmesser von 11 auf 18 mm ist eine Erhöhung der Wärmeleitung von 59,5% zu erwarten, sofern alle Ausgangswerte unverändert bleiben. Sollte sich die Leistungsfähigkeit des Aktors durch die in Kapitel 6 genannten Änderungen deutlich verbessern, ist davon auszugehen, dass die Verbesserung der thermischen Energieentwicklung nicht in diesem Ausmaß stattfinden wird. Dennoch lässt Tabelle 7 den Schluss einer Verbesserung der Kühlleistung über die Wärmeleitung des Stators zu.

Der Bohrungsdurchmesser für den Durchfluss des Kühlschmierstoffs kann jedoch nicht direkt durch eine größere Bohrung erweitert werden, da die erste Stufe dies geometrisch nicht zulässt. Aus diesem Grund wurde der Aktor konstruktiv angepasst und in zwei Einzelteilen gefertigt, um an der Unterseite von Teil 1 einen größeren Durchmesser und somit eine geringere Wandstärke zwischen vorbeiströmenden Fluid und Spule zu erzielen. Des Weiteren wurde ein Gewinde adaptiert, um zusätzlich die Oberfläche des Kühlschmierstoffs zur Statorwand zu vergrößern und einen besseren Wärmeabtransport zu gewährleisten. In Abbildung 38 ist der Stator sowohl im ursprünglichen als auch überarbeiteten Zustand in der Schnittansicht dargestellt.

Vergleich des Kühlkanals zwischen Stator alt und neu

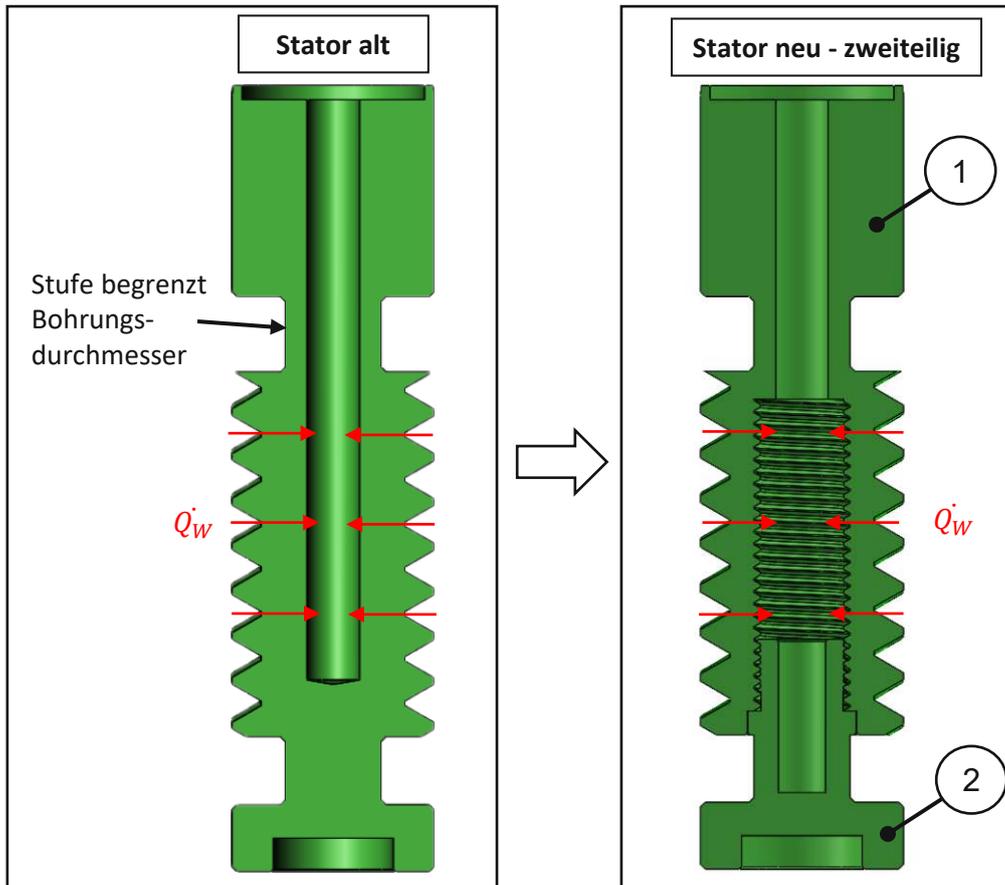


Abbildung 38: Vergleich des Kühlkanals für eine verbesserte Wärmeleitung \dot{Q}_w in der Statorwand; links: Stator alt - mit eingezeichneter, der Bohrung begrenzender Stufe rechts: Stator neu - zweiteilig

Die zwei Einzelteile des überarbeiteten Stators werden nach der Fertigung der Innenkontur einerseits über das Gewinde selbst und andererseits stoffschlüssig mittels Hartlötens miteinander verbunden. Die stoffschlüssige Verbindung dient dabei nicht nur der zusätzlichen Kraftübertragung für die anschließende Bearbeitung der Außenkontur des Stators, sondern auch der Umsetzung einer unbedingt erforderlichen Dichtheit zwischen dem durchströmenden Fluid, der außerhalb des Stators befindlichen Spule und der gesamten Elektronik des Systems. Um die notwendige Konzentrität der Passflächen der beiden Statorteilen zueinander zu gewährleisten, wurden die Bearbeitungen der Außenkontur erst nach dem Hartlötens durchgeführt.

6.2.2. Referenzmarke

Da die Leistungsfähigkeit des Aktors im Wesentlichen von der Überdeckung der Flanken von Stator und Läufer zueinander abhängt und deshalb auch die

winkelgerechte Einpressung des Stators in die HSK63-Aufnahme von entscheidender Bedeutung ist, wurde eine Referenzmarke adaptiert. Dafür wurde dem Stator auf der Seite der HSK63-Aufnahme eine radiale Bohrung hinzugefügt, in der ein eingepresster Passstift für die winkelgerechte Ausrichtung beim Einpressen des Stators in die HSK63-Aufnahme sorgt, wie in Abbildung 39 zu sehen ist.

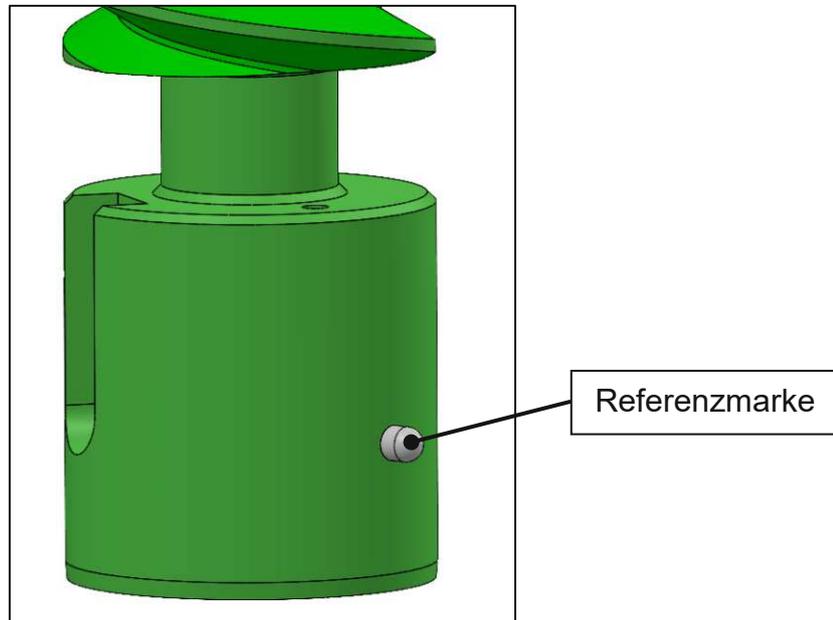


Abbildung 39: Stator Teil 1 mit eingepresstem Passstift als Referenzmarke

6.3. HSK63-Aufnahme

Wie bereits erwähnt, wurde für einen genaueren und effizienteren Zusammenbau eine Referenzmarke zwischen Stator und HSK63-Aufnahme definiert. Als Gegenstück zum Stator und den eingepressten Passstift wurde bei der HSK63-Aufnahme eine Nut eingefräst, mit der eine winkelgerechte Ausrichtung beim Einpressen des Stators in die Aufnahme ermöglicht wird. Ebenso wurde eine weitere Nut in die HSK63-Aufnahme eingefügt, die mehr Platz für die Kabelführung bietet und somit den Zusammenbau zusätzlich erleichtert. Abbildung 40 zeigt die überarbeitete HSK63-Aufnahme mit den durchgeführten Änderungen.

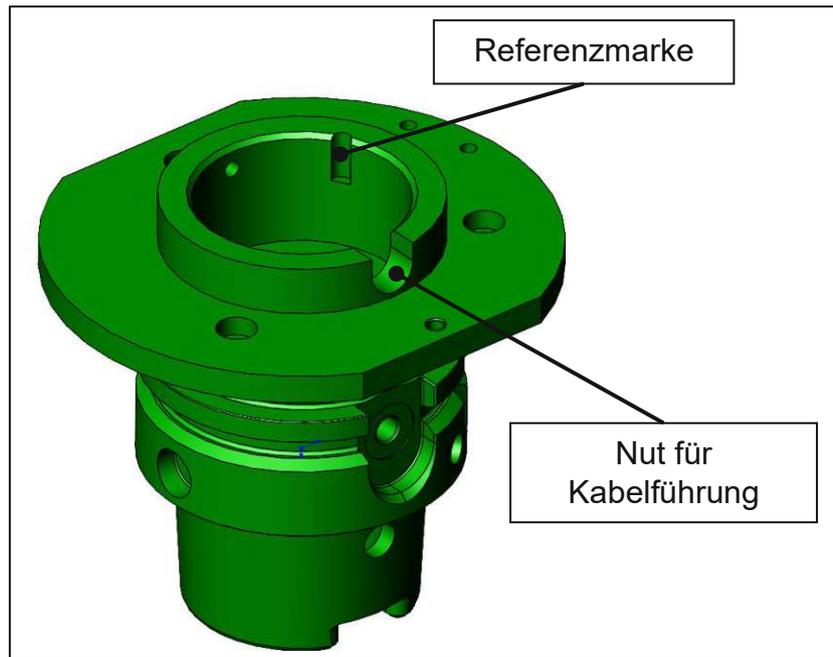


Abbildung 40: HSK63-Aufnahme im überarbeiteten Zustand

6.4. Läufer

6.4.1. Referenzmarke

Um das Zusammenspiel zwischen Stator, HSK63-Aufnahme und Läufer zu komplettieren, wurde auch der Läufer mit einer Referenzmarke versehen. Die winkeltreue Ausrichtung des Läufers gegenüber dem Stator erfolgt über das Führungsblech und dadurch über die Gewindebohrungen im Läufer. Aus diesem Grund war es ausreichend, eine Referenzmarke zu definieren, die eine exakte Ausrichtung der Gewindebohrungen zur Innenkontur des Läufers erlaubt. Dafür wurde im Zuge der Fertigung der Innenkontur, bei der die Winkellage des Läufers in der Drehmaschine bekannt ist, eine Fläche außerhalb der fertigen Kontur angebracht, welche auch in Abbildung 41 zu sehen ist. Bei der zweiten Aufspannung des Läufers, bei der die Gegenseite überarbeitet wird, dient diese Fläche als Referenz für die Ausrichtung der Winkellage und wird durch dessen Bearbeitung entfernt, da im Anschluss daran die Geometrie des Läufers selbst für die Ausrichtung verwendet werden kann.

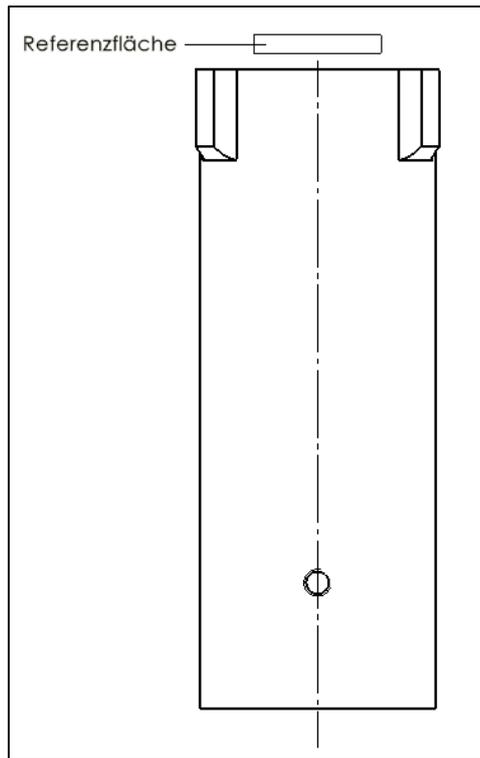


Abbildung 41: Referenzfläche des überarbeiteten Läufers

6.4.2. Bohrung zur Kontrolle der Überdeckung

Eine weitere Änderung, die für den Zusammenbau und die Höheneinstellung des Läufers von Bedeutung ist, ist die Adaptierung einer radialen Kontrollbohrung an der Außenseite des Läufers. Vorteil dieser Bohrung ist das nachträgliche Überprüfen der Überdeckung der Flanken von Stator und Läufer im zusammengebauten Zustand, wie dies auch in Abbildung 42 zu erkennen ist.

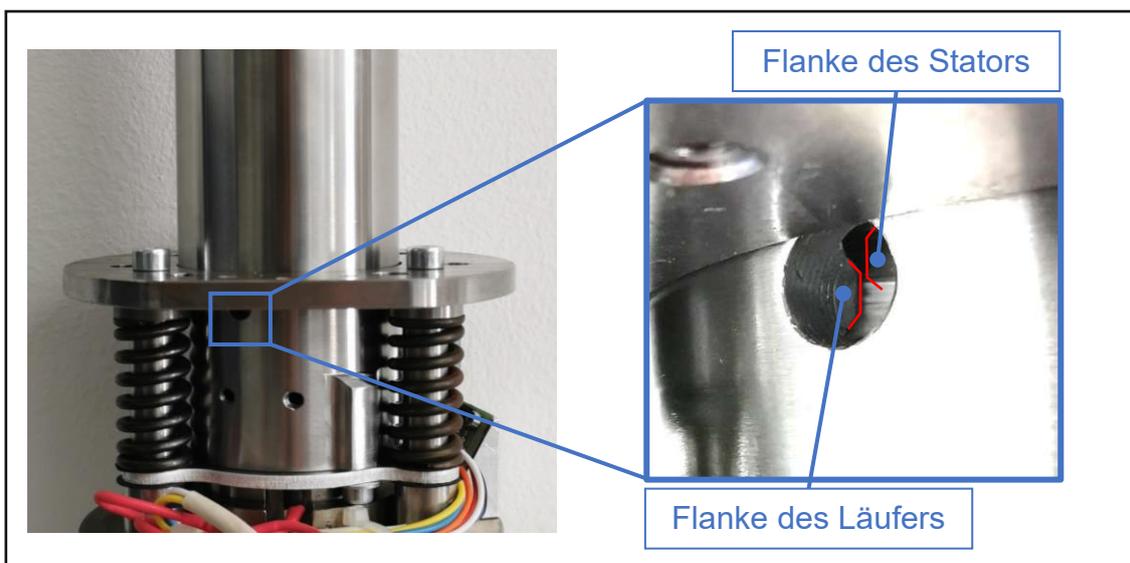


Abbildung 42: Kontrollbohrung zur Überprüfung der Überdeckung der Flanken von Stator und Läufer im eingebauten Zustand

Die Feinjustierung des Läufers über die Unterlegscheiben für die erforderliche, minimale Überdeckung von etwa 0,1 – 0,2 mm hat bereits erfolgt. Die Verwendung dieser Kontrollbohrung bedarf eines genauen Blickes. Ist die Überdeckung in Abbildung 42 nicht exakt feststellbar, so ist diese am realen Aktor doch sehr gut zu erkennen und hat sich somit als bewährt herausgestellt.

6.5. Gehäuse

Beim Zusammenbau des Aktors waren die Arbeitsschritte beim Anbringen des Gehäuses durch dessen Konstruktion vorgegeben. Zuerst wurden alle Leitungen und Kupferdrähte, welche vom Aktor zum Beckhoff-Stecker führen, durch die Bohrung im Gehäuse durchgeführt. Erst im Anschluss daran konnten diese Leitungen mit jenen des Steckers verlötet und der Stecker an das Gehäuse angeschraubt werden. Bei jeder nachträglichen Inspektion des Aktors bzw. bei Änderungen an der Höheneinstellung des Läufers musste die Lötverbindung gelöst und im Anschluss daran wieder neu verbunden werden. Zur Beschleunigung und Vereinfachung dieses Vorgangs wurde das Gehäuse auf einer Seite aufgefräst. Abbildung 43 zeigt die Änderung am Gehäuse sowie den Zusammenbau des neuen Gehäuses mit den restlichen Komponenten des Aktors.

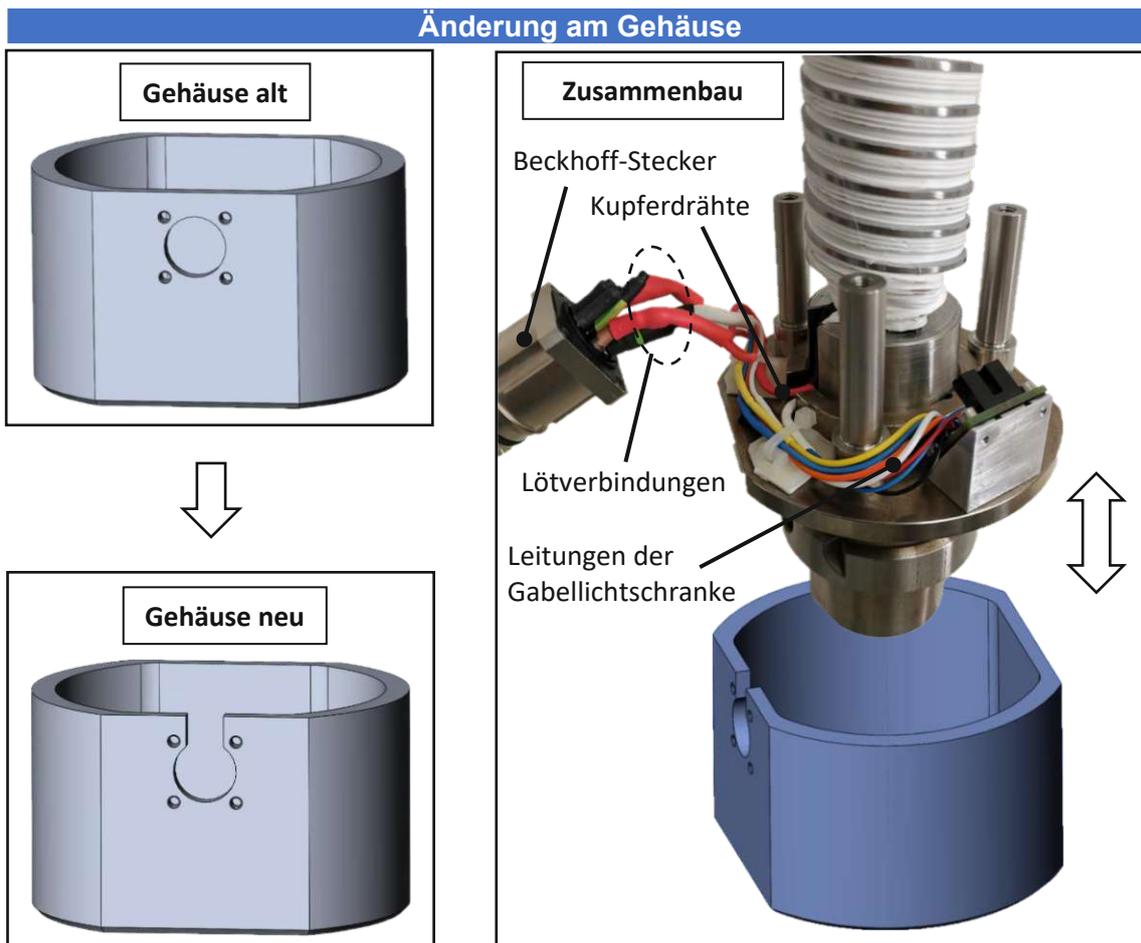


Abbildung 43: konstruktive Änderung des Gehäuses
links oben: ursprüngliches Gehäuse - links unten: überarbeitetes Gehäuse
rechts: Zusammenbau des überarbeiteten Gehäuses mit weiteren Komponenten des Aktors

Mit dieser Freistellung des Gehäuses ist es nun möglich, zuerst den Kupferdraht und die Leitungen der Gabellichtschränke an die Leitungen des Beckhoff-Steckers anzulöten und anschließend das Gehäuse zu montieren. Für die Demontage des Gehäuses müssen lediglich die Schrauben des Beckhoff-Steckers und nicht die gesamten Lötverbindungen gelöst werden. Dies ermöglicht eine schnelle Zugänglichkeit bei etwaigen nachträglichen Höheneinstellungen des Läufers.

6.6. Messsystemhalterung

Für die Halterung des Messsystems, genauer der Platine inkl. der Gabellichtschränke, wurde bisher ein 3D-Druckbauteil aus Kunststoff verwendet. Wegen dessen filigraner Ausführung, speziell im Bereich der Schraubenverbindung zwischen Halterung und HSK63-Aufnahme, wurde diese grundüberarbeitet. Aufgrund der oszillierenden Bewegung beim Hämmern und der sich daraus ergebenden Vibrationen am Aktor

wurde als Material anstatt Kunststoff nun Aluminium gewählt, wodurch ein genaueres Aufnehmen der Messdaten zu erwarten ist. Die filigrane Stufe, die für die Schraubenbefestigung von oben verantwortlich war, wurde entfernt und durch eine Schraubenbefestigung von unten ersetzt. Die ausgefrästen Freiflächen auf der Oberseite dienen dem ebenen Aufliegen der Platine, da diese durch das Anlöten der Leitungen mit Zinn als Lötzusatz eine Unebenheit hervorrufen würde. Die alte sowie die neue Halterung und deren Änderungen zwischen den beiden ist in Abbildung 44 dargestellt.

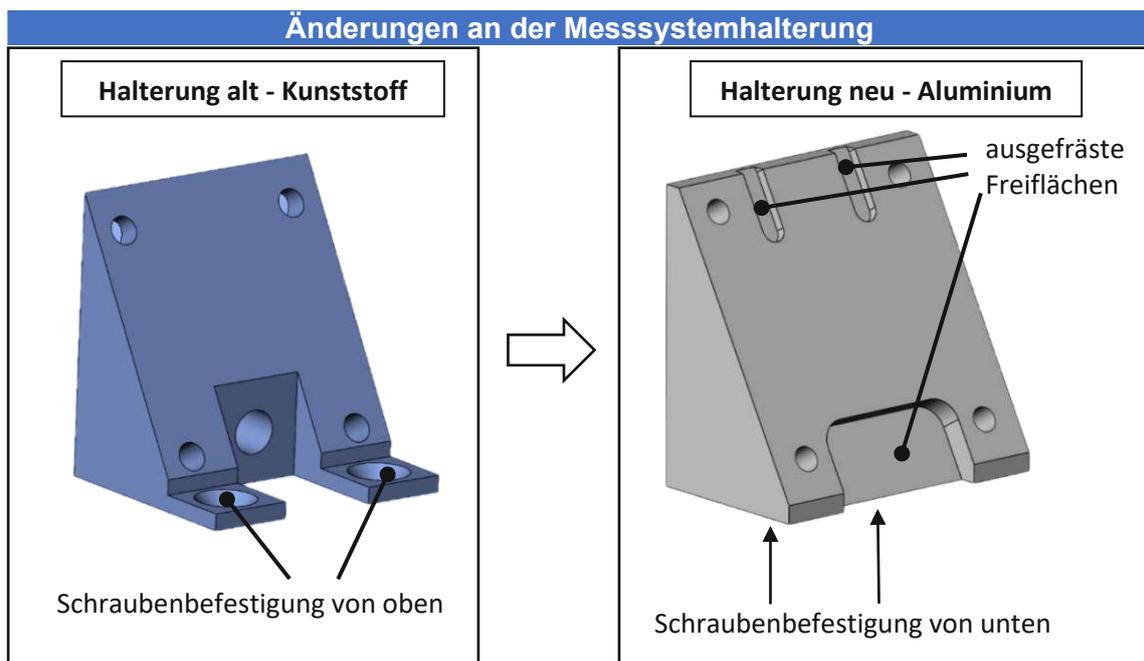


Abbildung 44: Überarbeitung der Messsystemhalterung – Änderung des Materials und konstruktive Anpassungen

6.7. Grundplatte

Die Grundplatte, welche mit den Federbolzen mit Schrauben verbunden ist und der Aufnahme der Federkräfte dient, wurde ebenfalls angepasst. Aus den durchgeführten Versuchsreihen und dem bereits erwähnten Phänomen der pneumatischen Feder (siehe Kapitel 5.6.2) geht hervor, dass sich der Hub mit eingeschalteter Druckluftkühlung im Vergleich zum möglichen Hub ohne Druckluft verkleinert. Der Grund dafür könnte an einem sich durch die durchströmende Druckluft aufbauenden Luftpolster liegen, der ein vollständiges Zurückfahren des Läufers in die Ausgangsposition verhindert. Infolgedessen verringert sich die verbleibende Überdeckung zwischen Stator und Läufer und der Läufer erreicht nicht mehr dieselbe Hublänge wie dies aus der Startposition möglich wäre. Um Abhilfe zu schaffen, wurde

der Grundplatte zusätzliche Entlüftungsbohrungen versehen, um ein schnelleres Entweichen der Druckluft und somit einen Abbau des Luftpolsters zu gewährleisten, wie in Abbildung 45 ersichtlich ist. Eine weitere Änderung betrifft die innere, zentrale Bohrung der Grundplatte. Es wurde festgestellt, dass diese Bohrung exakt denselben Durchmesser aufweist wie die des Gegenstückes (Außendurchmesser des Läufers) und es somit beim Zusammenbau sehr schnell zu einer Selbsthemmung zwischen dem Läufer und der Grundplatte kommen kann.

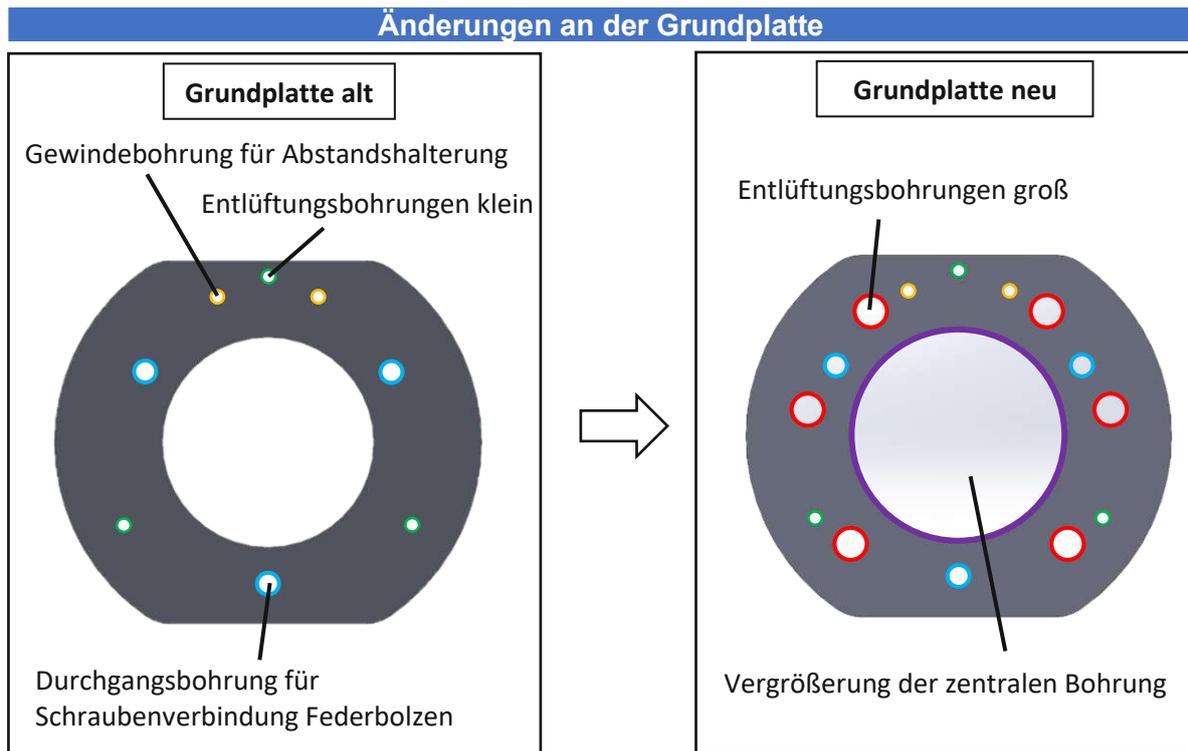


Abbildung 45: Überarbeitung der Grundplatte – Hinzufügen von zusätzlichen Entlüftungsbohrungen und Vergrößerung der zentralen Bohrung

6.8. Federbolzen

Die Federbolzen fungieren einerseits als Verdrehsicherung des Führungsblechs. Andererseits sind diese auch maßgeblich verantwortlich für eine exakte Höheneinstellung des Läufers und somit der Überdeckung zwischen Stator und Läufer. Bei der Höheneinstellung des Läufers werden den Federbolzen Passscheiben im Zehntel-Millimeter-Bereich sowie eine Gummischeibe unterlegt, um die Überdeckung mit den bereits genannten Methoden (siehe Kapitel 4.1.1) auf 0,1 – 0,2 mm einzustellen. Da jegliche Abweichung von diesem Zielwert der Überdeckung zu einer verminderten Leistung des Aktors führen könnte, müssen auch die Federbolzen gewissen Anforderungen entsprechen. Aus diesem Grund wurde den Federbolzen auf

beiden Seiten, welche als Auflagerfläche zur Höheneinstellung dienen, ein Freistich hinzugefügt, um die durch die Drehbearbeitung entstandenen Radien des Drehmeißels zu entfernen und somit eine gerade Auflagerfläche zu gewährleisten. Ebenfalls wurde die Stufe zwischen den Auflagerflächen mit einer kleineren Toleranz versehen, um eine weitere Fehlerquelle zu verhindern. Die Federbolzen im eingebauten Zustand als auch die Überarbeitungen dieser sind in Abbildung 46 ersichtlich.

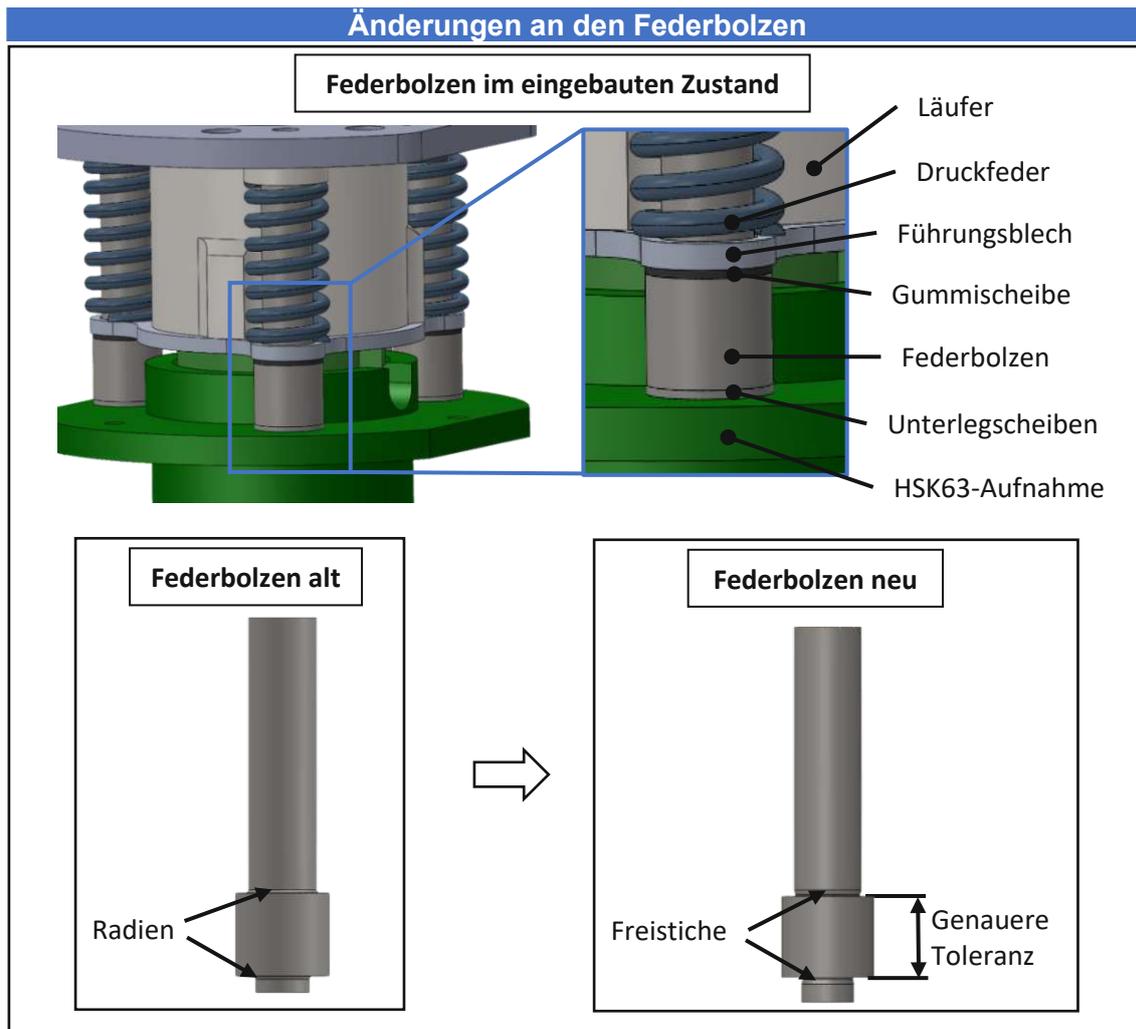


Abbildung 46: Federbolzen im eingebauten Zustand und Änderungen zwischen altem und neuem Federbolzen

6.9. Zusammenbau der überarbeiteten Aktorik

Mit den in den obigen Unterkapiteln 6.1 – 6.8 erläuterten Änderungen wurden die genannten Einzelteile neu gefertigt, wenn dies notwendig war, und lediglich überarbeitet, wenn dies möglich war. Der anschließende Zusammenbau des Aktors erfolgte dabei nach derselben Vorgehensweise wie in Kapitel 4.1.1 geschildert, mit der

Ausnahme, dass die Ausrichtung der Komponenten HSK63-Aufnahme, Stator und Läufer zueinander durch die vorhandenen Referenzmarken beschleunigt werden konnte. Der überarbeitete, neu zusammengebaute Aktor wird in Abbildung 47 zusammengefasst dargestellt. Links ist der in die HSK63-Aufnahme eingepresste Stator mit dem gewickelten Kupferdraht und angebrachten Temperatursensor zu sehen. Das umwickelte Band aus Polytetrafluorethylen dient dabei lediglich als Schutz des Kupferdrahtes und soll diesem unterstützend auf Position halten. In der Mitte dieser Abbildung sind bereits alle Komponenten innerhalb des Gehäuses angebracht sowie die Leitungen und Kupferdrähte verlötet. Die Höheneinstellung des Läufers über die Unterlegscheiben hat bereits erfolgt und die Messsystemhalterung inkl. der Platine mit der Gabellichtschranke ist montiert. Im rechten Teil der Abbildung ist mit dem Anbringen des Gehäuses, mit Ausnahme der Anschlüsse für Druckluft und KSS, der Zusammenbau vollständig abgeschlossen.

Zusammenbau der überarbeiteten Aktorik

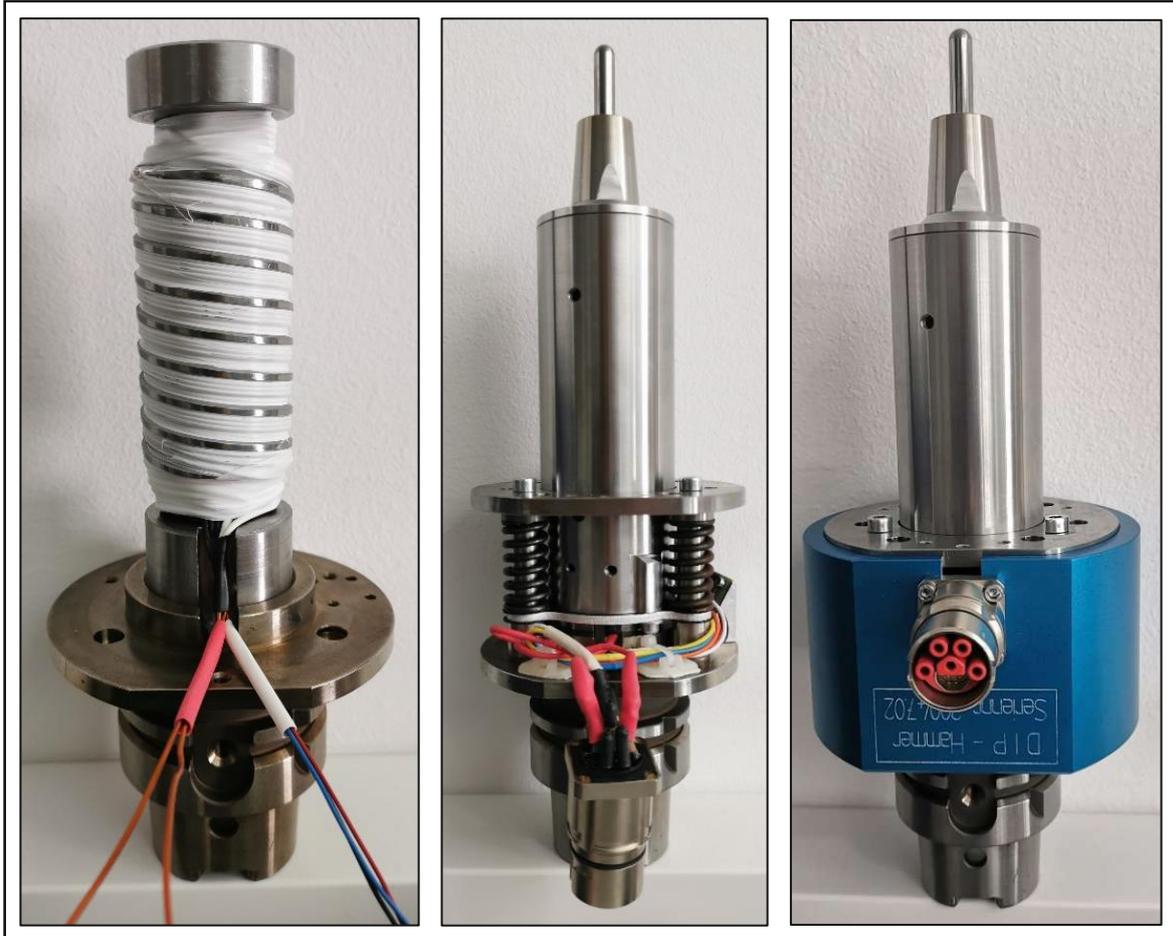


Abbildung 47: Erneuter Zusammenbau der überarbeiteten Aktorik; links: Stator in HSK63-Aufnahme eingepresst - Kupferdraht und PTFE-Band gewickelt und Temperatursensor implementiert; mittig: Alle Komponenten innerhalb des Gehäuses inkl. Messsystemhalterung montiert und Leitungen verlötet - Höheneinstellung des Läufers hat bereits erfolgt; rechts: Zusammenbau mit Ausnahme der Anschlüsse für Druckluft und KSS abgeschlossen

Wichtig zu erwähnen sei hier, dass aufgrund der in Kapitel 5.4 ermittelten hohen Wärmeentwicklung des Systems, welche hauptsächlich auf das Verhältnis von einem zu dünnen Kupferdrahtdurchmesser der Spule zur Höhe der Stromstärke zurückzuführen ist, wird bei dieser Aktorvariante ein Kupferdraht mit einem Durchmesser von 1,12 mm anstatt den bisher verwendeten 1 mm eingesetzt. Dies führt zu einer Vergrößerung der Querschnittsfläche des Kupferdrahtes von 25%. Da der ohnehin schon sehr begrenzte Platz beim Wickeln des Kupferdrahtes auf das Statorgewinde und deren Umwicklungspunkte an den Enden nun auch noch durch einen größeren Drahtdurchmesser erschwert wurde, war die Anzahl der maximal möglichen Wicklungen bereits mit 13 erreicht. Dennoch ergibt sich durch den vergrößerten Kupferdrahtdurchmesser in Kombination mit den 13 Wicklungen eine Steigerung des Kupferdrahtvolumens von 21% im Vergleich zur ursprünglichen

Ausführung. Die genannten Werte sind der Übersicht halber nochmals in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Änderungen und Auswirkungen des vergrößerten Kupferdrahtes

Bezeichnung	Wert		Einheit	Veränderung gegenüber der Ausgangsvariante
	Alt	Neu		
Durchmesser	1	1,12	mm	+12%
Querschnittsfläche	0,785	0,985	mm ²	+25%
Anzahl der Wicklungen	15	13	-	-13%
Länge	16,5	16	m	-3%
Volumen	12,96	15,76	cm ³	+21%

Da die Masse des Läufers und aller am Läufer befestigten Teile für die Berechnung der kinetischen Energie beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche von entscheidender Bedeutung ist, wurde diese vor dem finalen Zusammenbau mit 0,886 kg gemessen.

7. Systemtestung der überarbeiteten Aktorik

Nach den erlangten Erkenntnissen aus den Versuchsergebnissen in Kapitel 5 und den daraus angewandten Überarbeitungen in Kapitel 6 wurde das System in diesem Kapitel erneut mehreren Versuchen unterzogen. Analog zu den in Kapitel 5 durchgeführten Versuchsreihen wird die überarbeitete Aktorik nach ähnlichen Kriterien getestet, um einen Vergleich zwischen den zwei Aktorvarianten herzustellen. Aufgrund des neuerlichen Zusammenbaus des Aktors wurde das Messsystem kalibriert und die eine erneute Spulencharakterisierung durchgeführt. Neben den auftretenden Kräften, welche der Aktor generiert bzw. welche vom HM-Stößel auf das Werkstück übertragen wurden, wurde erneut das Temperaturverhalten bei unterschiedlichen Eingangsparametern ermittelt. Weiters wurden die Hammerkopfgeschwindigkeit und die kinetische Energie bestimmt sowie verbleibender Eindrücke nach dem Hämmern ausgewertet.

7.1. Kalibrierung des Messsystems

Aufgrund der erneuten Montage des Messsystems am Läufer, welches in die Gabellichtschanke eintaucht und damit für die Aufnahme der Wegmessdaten verantwortlich ist, musste dieses vor Beginn der Versuchsreihen in seiner Position festgelegt werden. Wie bereits in Kapitel 4.1.3 erläutert, liefert das Wegmesssystem ein Ausgangssignal zwischen 0 – 10 Volt, welches der Position des Schwertes proportional ist. Voraussetzung dafür ist die Position des Schwertes, welches sich im linearen Bereich des Ausgangssignals befinden muss. Um dies zu bewerkstelligen, wurde der Aktor in die Werkzeugmaschine eingespannt und die Werkzeugaufnahme inkl. dem HM-Stößel gegen eine Werkzeugaufnahme mit Schraube getauscht, um eine starre Verbindung zwischen Aktor und dem im Schraubstock eingespannten Aluminiumquader herstellen zu können, wie in Abbildung 48 zu sehen ist.

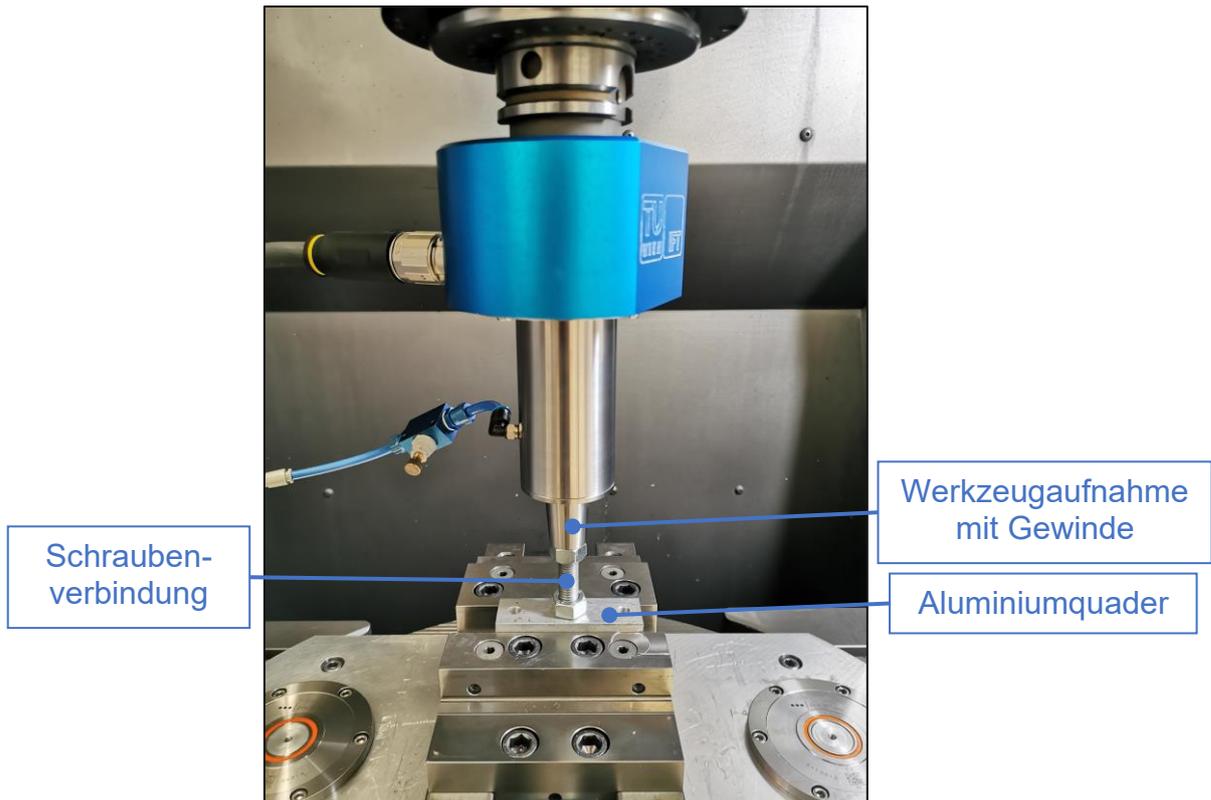


Abbildung 48: Versuchsaufbau für die Kalibrierung des Schwertes

Durch diesen Versuchsaufbau war es möglich, den Aktor durch ein schrittweises Verfahren der Werkzeugmaschine in vertikaler Richtung nach oben zu bewegen und dabei das Ausgangssignal des Sensors zu dokumentieren. Dadurch konnte die optimale Position des Schwertes eruiert und in einem zweiten Versuch der lineare Bereich erneut getestet werden. Da das Wegmesssystem die Position des Schwertes zu jedem Zeitpunkt in der Einheit Volt und nicht in einer Längeneinheit angibt, dient der zweite Versuch ebenfalls zur Ermittlung des Umrechnungsfaktors für die Auswertung der Daten. Das daraus resultierende Diagramm ist in Abbildung 49 dargestellt und liefert einen Umrechnungsfaktor von $243 \frac{\mu m}{V}$.

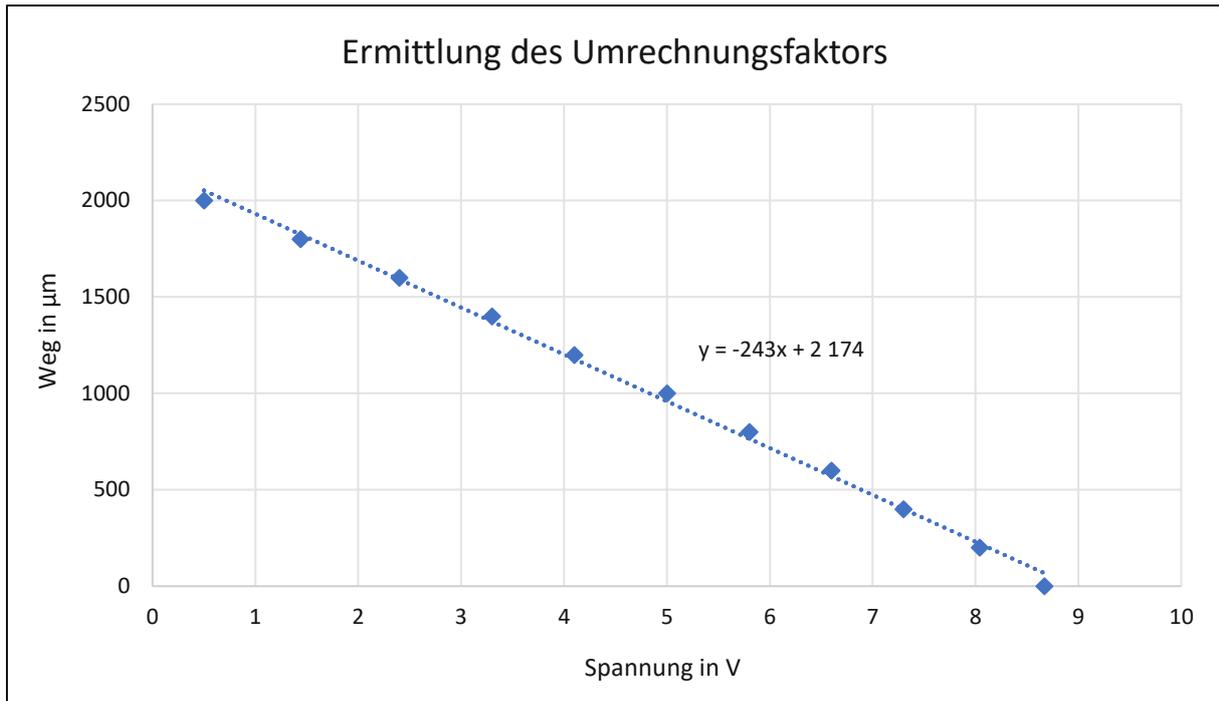


Abbildung 49: Ermittlung des Umrechnungsfaktors für die Auswertung der Messdaten nach erfolgter Schwerteinstellung am Läufer

Die in der Einheit Volt dokumentierten Wegmessdaten können mit der nachfolgenden Gleichung (10) in die gewünschte Längeneinheit umgerechnet werden.

$$x = (x_{gem} - x_0) * 243 \quad (10)$$

Dabei entspricht x der aktuellen Position in μm , x_{gem} dem gemessenen Längenwert zu diesem Zeitpunkt und x_0 dem gesetzten Nullposition zu Beginn der Messung in Volt.

Nach erfolgter Kalibrierung des Messsystems wurde der Maximalhub der überarbeiteten Aktorik ermittelt, um für die folgenden Versuchsreihen den Bereich der möglichen Testkonfigurationen zu definieren. Dafür wurde der Aktor in der Werkzeugmaschine über dem Werkstück platziert, ein Schlag mit einer Einschaltzeit von 1,5 ms ausgelöst und anschließend in der Position sowohl horizontal als vertikal bewegt. Beginnend mit einem Abstand von 0,2 mm zwischen Aktor und Werkstückoberfläche wurde dieser schrittweise erhöht und ergab einen Maximalhub von 2,2 mm. Aufgrund der kurzen Laufzeit der Versuche von wenigen Sekunden wurden diese ohne Verwendung des Kühlsystems durchgeführt. Die auf der Werkstückoberfläche verbliebenen Eindrücke und die dazugehörigen Abstände vom Aktor zum Werkstück sind in Abbildung 50 zu sehen.

Ermittlung des Maximalhubes der überarbeiteten Aktorik

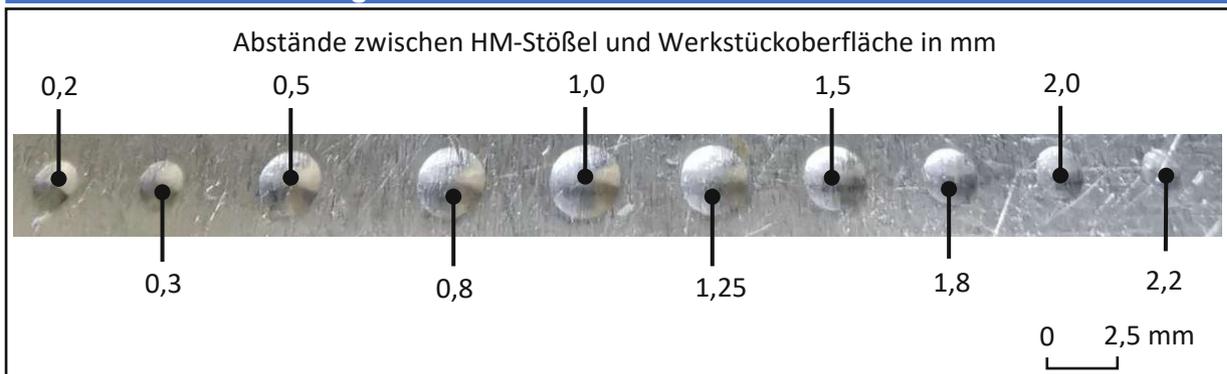


Abbildung 50: Verbliebene Eindrücke an der Werkstückoberfläche bei der Ermittlung des Maximalhubes der überarbeiteten Aktorik bei einer Einschaltdauer von 1,5 ms

Gut erkennbar ist dabei die variierende Größe der Eindrücke, welche bei einem Werkstückabstand zwischen 0,8 – 1,25 mm den maximalen Durchmesser erreichen. Die Verbesserung des Hubes kann einerseits mit dem größeren Kupferdrahtquerschnitt und der daraus resultierenden erhöhten Stromstärke begründet werden. Andererseits ist dies vor allem auf die größere Flankenbreite von Stator und Läufer und der sich dadurch optimierten Überdeckung zurückzuführen, da der Weg von der Ausgangsposition bis zur vollständigen Überdeckung der Flanken zueinander wesentlich größer als bei der ursprünglichen Variante ist.

7.2. Spulencharakterisierung

Mit den genannten Änderungen (siehe Kapitel 6) und speziell der Erhöhung des Kupferdrahtdurchmessers der Spule wird der Aktor in diesem Unterkapitel einer neuerlichen Spulencharakterisierung unterzogen. Dabei sollen die Ausgangsparameter jenen von Kapitel 5.1 entsprechen, um einen direkten Vergleich darzustellen und mögliche Auswirkungen durch die Überarbeitung feststellen zu können.

Spannung und Stromstärke

Mit einer Frequenz von 200 Hz und einer Einschaltzeit der Gleichspannung (60V) von 1,5 ms ist der Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke in Abbildung 51 dargestellt.

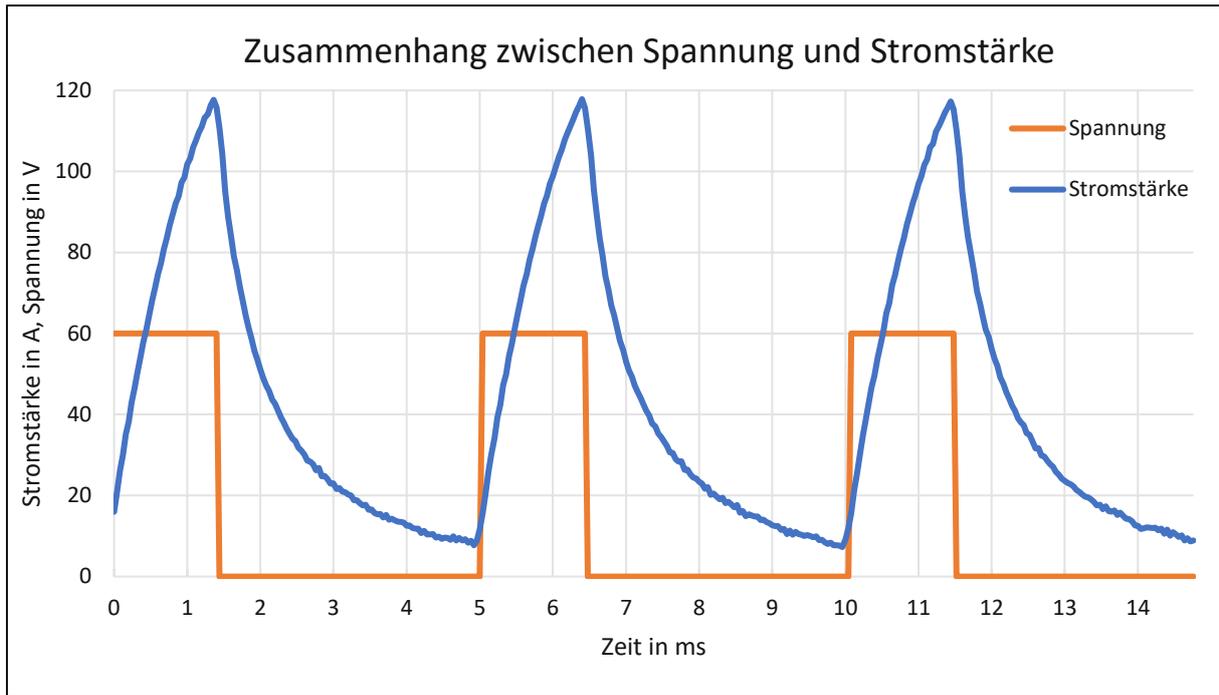


Abbildung 51: Systemverhalten zwischen Spannung und Strom der überarbeiteten Aktorik bei einer Frequenz von 200 Hz und einer Einschaltzeit der Gleichspannung (60V) von 1,5 ms

Aus obiger Abbildung 51 ist gut erkennbar, dass das Verhalten zwischen Spannung und Stromstärke unverändert bleibt. Durch das Anlegen der Spannung in konstanten Abständen von 5 ms für jeweils eine Dauer von 1,5 ms steigt die Stromstärke in diesem Bereich wieder kontinuierlich an. Ein Maximum der Stromstärke von 119,5 A wird am Ende der angelegten Spannung erreicht. Sobald keine Spannung mehr vorhanden ist, beginnt sich der Wert der Stromstärke wieder zu senken.

Vergleicht man die Stromstärke des überarbeiteten Aktors (neu) mit jener der Ursprungsvariante (alt), ergibt sich aufgrund der größeren Querschnittsfläche des Kupferdrahtes eine Steigerung der Maximal-Stromstärke von etwa 26%, siehe Abbildung 52. Die angelegte Spannung bleibt unverändert und wird daher einmalig dargestellt.

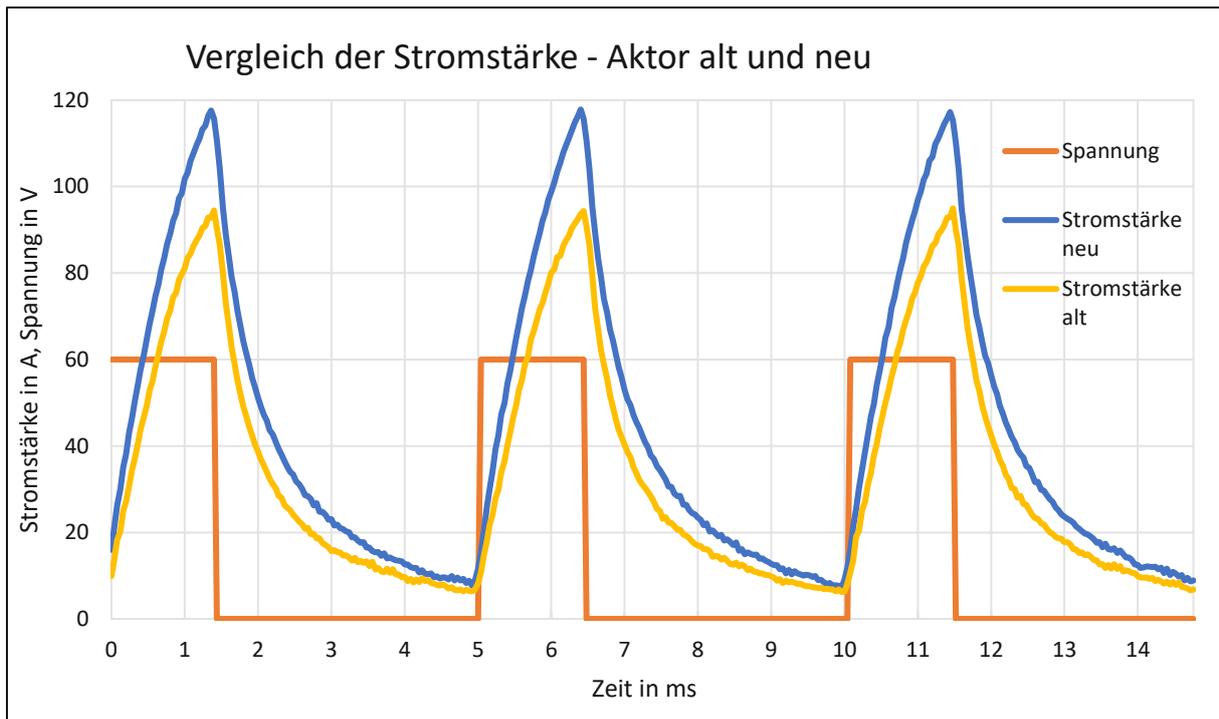


Abbildung 52: Gegenüberstellung der generierten Stromstärken zwischen Aktor alt und neu bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einer Frequenz von 200 Hz

Widerstand

Wie bereits in Kapitel 6.9 erwähnt, wurde aufgrund des vergrößerten Kupferdrahtquerschnittes die maximale Anzahl der Wicklungen auf 13 reduziert. Mit der sich daraus ergebenden Kupferdrahtlänge von 16 m wurde erneut der elektrische Widerstand der Spule mit den Gleichungen (2) und (3) bestimmt und in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Elektrischer Widerstand der Spule mit vergrößertem Kupferdrahtdurchmesser

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Anzahl der Wicklungen	n	13	-
Kupferdraht-Durchmesser	d	1,12	mm
Kupferdraht-Länge	L	16	m
Spezifische Widerstand von Kupfer bei 20°C	ρ	0,0174	$\frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$
Elektrischer Widerstand der Spule bei 20°C	R	0,283	Ω

Die anschließende experimentelle Messung des Widerstandes der vollständig gewickelten Spule mittels Multimeter ergab einen Wert von 0,3 Ω . Somit lässt sich der theoretische elektrische Widerstand bei einer Temperatur von 20°C von 0,283 Ω in

guter Näherung bestätigen. Im Vergleich zur ursprünglichen Aktorik und dem berechneten elektrischen Widerstand der Spule von $0,366 \Omega$ bedeutet dies eine Senkung von 23%. Dies erscheint durch die Erhöhung des Kupferdrahtdurchmessers nachvollziehbar.

Verlustleistung

Für die Berechnung der Verlustleistung musste erneut das Stromsignal gemittelt werden, wofür der Bereich zwischen 0 – 15 ms herangezogen wurde. Mit einer gemittelten Stromstärke von 42,83 A und der sich daraus ermittelten Verlustleistung von $P_V = 518 \text{ W}$ (Gleichung (4)) sind auch diese Werte deutlich höher als jene vor der Überarbeitung des Aktors. Bezogen auf die Verlustleistung der Ursprungsvariante mit 404 W ergab sich somit eine Erhöhung um 28%. Dies könnte zu einer erhöhten Wärmeentwicklung, welche durch die Bestromung der Spule verursacht wird, führen.

7.3. Auszugskraft

Für die Ermittlung der Auszugskraft wurde derselbe Aufbau wie in Kapitel 5.2 herangezogen, indem der Aktor mittels Schraube mit einer Kraftmessdose verbunden und mit Hilfe eines Aluminiumquaders im Schraubstock befestigt ist, siehe Abbildung 22. Ebenso lässt sich aus den Erkenntnissen dieses Kapitels schließen, dass die Auszugskraft lediglich bei Nullsetzung der Kraft nach jeder axialen Verschiebung von Bedeutung ist, da die Druckkraft, welche der HM-Stößel auf die Werkstückoberfläche ausübt, entscheidend für den Hämmerprozess ist. Des Weiteren ist die Höhe der Auszugskraft von der Überdeckung bzw. der Position von Läufer zu Stator abhängig, wie auch die Ergebnisse aus Kapitel 5.2.3 bestätigen. Aus diesen Gründen wurde die Auszugskraft erneut mit unterschiedlichen Einschaltzeiten und abhängig von der Auszugspositionen bei Nullsetzung der Kraft nach jeder axialen Verschiebung bestimmt, siehe Abbildung 53.

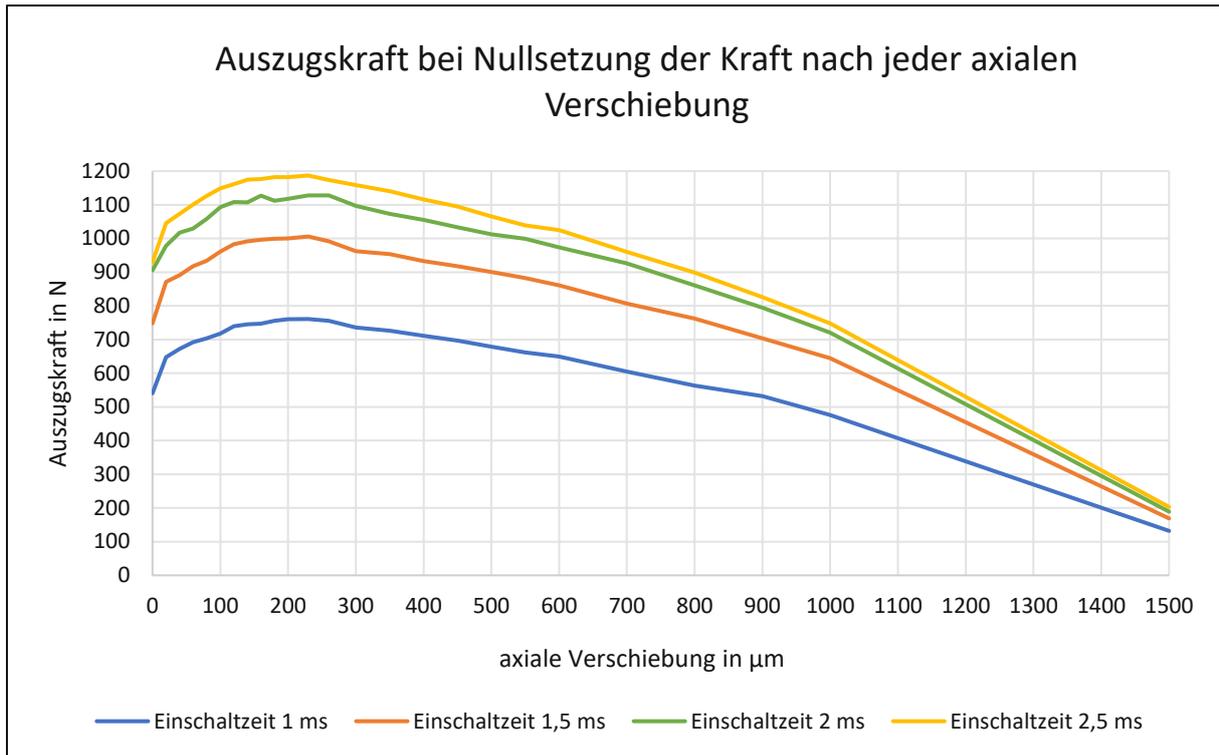


Abbildung 53: Auszugskraft der überarbeiteten Aktorik bei Veränderung der axialen Verschiebung

Gemessen wurden erneut die Auszugskräfte bei Einschaltzeiten zwischen 1 und 2,5 ms. Erwähnenswert ist dabei neuerlich der Anstieg der Auszugskraft bis zu einer Verschiebung von etwa 200 μm . Die höheren Stromimpulse, bedingt durch den größeren Kupferdrahtdurchmesser der Spule, machen sich auch bei dieser Messung durch deutlich höhere Auszugskräfte bemerkbar, wie Abbildung 54 zeigt. Vergleicht man die Auszugskraft des überarbeiteten Aktors (1187 N) mit der Auszugskraft der ursprünglichen Aktorik (888 N) bei einer Einschaltzeit von 2,5 ms, so ist eine deutliche Steigerung der Auszugskraft um 34 % zu erkennen.

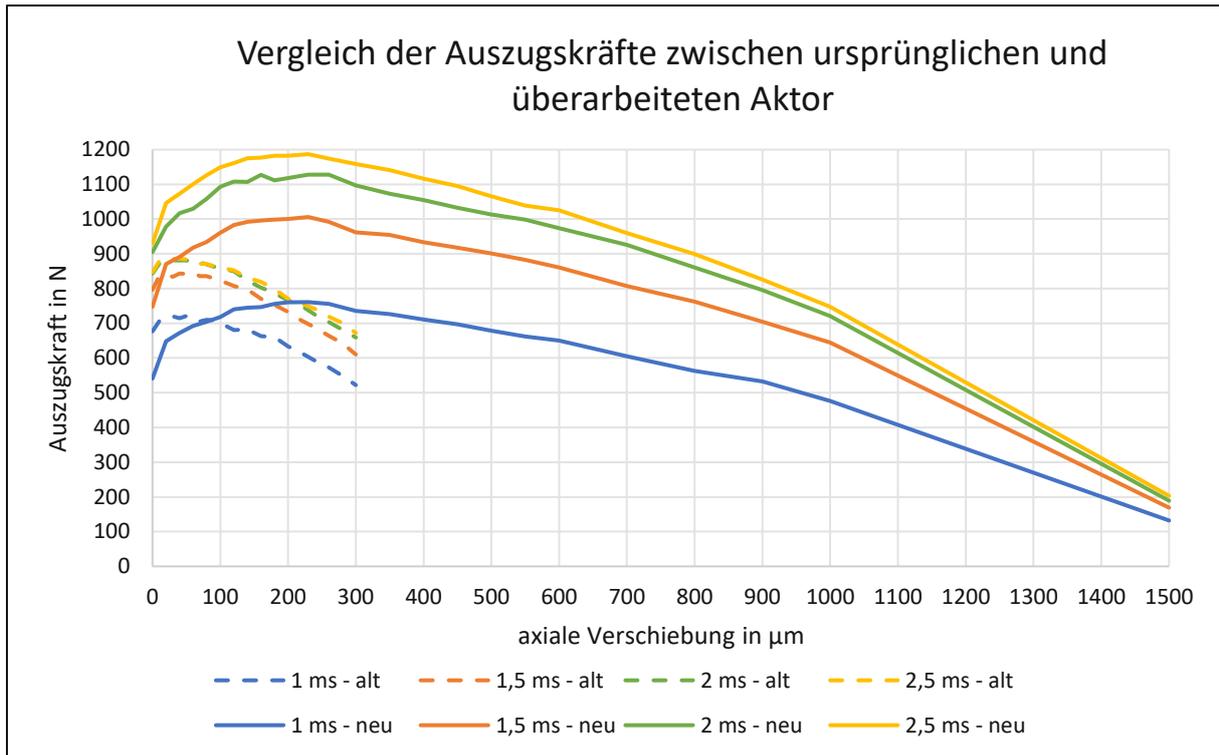


Abbildung 54: Gegenüberstellung der Auszugskräfte zwischen ursprünglicher und überarbeiteter Aktorik

Wie in obiger Abbildung 54 zu erkennen ist, befinden sich die Auszugskräfte der überarbeiteten Aktorik (neu) über einen größeren Bereich zwischen 100 µm und 500 µm auf hohem Niveau, wohingegen dieser Bereich bei der ursprünglichen Aktorik (alt) über einen deutlichen kürzeren Bereich vorliegt. Begründet werden kann dies erneut mit der größeren Flankenbreite von Stator und Läufer, die es ermöglicht, über einen größeren Bereich eine höhere Auszugskraft zu generieren.

Im Anschluss an diese Versuchsreihe und der Erkenntnis, dass die Auszugskraft bis zu einer axialen Verschiebung von etwa 200 µm ansteigt, wurde die Höhenposition des Läufers mittels Unterlegscheiben um diesen Wert angepasst.

7.4. Kontaktkraft

Für die Bestimmung der Kontaktkraft, welche die auftreffende Kraft des HM-Stößels auf die Werkstückoberfläche darstellt, wurde ein weiteres Mal der Versuchsaufbau der Ursprungsvariante herangezogen, siehe Kapitel 5.3.1. Da die überarbeitete Aktorik nur wenige Tage nach der Fertigstellung am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien für experimentelle Versuche zur Verfügung stand, wurde die Versuchsdurchführung für die Messung der Kontaktkraft abgeändert umgesetzt. Anstatt der 10 x 10 mm Feldbearbeitung wurden wenige Schläge bei stillstehender Werkzeugmaschine mit einer Frequenz von 5 Hz auf das im Messgerät eingespannte

Werkstück gehämert. Als Werkstoff wurde jener Werkzeugstahl von Kapitel 5.3.1 verwendet, um anschließend einen zulässigen Vergleich der Resultate durchführen zu können. Weiters wurde für die Bearbeitung ein Werkstückabstand von 0,3 mm und eine Einschaltzeit von 1,5 ms gewählt. Dadurch, dass der Aktor bei dieser Versuchsdurchführung in der Werkzeugmaschine in Position gehalten wird und lediglich die Hubbewegung in z-Richtung ausführt, waren auch nur diese Kräfte von Bedeutung für den Vergleich mit der Ursprungsvariante. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind in Abbildung 55 dargestellt.

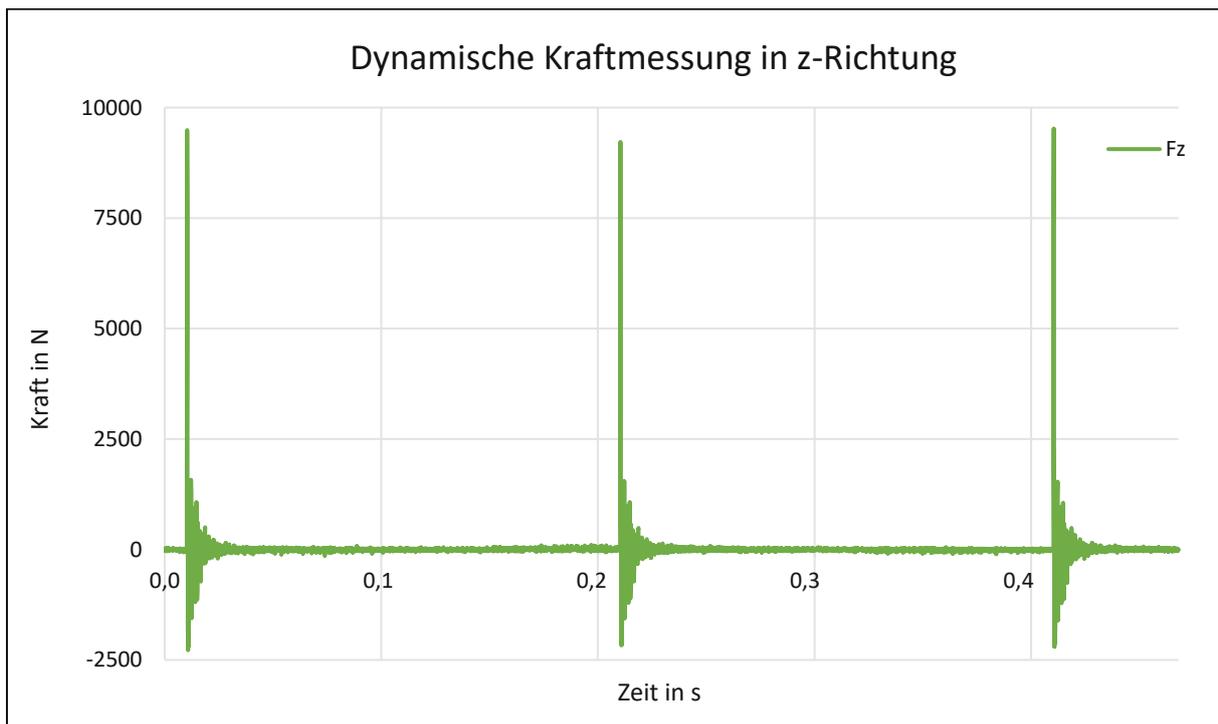


Abbildung 55: Dynamische Kraftmessung – Auswertung der auftreffenden vertikalen Kräfte bei einer Frequenz von 5 Hz, einem Werkstückabstand von 0,3 mm und einer Einschaltzeit von 1,5 ms

In Abbildung 55 die vertikalen Kontaktkräfte von drei aufgenommenen Schlägen zu sehen, wobei diese jeweils mit einer Schwingung um die Nulllage abklingen. Es zeigt sich, dass die auf die Werkstückoberfläche auftreffenden Kräfte mit einem Maximalwert von 9544 N annähernd um den 300% höher sind als die der ursprünglichen Aktorik (3340 N). Überlagert man den ersten auftreffenden Stoß der ursprünglichen mit der überarbeiteten Aktorik, so lässt sich diese Steigerung gut erkennen, wie Abbildung 56 verdeutlicht.

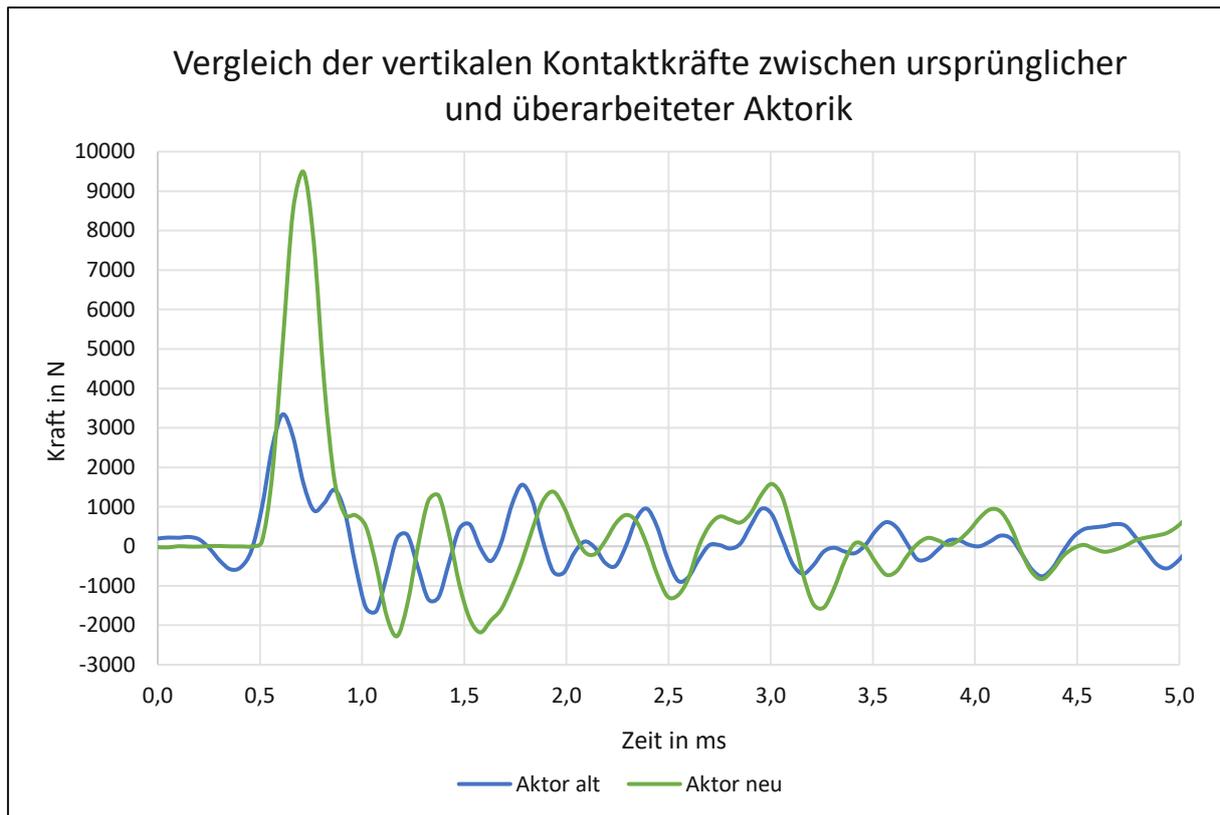


Abbildung 56: Gegenüberstellung der vertikalen Kontaktkräfte zwischen ursprünglicher und überarbeiteter Aktorik bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einem Werkstückabstand von 0,3 mm

Zurückzuführen ist dies einerseits auf die größere Flankenbreite von Stator und Läufer und der sich daraus ergebenden besseren Überdeckung und andererseits auf die erhöhte Stromstärke, die durch den größeren Kupferdrahtdurchmesser generiert werden kann.

Für die Messaufnahme der Kontaktkräfte wurde erneut das Mehrkomponenten-Dynamometer mit einem Lastbereich bis 10 kN eingesetzt. Da bei Versuchen mit einem größeren Werkstückabstand oder einer höheren Einschaltzeit davon auszugehen ist, dass die auf die Werkstückoberfläche auftreffenden Kräfte die 10kN-Grenze überschreiten würden und es aus zeitlichen Gründen nicht möglich war, ein Dynamometer mit einem größeren Lastbereich heranzuziehen, konnten diese weiteren Versuche nicht durchgeführt werden.

7.5. Temperaturentwicklung

Wie bereits bei der Ursprungsvariante des Aktors ist das thermische Verhalten auch bei der überarbeiteten Aktorik ein entscheidender Faktor für eine gute und stationäre Leistungsfähigkeit des Aktors. Für das Hämmern in längeren Zeitbereichen ist die Verwendung des Kühlsystems, bestehend aus Druckluft und Kühlschmierstoff,

unvermeidbar, um der entstehenden Wärmeentwicklung entgegenzuwirken. Aufgrund der umgesetzten Änderungen in der konstruktiven Auslegung des Stators, welche eine bessere Kühlleistung des Kühlschmierstoffs bewirken soll, muss vorerst erneut der Volumenstrom ermittelt werden. Durch die Verwendung desselben Behältnisses und der darauf befindlichen 5L-Markierung, siehe Kapitel 5.4, ergibt sich ein Volumenstrom von 6,2 l/min für den über die Innenkühlung der Werkzeugmaschine generierten KSS. Die mittels externer Pumpe erzeugten Volumenströme wurden hier vernachlässigt, da bereits die Messungen der Temperaturentwicklung der ursprünglichen Aktorik auf eine deutlich bessere Kühlung durch die Verwendung der Innenkühlung der Werkzeugmaschine schließen ließen.

Der Versuchsaufbau dieser Messung wurde wie in Abbildung 29 umgesetzt, mit der Ausnahme, dass die KSS-Zufuhr ausschließlich über die Innenkühlung der Werkzeugmaschine bereitgestellt wurde. Bei der Versuchsdurchführung wurde der Aktor wie auch schon bei der Ursprungsvariante über dem Werkstück platziert und während des gesamten Versuches in Position gehalten. Untersucht wurden die höheren Frequenzbereiche zwischen 80 und 190 Hz für eine Dauer von 180 Sekunden, wobei jeweils ein Versuch bei einem Abstand zum Werkstück von 0,3 mm und 1 mm durchgeführt wurden. Der Grund dafür liegt im verbesserten Hub der überarbeiteten Aktorik, wie dies bereits in Kapitel 7.1 erläutert wurde. Die für diesen Versuch notwendigen Parameter und ermittelten Werte sind in Tabelle 10 zusammengefasst und die Ergebnisse in Abbildung 57 dargestellt.

Tabelle 10: Parameter für die Durchführung der Temperaturmessungen der überarbeiteten Aktorik

Bezeichnung	Wert	Einheit
Volumenstrom	6,2	l/min
Einschaltzeit	1,5	ms
Abstand zum Werkstück	0,3 und 1	mm
Frequenzbereich	80 – 190	Hz

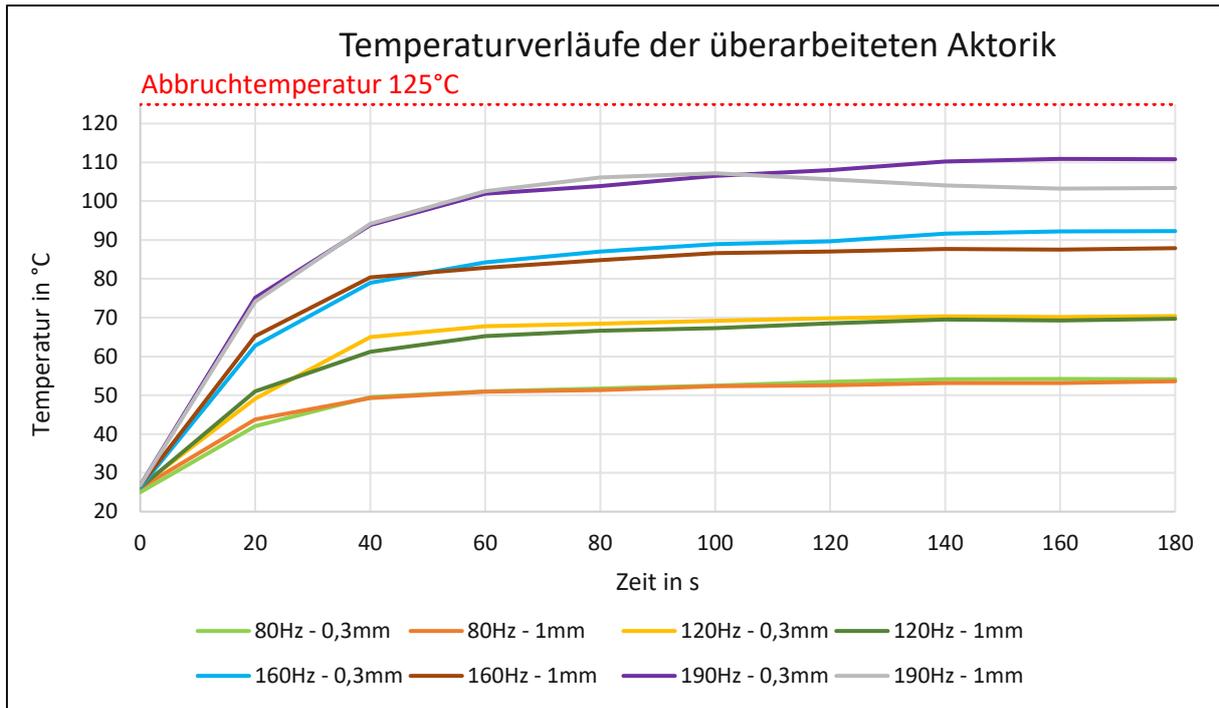


Abbildung 57: Temperaturverläufe der überarbeiteten Aktorik bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und der Verwendung der Innenkühlung

In Abbildung 57 ist zu erkennen, dass sich erneut nach ca. 120 Sekunden ein annähernd konstanter Temperaturzustand in der Spule eingestellt hat. Weiters lässt sich zeigen, dass die thermische Energieentwicklung unabhängig vom Abstand des HM-Stößels zum Werkstück und somit des Hubes ist, da die Temperaturwerte der jeweiligen Frequenzbereiche, bis auf eine minimale Abweichung bei einer Frequenz von 190 Hz, sich auf einem ähnlichen Niveau befinden. Auffällig ist allerdings die Höhe der einzelnen Temperaturverläufe. Stellt man die Temperaturverläufe zwischen der ursprünglichen und der überarbeiteten Aktorik bei einem Werkstückabstand von 0,3 mm gegenüber, so lässt sich dieser Unterschied verdeutlichen, siehe Abbildung 58.

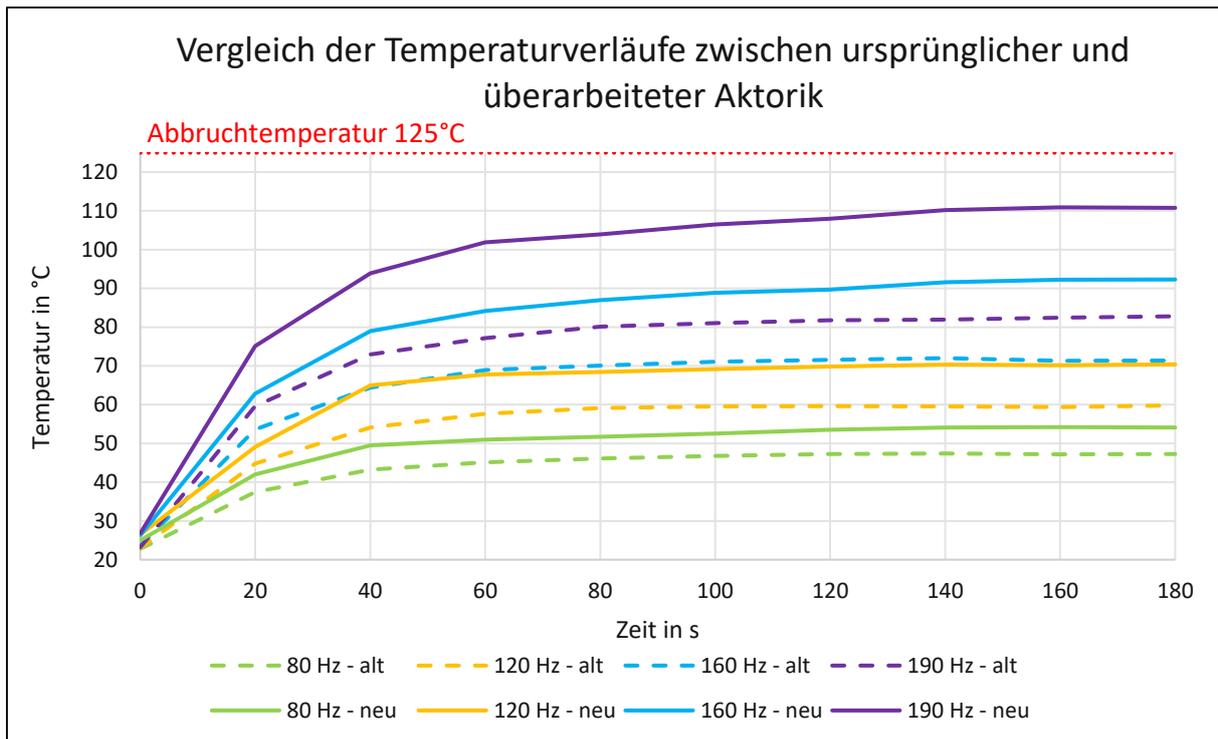


Abbildung 58: Gegenüberstellung der Temperaturverläufe zwischen ursprünglicher und überarbeiteter Aktorik bei einem Werkstückabstand von 0,3 mm und einer Einschaltzeit von 1,5 ms

In Abbildung 58 ist der Temperaturanstieg zwischen dem ursprünglichen und überarbeiteten Aktor in allen Frequenzbereichen erkennbar. Dabei wird die Abweichung im Temperaturverhalten mit steigender Frequenz höher. Vergleicht man das Temperaturniveau zwischen den Aktorvarianten bei einer Frequenz von 190 Hz, so lässt sich ein Temperatursprung von 83°C auf 110°C und somit eine Steigerung von 33% feststellen. Aufgrund der konstruktiven Änderungen des Stators, welche die Wärmeleitung in der Statorwand verbessern sollten und den Volumenstrom für die Abfuhr der Wärme erhöht haben, ist die Verbesserung nicht direkt erkennbar. Ein Grund dafür könnte der vergrößerte Kupferdrahtdurchmesser sein, der eine höhere Stromstärke zulässt und damit auch die Verlustleistung in der Spule um 28% steigen ließ, wie in Kapitel 7.2 erläutert wurde. Eine weitere Erklärung für die verminderte Kühlleistung könnte auf den Zeitraum der Testung zurückzuführen sein, da die Temperaturmessungen der Ursprungsvariante im Frühjahr bei einer Raumtemperatur (RT) von 22°C und die Messungen der überarbeiteten Aktorik im Sommer hingegen bei einer RT von 27°C durchgeführt wurden.

7.6. Hammerkopfgeschwindigkeit und kinetische Energie

Wie bereits in Kapitel 5.5 erläutert, ist die Geschwindigkeit beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche und die daraus resultierende kinetische Energie des Hammerkopfes eine wichtige Kenngröße für die Leistungsfähigkeit eines Hämmerystems. Da bei der überarbeiteten Aktorik der Hubbereich wesentlich größer als bei der Ursprungsvariante ist, wurde die Hammerkopfgeschwindigkeit und in weiterer Folge die kinetische Energie des HM-Stößels bei unterschiedlichen Abständen von Aktor zu Werkstück und verschiedener Einschaltzeiten ermittelt, wie in Tabelle 11 zusammengefasst ist.

Tabelle 11: Parameter für die Ermittlung der Hammerkopfgeschwindigkeit und der kinetischen Energie der überarbeiteten Aktorik

Bezeichnung	Wert	Einheit
Frequenz	10	Hz
Masse	0,886	kg
Einschaltzeit	1,5 – 2,5	ms
Abstand zum Werkstück	0,3 – 2	mm

Für die Versuchsdurchführung wurde der Aktor erneut in seiner Position in der Werkzeugmaschine festgehalten und mit einer Frequenz von 10 Hz für 3 – 4 Sekunden betrieben. Zwischen den einzelnen Versuchen wurde der Aktor jedoch in horizontaler Richtung versetzt, um ein erneutes Schlagen in die bereits vorhandene Mulde zu vermeiden und somit dieselben Ausgangsbedingungen herzustellen. Die Ergebnisse der Hammerkopfgeschwindigkeit mit den genannten Parametern ist in Abbildung 59 dargestellt.

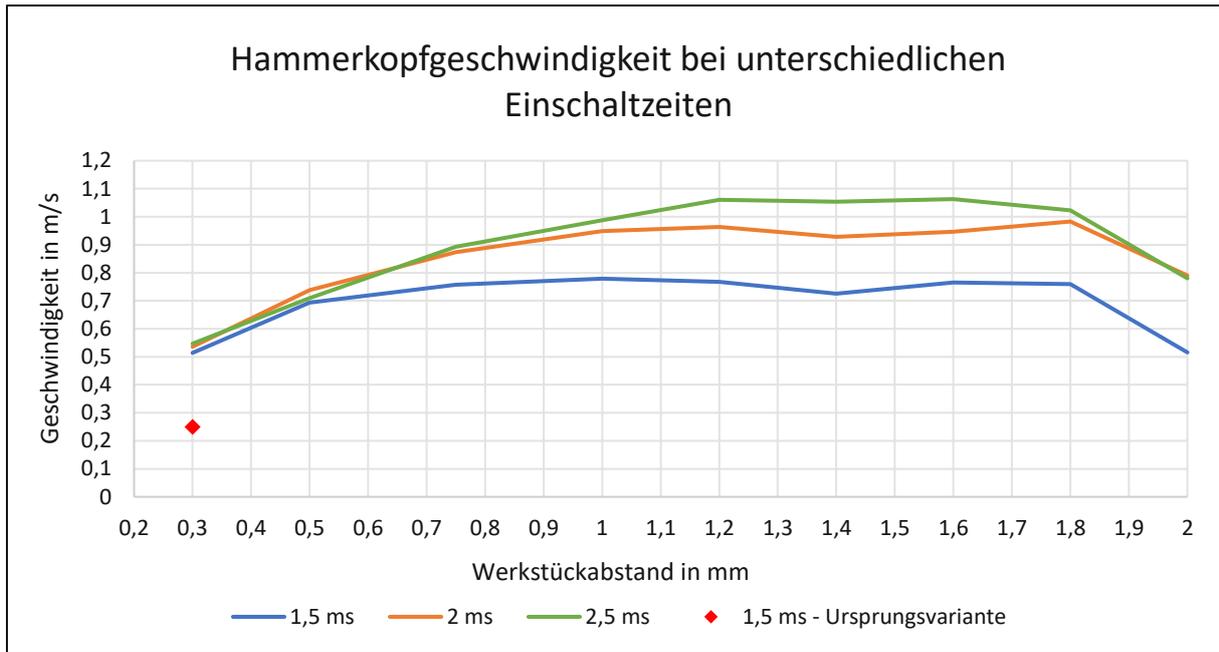


Abbildung 59: Hammerkopfgeschwindigkeiten vor dem Auftreffen auf die Werkstückoberfläche bei unterschiedlichen Einschaltzeiten und Abständen von Aktor zu Werkstück

Daraus lässt sich erkennen, dass die Maximalgeschwindigkeiten des Hammerkopfes sowohl von der Einschaltzeit als auch vom Abstand zwischen dem HM-Stößel und der Werkstückoberfläche abhängt. Weiters ist ersichtlich, dass die größten Geschwindigkeiten der jeweiligen Einschaltzeiten bei unterschiedlichen Abständen auftreten. So erreicht der Hammerkopf bei einer Einschaltzeit von 2,5 ms die maximale Geschwindigkeit bei einem Werkstückabstand zwischen 1,2 und 1,6 mm, wohingegen dies bei den Einschaltzeiten 1,5 und 2 ms bei einer Distanz zur Werkstückoberfläche von 1 – 1,2 mm und 1,6 – 1,8 mm der Fall ist. Vergleicht man die Hammerkopfgeschwindigkeit bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einem Werkstückabstand von 0,3 mm zwischen der Ursprungsvariante (0,25 m/s – rot eingezeichnet) und der überarbeiteten Aktorik (0,51 m/s), so ist auch hier eine deutliche Steigerung von 104 % erkennbar.

Mit den ermittelten Geschwindigkeiten des Hammerkopfes kann erneut die kinetische Energie (Gleichung (6)) berechnet werden, welche in Abbildung 60 zu sehen ist.

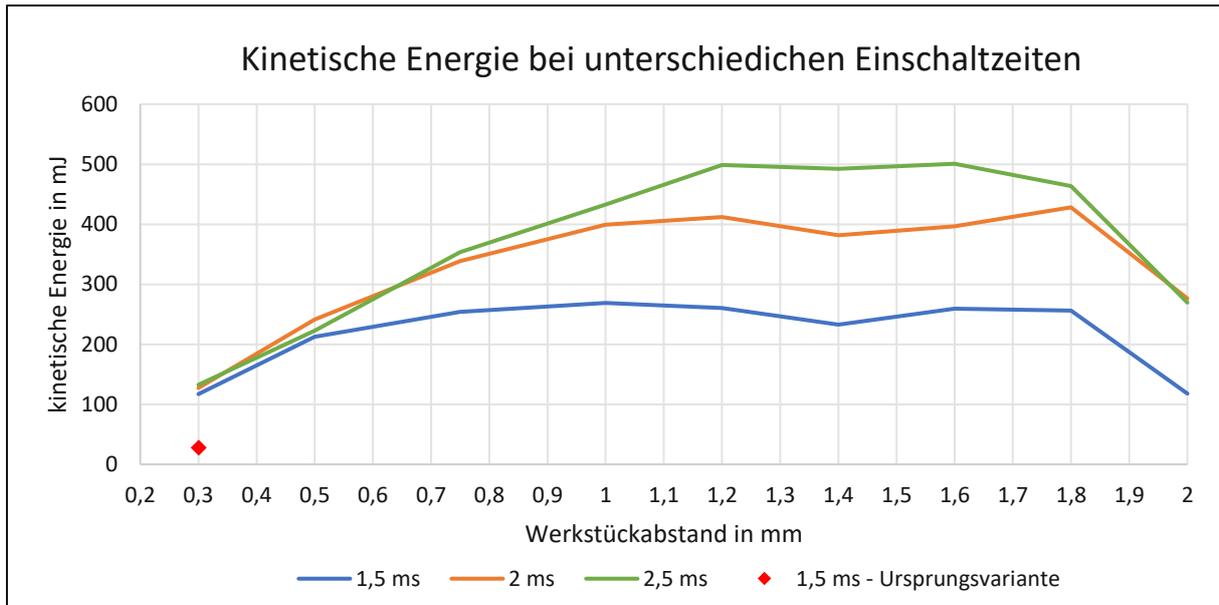


Abbildung 60: Kinetische Energie beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche bei unterschiedlichen Einschaltzeiten und Abständen von Aktor zu Werkstück

Da die kinetische Energie mit der bereits in Kapitel 5.5 genannten Gleichung (6) berechnet wurde, entspricht der Verlauf dem der Hammerkopfgeschwindigkeit. Ergab die kinetische Energie der Ursprungsvariante (rot eingezeichnet) noch einen Wert von 27,82 mJ bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einem Werkstückabstand von 0,3 mm, so ist diese bei der überarbeiteten Aktorik für dieselben Parameter auf 115,26 mJ gestiegen. Dies bedeutet eine Erhöhung der kinetischen Energie von 414 %. Die weiteren Maximalwerte der Hammerkopfgeschwindigkeiten und berechneten kinetischen Energien sind nachfolgend in Tabelle 12 mit den dazugehörigen Abständen zum Werkstück zusammengefasst.

Tabelle 12: Maximalwerte der Hammerkopfgeschwindigkeiten und der kinetischen Energien der überarbeiteten Aktorik beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche

Bezeichnung	Wert	Einheit	Einschaltzeit in ms	Abstand Aktor zu Werkstück in mm
Hammerkopfgeschwindigkeit	0,779	m/s	1,5	1,0
	0,893		2	1,8
	1,063		2,5	1,6
Kinetische Energie	269	mJ	1,5	1,0
	428		2	1,8
	501		2,5	1,6

Aus Tabelle 10 ist ersichtlich, dass die Maximalwerte der Hammerkopfgeschwindigkeit und der kinetischen Energie bei einer Einschaltzeit von 2 und 2,5 ms bei einem Werkstückabstand von 1,6 – 1,8 mm liegen. Verglichen mit anderen Antriebssystemen, wie diese in [7] beschrieben und in dieser Arbeit in Abbildung 7 dargestellt sind, liegt die kinetischen Energie der überarbeiteten Aktorik im mittleren Bereich.

7.7. Auswertung der plastischen Eindrücke

Die nach dem Hämmerprozess verbleibenden Eindrücke sind ein wesentlicher Indikator für die Umformarbeit eines Hammersystems. Aus diesem Grund werden in diesem Unterkapitel die plastischen Eindrücke bei unterschiedlichen Einschaltzeiten und Werkstückabständen analysiert. Für die Auswertung werden die in Kapitel 7.6 beschriebenen Einschläge mit den in Tabelle 11 zusammengefassten Eingangsparametern herangezogen und untersucht. Durch die gewählte Frequenz von 10 Hz und der Versuchsdauer von 3 – 4 Sekunden handelt es sich dabei nicht um Einzeleindrücke. Stattdessen ist von 30 – 40 Schlägen auszugehen, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Durchgeführt wurden die Versuche mit einem zylindrischen HM-Stößel mit einem Durchmesser von 8 mm. Für die Auswertung der Eindrücke wurden der Eindruckdurchmesser d_i , die Tiefe t_p und der Durchmesser der geometrischen Struktur d_p nach VDI 3416 [2] analysiert, siehe Abbildung 61.

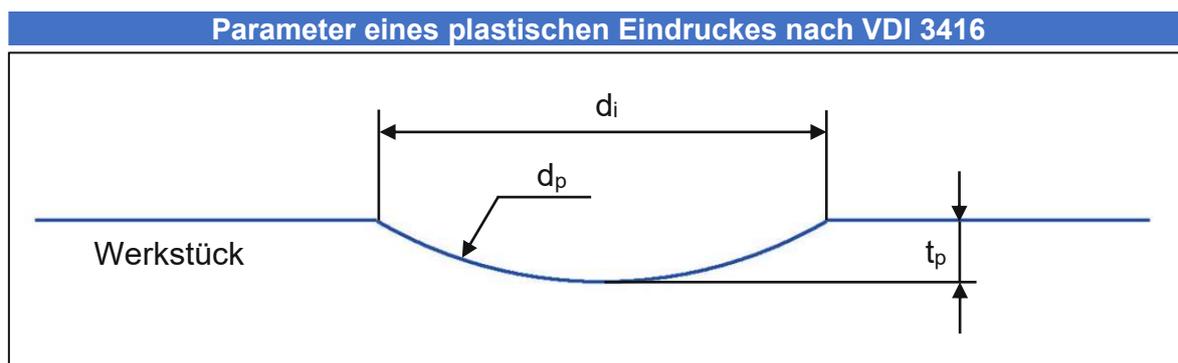


Abbildung 61: Parameter eines verbleibenden Eindruckes nach einem Hammerschlag nach VDI 3416 [2]

Untersucht wurden dabei die Eindrücke bei Einschaltzeiten zwischen 1,5 – 2,5 ms und Werkstückabständen zwischen 0,3 – 2 mm. In Abbildung 62 sind die plastischen Eindrücke am Werkstück mit den einzelnen Einschaltzeiten dargestellt. Abbildung 63 hingegen zeigt beispielhaft die mit dem optischen Messgerät Alicona Infinite Focus G5 gemessenen plastischen Eindrücke bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms, 30 – 40

Schlägen je Eindruck und steigendem Werkstückabstand im Detail. Zur vereinfachten Erkennbarkeit der Eindrücke wurde deren Eindringtiefe in Abbildung 63 mit dem Faktor 3 skaliert.

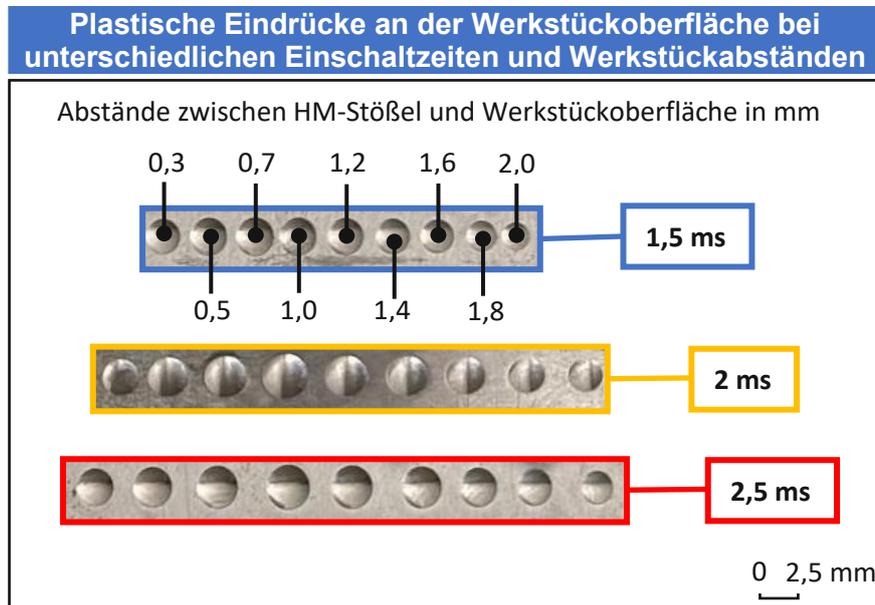


Abbildung 62: Plastische Eindrücke bei unterschiedlichen Einschaltzeiten und Werkstückabständen

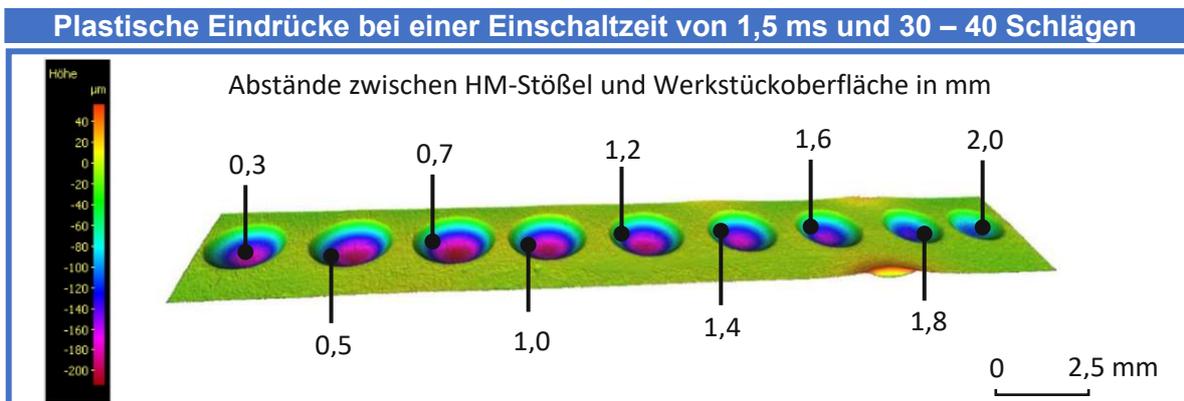


Abbildung 63: Plastische Eindrücke bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und 30 – 40 Schlägen pro Eindruck

Nach den bisherigen Erkenntnissen aus den durchgeführten Versuchsreihen ist davon auszugehen, dass die Eindrücke wesentlich vom Werkstückabstand und der Einschaltzeit abhängen. Die Messergebnisse der Eindrücke sind in den Abbildungen 64 – 66 dargestellt.

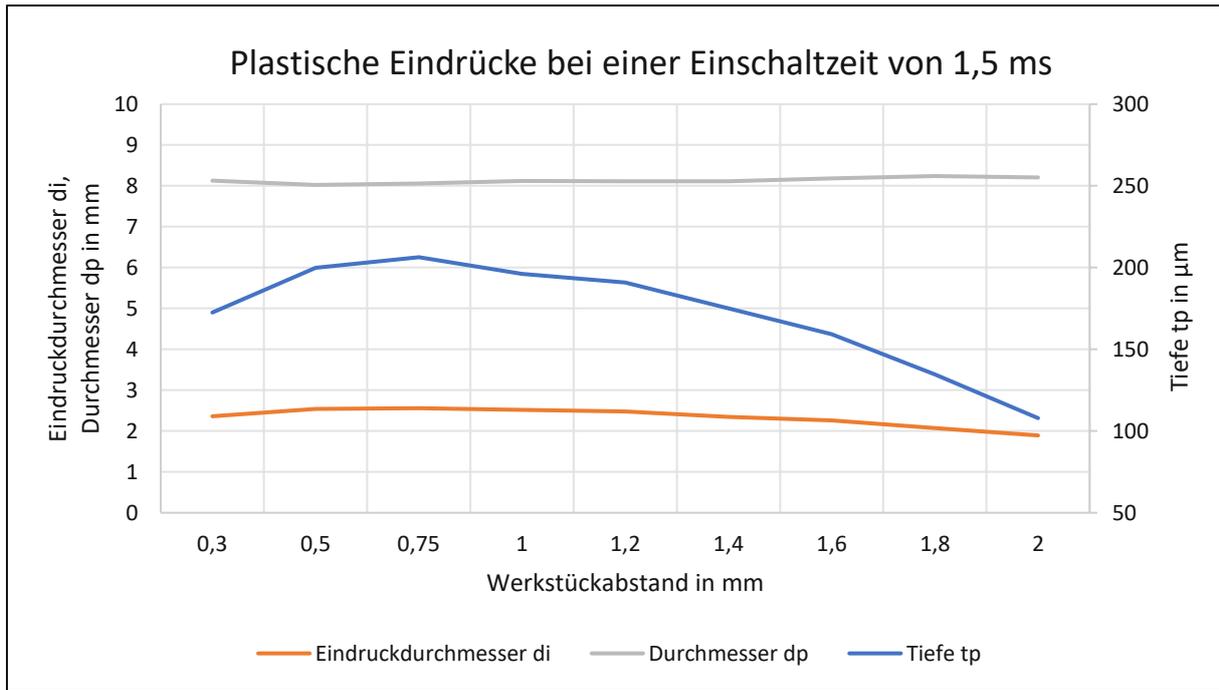


Abbildung 64: Ermittelte Parameter der Eindrücke bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und 30 – 40 ausgeführten Schlägen

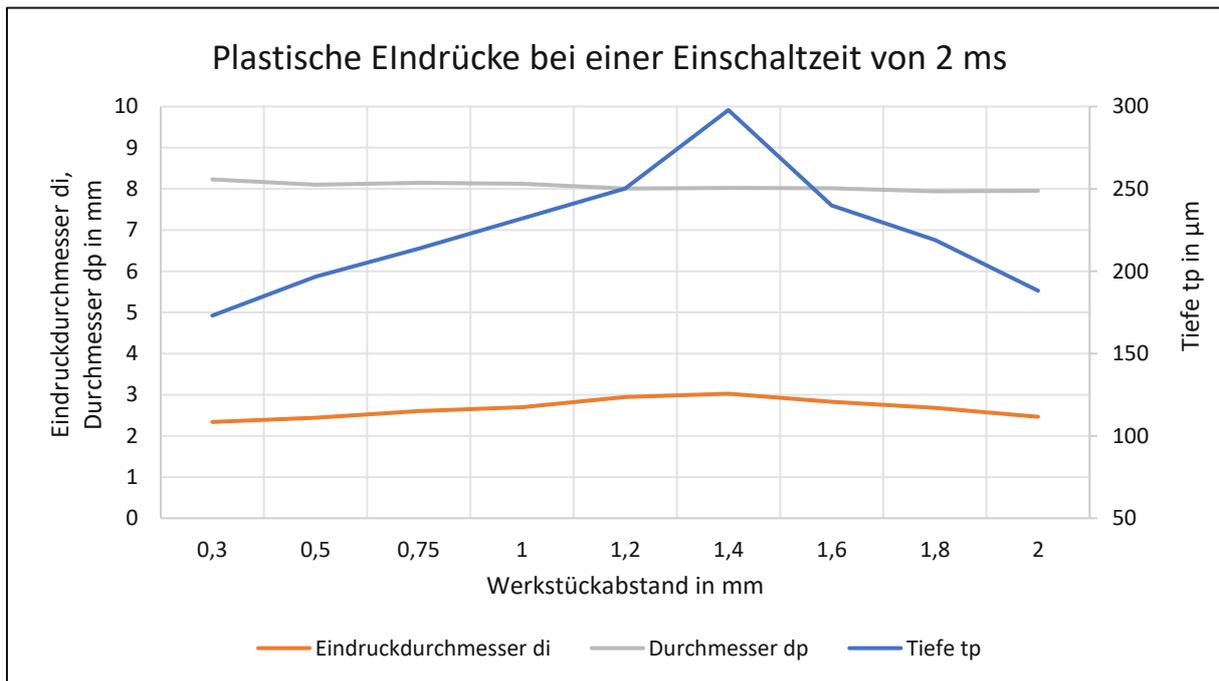


Abbildung 65: Ermittelte Parameter der Eindrücke bei einer Einschaltzeit von 2 ms und 30 – 40 ausgeführten Schlägen

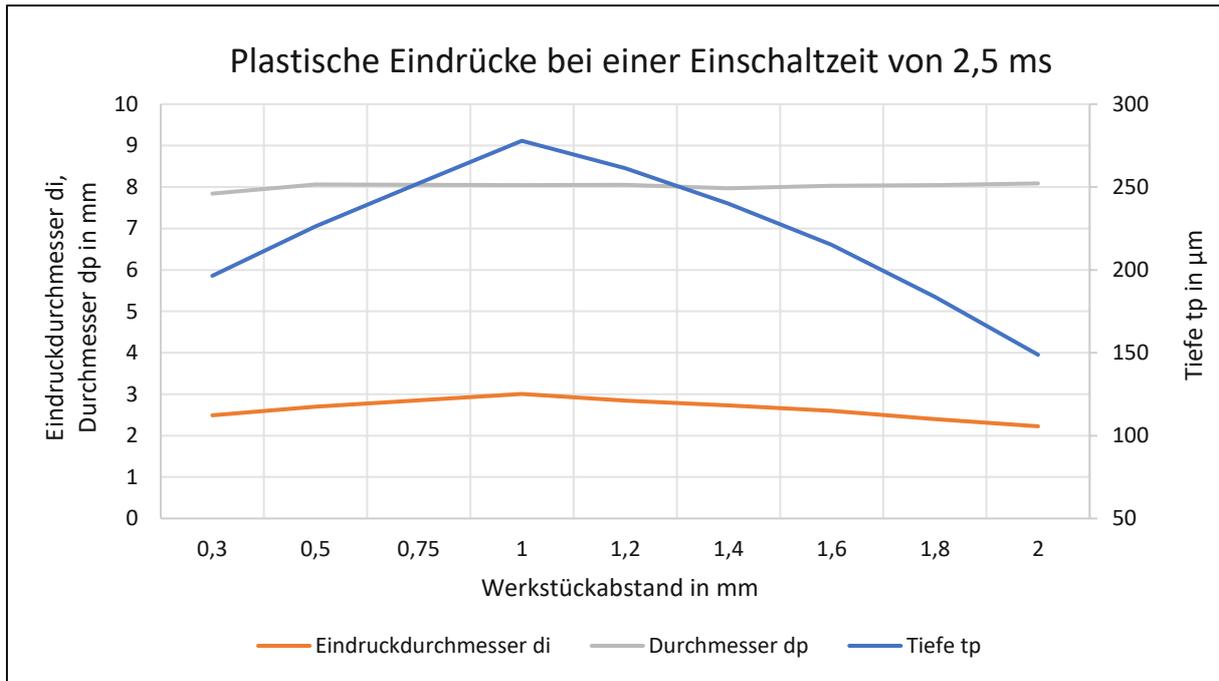


Abbildung 66: Ermittelte Parameter der Eindrücke bei einer Einschaltzeit von 2,5 ms und 30 – 40 ausgeführten Schlägen

Aus den Abbildungen 64 – 66 ist zu erkennen, dass die Werte des Eindruckdurchmessers d_i und des Durchmesser d_p bei steigendem Werkstückabstand annähernd konstant bleiben. Die Tiefe t_p der Eindrücke hingegen hängt wesentlich vom Werkstückabstand ab, wobei die Maximaltiefe je nach Einschaltzeit bei unterschiedlichen Abständen zwischen dem HM-Stößel und der Werkstückoberfläche auftritt. Ebenfalls bestätigen lässt sich der Zusammenhang zwischen Eindruckdurchmesser und Tiefe, da sich die Maximalwerte je nach Einschaltzeit einem exakten Werkstückabstand zuweisen lassen. Zur Verdeutlichung der Abhängigkeit von Werkstückabstand und den unterschiedlichen Einschaltzeiten werden die Ergebnisse in der folgenden Abbildung 67 überlagert.

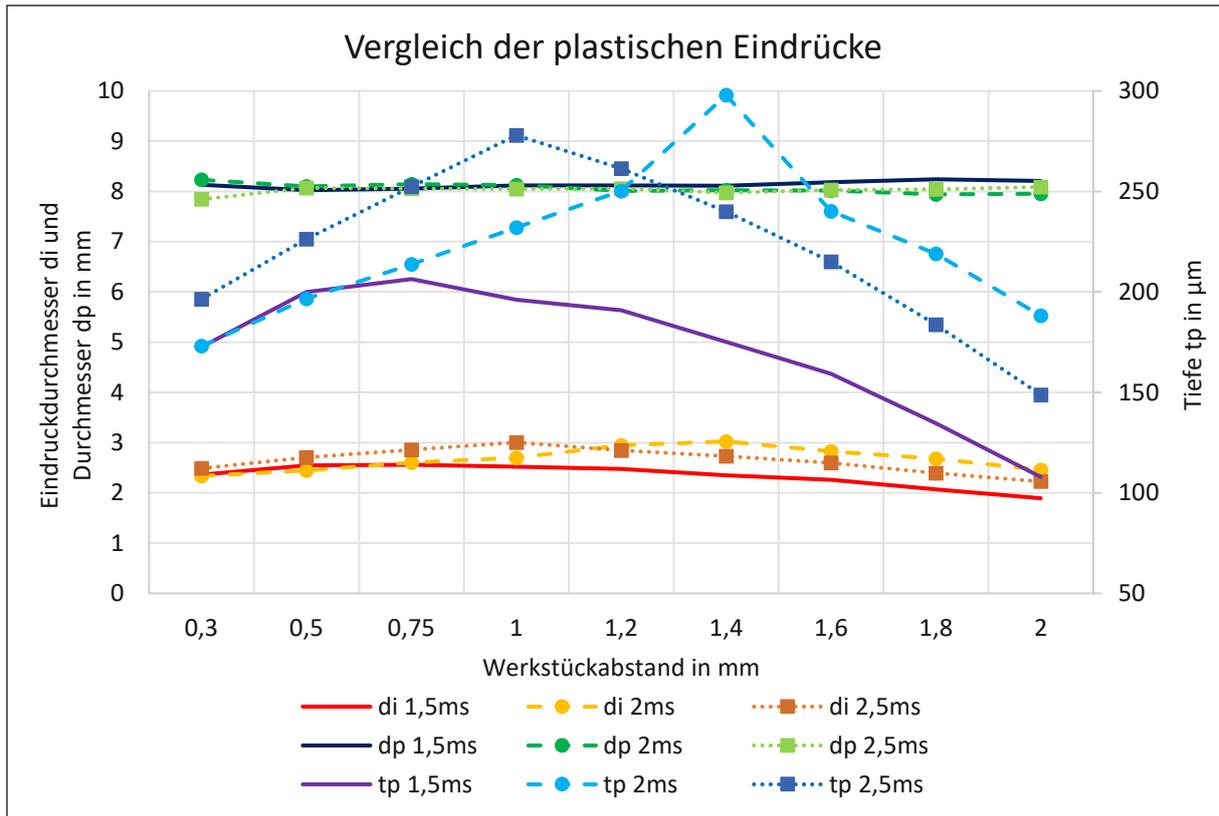


Abbildung 67: Vergleich der plastischen Eindrücke bei Einschaltzeiten zwischen 1,5 – 2,5 ms und 30 – 40 Schlägen je Eindruck

Der Durchmesser der geometrischen Struktur d_p entspricht über den gesamten Bereich der Einschaltzeit und des Werkstückabstandes annähernd dem Durchmesser des HM-Stößels von 8 mm. Für den Eindruckdurchmesser d_i ergaben sich Werte zwischen 2 und 3 mm, wobei der Maximalwert von 3 mm sowohl mit einer Einschaltzeit von 2 ms als auch 2,5 ms erzielt werden konnte, siehe Abbildung 67. Größere Unterschiede bei den Maximalwerten sind bei der Tiefe der geometrischen Struktur t_p zu verzeichnen. Hierbei variieren die Werte zwischen 206 μm bei einer Einschaltzeit von 1 ms und 297 μm bei einer Einschaltzeit von 2 ms.

Das Erreichen der maximalen Eindringtiefe bei einer Einschaltzeit von 2 ms und einem Werkstückabstand von 1,4 mm entspricht dabei nicht den Erwartungen aus den Messungen der kinetischen Energie (Kapitel 7.6). Wie in Abbildung 60 dargestellt ist, tritt die größte kinetische Energie bei einer Einschaltzeit von 2,5 ms und einem Werkstückabstand von 1,6 mm auf. Diese Abweichungen können einerseits durch das verwendete Material begründet werden, bei dem es durch diverse Hämerversuche zu Unregelmäßigkeiten gekommen sein könnte. Andererseits kann die Tiefe der plastischen Eindrücke aufgrund der nicht exakt festgelegten Anzahl an Schlägen ebenfalls variieren.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das maschinelle Oberflächenhämmern eines neuartigen Aktorsystems, welches eigens am IFT der TU Wien entwickelt wurde und auf dem Prinzip der variablen Reluktanz basiert, erstmalig experimentell untersucht. Eingangs wurde das System in Kapitel 4 beschrieben sowie alle Komponenten und deren Funktion vorgestellt.

In Kapitel 5 folgte eine erste Systemtestung und Charakterisierung, in welchem die Eigenschaften der in der Aktorik verbaute Spule und die Auszugs- und Kontaktkräfte bei unterschiedlichen Eingangsparametern eruiert wurden. Mit der Bestimmung der Temperaturentwicklung und der Hammerkopfgeschwindigkeit bzw. der kinetischen Energie konnten weitere, für den Hämmerprozess bedeutsame, Merkmale ermittelt werden. Mit den Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Leistungsfähigkeit des Aktors wesentlich von der Überdeckung der Flanken von Stator und Läufer abhängt. Ebenfalls konnten mit der Durchführung der Versuchsreihen die Leistungsfähigkeit als auch die Systemgrenzen des bestehenden Aktors aufgezeigt werden. Die ermittelten Werte der generierten kinetischen Energie des Aktors liegen hierbei deutlich über vergleichbare Aktoren [7], wohingegen die thermische Energieentwicklung bei längerfristigem Hämmern in höheren Frequenzbereichen stark ansteigt.

Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse der vorangegangenen Untersuchungen wurde das System in Kapitel 6 überarbeitet und weiterentwickelt. Ziel dabei war sowohl eine Verbesserung der Konstruktion hinsichtlich des Zusammenbaus der Aktorik als auch eine Steigerung der Kühlleistung. Im Weiteren sollte mit der Umsetzung der exakten Flankengeometrie die Leistungsfähigkeit des Aktors deutlich erhöht werden.

Mit den durchgeführten Revisionen wurde der Aktor erneut zusammengebaut und in Kapitel 7 einer neuerlichen Charakterisierung und Systemtestung unterzogen. Dabei wurden für die Versuchsreihen dieselben oder geringfügig abweichende Eingangsparameter verwendet, um einen direkten Vergleich zwischen der ursprünglichen und der überarbeiteten Aktorik herzustellen. Ergänzend zu den in Kapitel 5 angelehnten Versuchen fand eine Auswertung der plastischen Eindrücke nach VDI 3416 [2] statt. Mit den erneut durchgeführten Versuchsreihen konnte eine

wesentliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Aktors festgestellt werden. Die durch die überarbeitete Aktorik generierbaren Kräfte als auch kinetischen Energien konnten deutlich erhöht werden. Lediglich die Kühlleistung konnte mit der steigenden Leistungsfähigkeit nicht im selben Ausmaß verbessert werden und bedarf weiterer Untersuchungen.

Da ein funktionsfähiges Kühlsystem essenziell für ein Hammersystem ist und dies mit einer analytischen Berechnung nur sehr aufwändig zu bewerkstelligen ist, besteht bei der vorgestellten Aktorik Bedarf, das thermische Verhalten mittels einer numerischen Simulation zu untersuchen.

Weiters konnte die Bedeutung der Überdeckung der Flanken als auch die Flankenbreite selbst für die Performance des Aktors in dieser Arbeit bewiesen werden. Um dies bei nachfolgenden wissenschaftlichen Studien zu optimieren, könnte die Messung der Auszugskraft für eine exakte Höheneinstellung des Läufers herangezogen werden.

Die gestiegene Leistungsfähigkeit des Aktors durch die Überarbeitung kann ebenfalls als Ausgangspunkt weiterer Forschungsarbeiten dienen. Die auf die Werkstückoberfläche auftreffenden Kontaktkräfte bzw. die kinetischen Energien könnten durch eine Erhöhung der beweglichen Bauteilmassen deutlich gesteigert werden. Dies hat jedoch zur Folge, dass die Belastungen auf die Werkzeugspindel, die den Aktor führt, ebenso steigen und untersucht werden sollten. Im Zuge dessen wäre die Implementierung einer zweiten Einschaltzeit über die Bedienersoftware für eine Dämpfung des Rückstoßes eine interessante Weiterführung für zukünftige Arbeiten.

Eine weitere Forschungsfrage könnte sich mit dem Ausgleich der Eigenschwingungen einer Werkzeugmaschine oder eines Roboters, in dem der Aktor fixiert ist, beschäftigen. Durch die Möglichkeit einer zeit- bzw. wegdiskreten Auslenkung zeigt sich die beschriebene Aktorik als geeignet dafür, jedoch erfordert dies eine Weiterentwicklung der Bedienersoftware.

9. Literaturverzeichnis

- [1] V. Schulze, *Modern mechanical surface treatment: States, stability, effects* (Zugl.: Karlsruhe, Univ., Habil.-Schr., 2004). Weinheim: Wiley-VCH, 2006.
- [2] *Maschinelles Oberflächenhämmern - Grundlagen*, VDI 3416 Blatt 1, 2018.
- [3] V. Schulze, F. Bleicher, P. Groche, Y. B. Guo und Y. S. Pyun, "Surface modification by machine hammer peening and burnishing," *CIRP Annals*, Jg. 65, Nr. 2, S. 809–832, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.005.
- [4] Mayrhofer P.H., "Werkstoffkunde metallischer Werkstoffe," Vorlesungsskriptum, Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, TU Wien, 2017.
- [5] C. Lechner, "Oberflächenmodifikation unter Einsatz der Technologie des Schlagverdichtens (Machine Hammer Peening)," Dissertation, TU Wien, Wien, 2014.
- [6] C. Lechner, F. Bleicher, C. Habersohn, C. Bauer und S. Goessinger, Hg. *The use of machine hammer peening technology for smoothing and structuring of surfaces*. Vienna: DAAAM International, 2012.
- [7] S. Krall, "Beeinflussung der Randschicht durch diskrete Mikroumformung," Dissertation, Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien, TU Wien, Wien, 2019.
- [8] W. L. Chan und H. K. F. Cheng, "Hammer peening technology—the past, present, and future," *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 118, 3-4, S. 683–701, 2022, doi: 10.1007/s00170-021-07993-5.
- [9] C. Habersohn, "Analytische und Simulative Betrachtung eines Oberflächenhämmerprozesses," Dissertation, Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien, TU Wien, Wien, 2015.
- [10] Accurapuls GmbH. „Firmenhomepage.“ <http://www accurapuls.de/Verfahrensbeschreibung.html> (Zugriff am: 2. Oktober 2023).

- [11] J. Wied, "Oberflächenbehandlung von Umformwerkzeugen durch Festklopfen," Dissertation, TU Darmstadt, Darmstadt, 2011.
- [12] S. Krall und H. Caudr, "DIP-Systembeschreibung," TU Wien, Wien, 2023.
- [13] Beckhoff Automation GmbH & Co. KG. „Firmenhomepage.“ <https://www.beckhoff.com/de-at/produkte/i-o/zubehoer/vorkonfektionierte-leitungen/hybridleitungen/zk7314-3031-axxx.html> (Zugriff am: 25. Oktober 2023).
- [14] P. Lugner, "Mechanik 2," Vorlesungsskriptum, Institut für Mechanik und Mechatronik, TU Wien, 2009.
- [15] H. D. Baehr und K. Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [16] T. Loimer und H. Steinrück, "Wärmeübertragung," Vorlesungsskriptum, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, TU Wien, 2018.

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung und Überblick der mechanischen Oberflächenbehandlungen [2].....	10
Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Aktorsystems – [3] modifiziert	11
Abbildung 3: Oberflächenrauheit durch MHP in Abhängigkeit des Hammerkopfdurchmessers und des Zeilenabstandes im Vergleich zur gefrästen Werkstückoberfläche [4] - modifiziert.....	14
Abbildung 4: Aufbau eines elektrodynamischen Aktorsystems der Firma Accurapuls [8]	16
Abbildung 5: Aufbau eines piezoelektrischen Aktorsystems nach [8]	17
Abbildung 6: Aufbau des DIP-MHP-Aktors (links) und Darstellung des magnetischen Flusses in der Ausgangs- und Endposition (rechts) [7]	18
Abbildung 7: Gegenüberstellung der Frequenzbereiche und der kinetischen Energie unterschiedlicher MHP-Systeme [7].....	19
Abbildung 8: Übersicht über die für den Hämmerprozess notwendigen Komponenten - [12] modifiziert	22
Abbildung 9: Schnittansicht des Aktors inkl. Bezeichnung der Komponenten	24
Abbildung 10: Mit Kupferdraht und integriertem Temperatursensor gewickelter Stator inkl. HSK63-Aufnahme – grüne Pfeile deuten die Wickelrichtung an	26
Abbildung 11: Darstellung der äußeren Komponenten des Aktors bei ausgeblendetem Gehäuse	28
Abbildung 12: Ausgangsposition von Stator und Läufer mit einer Überdeckung von 0,1 - 0,2 mm.....	29
Abbildung 13: Vermessung der Silikonpaste mit dem optischen Messgerät „Alicona Infinite Focus G5 Focus G5	30
Abbildung 14: Vermessung der Flanken des Stators mittels Zoller smarTcheck 600	31
Abbildung 15: Darstellung der Komponenten des Wegmesssystems	31
Abbildung 16: Darstellung der Kühlkreisläufe mittels Druckluft (links) und Kühlschmierstoff über eine externe Pumpe (mittig) und die Innenkühlung der Werkzeugmaschine (rechts).....	33
Abbildung 17: Schnittstellen des Aktors – vorkonfektionierte Hybridleitung, KSS-Eingang und -Ausgang sowie Druckluft-Eingang [13].....	34
Abbildung 18: Komponenten der Frontplatte der DIP-Steuerung	37
Abbildung 19: Bedienersoftware zur Überwachung und Parametrierung des Hämmerprozesses	38
Abbildung 20: Bedienersoftware - Analyse eines mit einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einem Werkstückabstand von 0,3 mm aufgezeichnetem Einzelschlages.....	40
Abbildung 21: Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke bei einer Frequenz von 200 Hz und einer Einschaltzeit von 1,5 ms.....	41
Abbildung 22: Versuchsaufbau für die Messung der Auszugskraft des Hammers	44
Abbildung 23: Auszugskraft bei einmaliger Nullsetzung der Kraft in der Ausgangsposition	45
Abbildung 24: Auszugskraft bei Nullsetzung der Kraft nach jeder axialen Verschiebung des Aktors... ..	46
Abbildung 25: Versuchsaufbau für die Messung der Kontaktkräfte zwischen HM-Stößel und Werkstückoberfläche	47
Abbildung 26: Symbolische Darstellung des Verfahrensweges (grün) des Aktors in der Werkzeugmaschine bei der 10x10 mm Feldbearbeitung	48
Abbildung 27: Dynamische Kraftmessung einer 10x10 Feldbearbeitung bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einem Werkstückabstand von 0,3 mm.....	49

Abbildung 28: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Volumenstroms der KSS-Zufuhr, generiert durch die externe Pumpe	50
Abbildung 29: Versuchsaufbau für die Temperaturmessungen des Aktors bei Verwendung der externen KSS-Zufuhr	52
Abbildung 30: Temperaturverläufe bei Verwendung der KSS-Kühlung über die externe Pumpe bei variierender Frequenz – Einschaltzeit 1,5 ms und Werkstückabstand 0,3 mm	54
Abbildung 31: Temperaturverläufe bei Verwendung der Innenkühlung über die Werkzeugmaschine bei variierender Frequenz – Einschaltzeit 1,5 ms und Werkstückabstand 0,3 mm	55
Abbildung 32: Vergleich des Temperaturverhaltens bei unterschiedlichen Volumenströmen.....	56
Abbildung 33: Aufnahme der Strom- und Wegmessdaten während eines Schlages bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einem Werkstückabstand von 0,3 mm.....	57
Abbildung 34: Flankenbreiten von Stator und Läufer im Ist- und Soll-Zustand laut Konstruktion	61
Abbildung 35: Gegenüberstellung der Flankenbreite zwischen ursprünglichem und überarbeitetem Stator	61
Abbildung 36: Wärmeleitung für den eindimensionalen Fall durch eine Wand - [11] modifiziert.....	63
Abbildung 37: Wärmeleitung in der Statorwand – Darstellung der Variablen	64
Abbildung 38: Vergleich des Kühlkanals für eine verbesserte Wärmeleitung QW in der Statorwand; links: Stator alt - mit eingezeichneter, der Bohrung begrenzender Stufe rechts: Stator neu - zweiteilig	66
Abbildung 39: Stator Teil 1 mit eingepresstem Passstift als Referenzmarke.....	67
Abbildung 40: HSK63-Aufnahme im überarbeiteten Zustand.....	68
Abbildung 41: Referenzfläche des überarbeiteten Läufers.....	69
Abbildung 42: Kontrollbohrung zur Überprüfung der Überdeckung der Flanken von Stator und Läufer im eingebauten Zustand.....	69
Abbildung 43: konstruktive Änderung des Gehäuses links oben: ursprüngliches Gehäuse - links unten: überarbeitetes Gehäuse rechts: Zusammenbau des überarbeiteten Gehäuses mit weiteren Komponenten des Aktors.....	71
Abbildung 44: Überarbeitung der Messsystemhalterung – Änderung des Materials und konstruktive Anpassungen	72
Abbildung 45: Überarbeitung der Grundplatte – Hinzufügen von zusätzlichen Entlüftungsbohrungen und Vergrößerung der zentralen Bohrung.....	73
Abbildung 46: Federbolzen im eingebauten Zustand und Änderungen zwischen altem und neuem Federbolzen.....	74
Abbildung 47: Erneuter Zusammenbau der überarbeiteten Aktorik; links: Stator in HSK63-Aufnahme eingepresst - Kupferdraht und PTFE-Band gewickelt und Temperatursensor implementiert; mittig: Alle Komponenten innerhalb des Gehäuses inkl. Messsystemhalterung montiert und Leitungen verlötet - Höheneinstellung des Läufers hat bereits erfolgt; rechts: Zusammenbau mit Ausnahme der Anschlüsse für Druckluft und KSS abgeschlossen	76
Abbildung 48: Versuchsaufbau für die Kalibrierung des Schwertes	79
Abbildung 49: Ermittlung des Umrechnungsfaktors für die Auswertung der Messdaten nach erfolgter Schwerteinstellung am Läufer	80
Abbildung 50: Verbliebene Eindrücke an der Werkstückoberfläche bei der Ermittlung des Maximalhubes der überarbeiteten Aktorik bei einer Einschaltdauer von 1,5 ms	81

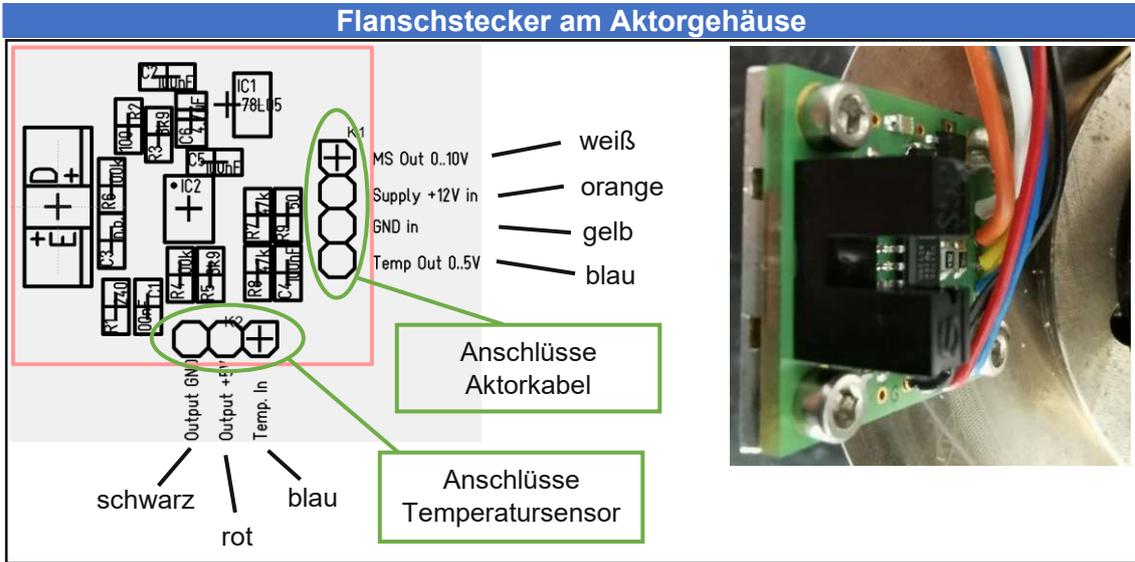
Abbildung 51: Systemverhalten zwischen Spannung und Strom der überarbeiteten Aktorik bei einer Frequenz von 200 Hz und einer Einschaltzeit der Gleichspannung (60V) von 1,5 ms	82
Abbildung 52: Gegenüberstellung der generierten Stromstärken zwischen Aktor alt und neu bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einer Frequenz von 200 Hz	83
Abbildung 53: Auszugskraft der überarbeiteten Aktorik bei Veränderung der axialen Verschiebung.	85
Abbildung 54: Gegenüberstellung der Auszugskräfte zwischen ursprünglicher und überarbeiteter Aktorik	86
Abbildung 55: Dynamische Kraftmessung – Auswertung der auftreffenden vertikalen Kräfte bei einer Frequenz von 5 Hz, einem Werkstückabstand von 0,3 mm und einer Einschaltzeit von 1,5 ms.....	87
Abbildung 56: Gegenüberstellung der vertikalen Kontaktkräfte zwischen ursprünglicher und überarbeiteter Aktorik bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und einem Werkstückabstand von 0,3 mm	88
Abbildung 57: Temperaturverläufe der überarbeiteten Aktorik bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und der Verwendung der Innenkühlung	90
Abbildung 58: Gegenüberstellung der Temperaturverläufe zwischen ursprünglicher und überarbeiteter Aktorik bei einem Werkstückabstand von 0,3 mm und einer Einschaltzeit von 1,5 ms	91
Abbildung 59: Hammerkopfgeschwindigkeiten vor dem Auftreffen auf die Werkstückoberfläche bei unterschiedlichen Einschaltzeiten und Abständen von Aktor zu Werkstück.....	93
Abbildung 60: Kinetische Energie beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche bei unterschiedlichen Einschaltzeiten und Abständen von Aktor zu Werkstück.....	94
<i>Abbildung 61: Parameter eines verbleibenden Eindrucks nach einem Hammerschlag nach VDI 3416 [2]</i>	<i>95</i>
Abbildung 62: Plastische Eindrücke bei unterschiedlichen Einschaltzeiten und Werkstückabständen	96
Abbildung 63: Plastische Eindrücke bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und 30 – 40 Schlägen pro Eindruck.....	96
Abbildung 64: Ermittelte Parameter der Eindrücke bei einer Einschaltzeit von 1,5 ms und 30 – 40 ausgeführten Schlägen	97
Abbildung 65: Ermittelte Parameter der Eindrücke bei einer Einschaltzeit von 2 ms und 30 – 40 ausgeführten Schlägen	97
Abbildung 66: Ermittelte Parameter der Eindrücke bei einer Einschaltzeit von 2,5 ms und 30 – 40 ausgeführten Schlägen	98
Abbildung 67: Vergleich der plastischen Eindrücke bei Einschaltzeiten zwischen 1,5 – 2,5 ms und 30 – 40 Schlägen je Eindruck.....	99

11. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezeichnung der für den Hämmerprozess notwendigen Komponenten - [12] modifiziert .	23
Tabelle 2: Berechnung des elektrischen Widerstandes der gewickelten Spule.....	42
Tabelle 3: Prozessparameter für die Ermittlung der Kontaktkräfte.....	48
Tabelle 4: Einteilung der drei Arten der KSS-Zufuhr und deren Volumenströme.....	51
Tabelle 5: Parameter für die Ermittlung der Hammerkopfgeschwindigkeit	57
Tabelle 6: Geschwindigkeit und kinetische Energie beim Aufprall des Hammerkopfes.....	58
Tabelle 7: Auswirkung des Bohrungsdurchmessers auf die Wärmeleitung durch die Statorwand.....	65
Tabelle 8: Änderungen und Auswirkungen des vergrößerten Kupferdrahtes	77
Tabelle 9: Elektrischer Widerstand der Spule mit vergrößertem Kupferdrahtdurchmesser	83
Tabelle 10: Parameter für die Durchführung der Temperaturmessungen der überarbeiteten Aktorik	89
Tabelle 11: Parameter für die Ermittlung der Hammerkopfgeschwindigkeit und der kinetischen Energie der überarbeiteten Aktorik	92
Tabelle 12: Maximalwerte der Hammerkopfgeschwindigkeiten und der kinetischen Energien der überarbeiteten Aktorik beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche	94

12. Anhang

Platine (Opto-Messsystem)



Kontaktbelegung der Leistungs- und Datenleitung

