

Diplomarbeit

Erzeugen von Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Mikrobearbeitung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs (Dipl. Ing oder DI) eingereicht an der TU Wien, Fakultät für
Maschinenwesen und Betriebswissenschaften von

Roland FÜRBACHER

Mat.Nr.: 0625038

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr. Friedrich Bleicher

Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik, E311

und unter der Betreuung von

Univ.-Ass. Dipl. Ing. Michael Nirtl

begutachtet von

Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr.

Friedrich Bleicher

E311 - Institut für

Fertigungstechnik und

Hochleistungslasertechnik,

Getreidemarkt 9

1060 Wien

Ao. Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr.techn

Manfred Grafinger

E307 - Institut für

Konstruktionswissenschaften und

Technische Logistik,

Getreidemarkt 9

1060 Wien

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 weiters 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.

Wien, Februar, 2018

Roland Fürbacher

Genderklausel

Für die vorliegende Arbeit wurde wegen der besseren Lesbarkeit auf die gleichzeitige Verwendung weiblicher und männlicher Personenbegriffe verzichtet. Gemeint und angesprochen sind natürlich immer beide Geschlechter.

Kurzfassung

Die Technologie des elektrochemischen Abtragens unter Verwendung ultrakurzer Spannungspulse (μ PECM) bietet großes Potential für die Bearbeitung modernster Werkstoffe und die Fertigung kleinster Geometrien. Auf dem Prinzip der Elektrolyse basierend, kommt es während der Bearbeitung zu keinem physischen Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück, sondern zum Lösen von Atomen oder Molekülen in einem elektrisch leitenden Medium - dem Elektrolyten. Dadurch können hartspröde Metalle aber auch metallische Schichtverbunde wie sie in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden thermisch und mechanisch neutral bearbeitet werden. Der Einsatz von ultrakurzen Spannungspulsen ermöglicht die Fertigung von feinsten Strukturen im Mikrometerbereich, welche mit herkömmlichen fertigungstechnischen Verfahren kaum noch zu realisieren sind. Durch Mikrostrukturierung von Bauteiloberflächen können deren physikalische Eigenschaften verändert und dem Anwendungsfall entsprechend optimiert werden - man spricht von funktionalisierten Oberflächen.

Im Zuge der Einbindung dieses Fertigungsverfahrens in den laufenden Forschungsbetrieb am Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik der Technischen Universität Wien gilt es, den Genauigkeitsbereich der Bearbeitungsmaschine der Firma ECMTEC mit Hilfe hochgenauer Messmittel und Messmethoden zu evaluieren.

Im Zuge von experimentellen Untersuchungen zum elektrochemischen Abtragen werden mit Hilfe der ECM-Bearbeitungsmaschine durch Umpolung des Elektrolyseprozesses Werkzeuge für die Mikrostrukturierung von Oberflächen gefertigt. Deren geometrische Formen sind so gewählt, dass damit unter anderem Werkstückoberflächen mit wasserabweisender bzw. hydrophober Funktion erzeugt werden können. Neben der Untersuchung der optimalen Prozessparameter für die Werkzeugfertigung, bei der sowohl die positive als auch die negative Elektrode aus Wolfram bestehen, werden auch Experimente an dem Warmarbeitsstahl X37CrMoV5-1 (1.2343) durchgeführt. Die Oberfläche dieses Materials soll nach mikrostruktureller, elektrochemischer Bearbeitung besonderen physikalischen Anforderungen genügen - in diesem Fall einen hohen Grad an Hydrophobie erreichen. Neben der geometrischen Form muss der elektrochemische Prozess je nach Materialpaarung (Werkzeug und Werkstück) über die Prozessparameter und den Elektrolyten optimiert werden.

Abstract

The technology of electrochemical dissolution via use of ultra-short voltage pulses (μ PECM) offers enormous potential for machining of high-tech materials and manufacturing of smallest structures. Based on the principle of electrolysis, there is no physical contact between the tool and the workpiece electrodes, but instead dissolution of atoms and molecules takes place in an electro conductive medium named electrolyte. By this means it is possible to machine brittle materials as well as metallic composite materials which are commonly used in aerospace applications in a thermally and mechanically neutral fashion. The use of ultra-short voltage pulses enables the machining of finest structures in the micro-meter-scale, which cannot easily be manufactured with other technologies. Micro-structuring of component surfaces can improve their physical and mechanical properties which then can be optimized according to their application – one speaks of functionalized surfaces.

In the course of integrating this manufacturing technology into the ongoing research operation at the Institute for Production Engineering and Laser Technology at the Vienna University of Technology, it is necessary to evaluate the precision range of the ECMTEC machine tool via use of highly accurate measuring equipment and methods.

During experimental investigations, tool electrodes for the micro-structuring of surfaces are produced by reversing the electrolysis process using the same machine tool. Their geometric shapes are selected in such a way that workpiece surfaces with water-repellent properties can subsequently be produced. In addition to the investigation of the optimal process parameters for the production of tool electrodes, in which both the positive and the negative electrode are made of pure tungsten, experiments are also carried out on the hot working steel 1.2343 (X37CrMoV5-1).

Due to the microstructural electrochemical processing, the materials' surface shall meet a special physical requirement, which is a high degree of hydrophobicity. To achieve the therefore required micro structures, the electrochemical process must be optimized by appropriate selection of process parameters and the electrolyte depending on the material pairing (tool and workpiece).

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Motivation und Zielsetzung.....	3
3	Grundlagen der elektrochemischen Bearbeitung	5
3.1	Elektrolyse.....	6
3.2	Elektrochemisches Abtragen von Metall	7
3.3	Abgrenzung zu anderen trennenden Bearbeitungsverfahren.....	12
3.4	PECM und μ PECM	13
3.5	Stand der Technik	16
3.6	Materialien.....	19
3.7	Elektrolyt	20
3.7.1	Spezifische Leitfähigkeit	22
3.7.2	Molare Elektrolyt-Leitfähigkeit.....	23
3.7.3	Einfluss des pH-Wertes	24
3.7.4	Temperatureinfluss auf den Elektrolyten	24
3.7.5	Zu- und Abfuhr des Elektrolyten	25
3.7.6	Wiederaufbereitung der Elektrolyte.....	27
3.7.7	Sicherheitsaspekte im Umgang mit Elektrolyten.....	28
3.8	Wirtschaftliche Aspekte der elektrochemischen Bearbeitung.....	31
4	Versuchsanlage	33
4.1	Aufbau.....	34
4.1.1	Hardware	34
4.1.2	Software	36
4.2	Beschreibung der Prozessparameter	37
4.2.1	Spannung am Werkzeug	38
4.2.2	Pulsamplitude der Spannung.....	39
4.2.3	Pulsweite des Spannungspulses	39
4.2.4	Puls-Pause-Verhältnis (Puls-Pause-Ratio)	39
4.2.5	Oberer/Unterer Spannungsgrenzwert/Schwellwert.....	39
4.2.6	Strom durch die Gegenelektrode	40
4.2.7	Potentialdifferenz der Gegenelektrode	40

4.2.8	Signalspannung.....	40
4.2.9	Vorschubgeschwindigkeit	40
4.2.10	Überlagerte Werkzeugbewegung	40
4.3	Versuchsaufbau	41
5	Messmethoden und Messmittel.....	43
5.1	Maschinengenauigkeitsuntersuchung	43
5.1.1	Fühlhebelmessgerät TESA Tesastast S D28	43
5.1.2	Micro-Epsilon eddyNCDT 3100	43
5.1.3	Renishaw Lasermesssystem XL 80 & XC 80	44
5.2	Prozessüberwachung.....	46
5.2.1	Mikroskopkamera - Dino-Lite AM2111 Basic.....	46
5.2.2	Mikroskopkamera - Reflecta DigiMicroscope USB	47
5.3	Struktur- und Geometrieuntersuchung	47
5.3.1	Stereomikroskop - Krüss	47
5.3.2	3D-Oberflächenmesssystem - Alicona Infinite Focus G5.....	48
5.3.3	Digitalmikroskop - Keyence VW-9000	49
5.4	Untersuchung der elektrischen Komponenten	50
5.4.1	Digitaloszilloskop - National Instruments Digitizer NI USB-5133	50
5.4.2	Grafisches Programmiersystem - National Instrument LabVIEW 2010 ...	50
6	Genauigkeitsuntersuchung der μ PECM Maschine.....	51
6.1	Grundlagen	51
6.2	Rundheitsuntersuchung der Drehspindel	51
6.2.1	Versuchsaufbau der Rundheitsuntersuchung.....	52
6.2.2	Versuchsablauf der Rundheitsuntersuchung	54
6.2.3	Ergebnisse der Rundheitsuntersuchung.....	57
6.2.4	Ergebnisse der Drehzahlmessung.....	62
6.3	Evaluierung der drei Hauptachsen	62
6.3.1	Positionsmessung.....	63
6.3.2	Kippwinkelmessung (Rotation)	68
6.3.3	Geradheitsmessung.....	75
6.4	Funktionale Überprüfung des Pulsgenerators.....	80
6.4.1	Versuchsaufbau der Pulsuntersuchung	80

6.4.2	Versuchsablauf der Pulsuntersuchung	80
6.4.3	Ergebnisse der Pulsuntersuchung	82
7	Zielsetzung der praktischen Experimente	89
7.1	Hydrophobie	89
7.2	Strategie / Herstellungsverfahren	90
8	Werkzeugformen (Tooling)	92
8.1	Versuchsaufbau	92
8.2	Versuchsdurchführung	93
8.3	Ergebnisse	95
8.3.1	Zylinderherstellung	95
8.3.2	Kegelherstellung	97
8.3.3	Pyramidenherstellung	97
8.3.4	Keilherstellung	98
9	Elektrochemische Mikrostrukturierung von Wolframproben	101
9.1	Versuchsaufbau	101
9.2	Versuchsdurchführung	101
9.3	Ergebnisse	102
9.3.1	Vertikales Abtragen mit zylindrischem Werkzeug	102
9.3.2	Horizontales Abtragen mit kegelförmigem Werkzeug	103
9.3.3	Vertikales Abtragen mit pyramidenförmigem Werkzeug	104
9.3.4	Vertikales Abtragen mit keilförmigen Werkzeug	104
10	Elektrochemische Mikrostrukturierung von Edelstahlproben aus 1.2343	109
10.1	Versuchsaufbau	110
10.2	Versuchsdurchführung	110
10.2.1	Versuche mit Natriumnitrat NaNO_3	111
10.2.2	Versuche mit Schwefelsäure H_2SO_4	111
10.2.3	Versuche mit Natriumchlorid NaCl	112
10.2.4	Versuche mit Natriumhydroxid NaOH	113
10.2.5	Versuche mit Natriumnitrat NaNO_3 + Natriumcitrat $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$	113
10.2.6	Versuche mit Chlorwasserstoff HCl	113
10.3	Ergebnisse der Abtragversuche an Stahl 1.2343	114
10.3.1	Ergebnisse mit Schwefelsäure H_2SO_4	114

10.3.2	Ergebnisse mit Chlorwasserstoff HCl	115
11	Zusammenfassung und Ausblick	117
12	Literaturverzeichnis	122
13	Abbildungsverzeichnis.....	129
14	Formelverzeichnis	133
15	Tabellenverzeichnis	134
16	Abkürzungsverzeichnis	136
Anhang I	Versuchsparameter.....	141
Anhang II	Anleitung zum Herstellen von Elektrolytlösungen.....	143
Anhang III	Risiko- und Sicherheitssätze der eingesetzten Chemikalien.....	146
Anhang IV	Konstruktionszeichnungen des adaptierten Spülbeckens.....	147
Anhang V	Befehlsliste und Beschreibung ECMTEC „Micro-Production“	150
Anhang VI	Messung der tatsächlichen Vorschubgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Schrittweiten und Vorschubbefehlen.....	154
Anhang VII	Materialdatenblatt Warmarbeitsstahl X37CrMoV5-1 (1.2343).....	155
Anhang VIII	Diagramme zur Genauigkeitsuntersuchung mittels Laserinterferometer Renishaw XL-80 / Software XCal-View.....	157
Anhang IX	Versuchsplan ECM Machining.....	194

1 Einleitung

Bei den klassischen Methoden der Metallbearbeitung zur Veränderung von geometrischen Bauteileigenschaften werden Werkzeuge aus festen und harten Materialien gegen weichere geführt, um einen mechanischen Abtrag zu erzielen. Die negativen Effekte dieser Methoden, wie Wärmeentwicklung und Verschleiß durch Reibung in den Kontaktzonen, stellen einen limitierenden Faktor im aktuellen Wandel hin zu immer komplexeren Produkten dar. Durch den steigenden Technisierungsgrad und der damit einhergehenden Miniaturisierung von Bauteilen rücken neue Bearbeitungstechnologien in den Vordergrund. Dazu zählen unter anderem die Laserbearbeitung, die Funkenerosion und die elektrochemische Bearbeitung. Unter Einsatz dieser Technologien ist es neuerdings möglich, exakte geometrische Formen im Mikrometerbereich zu erzeugen. Die Anwendungsbereiche erstrecken sich von Mikroverzahnungen im Uhrenbau über Elemente für hochempfindliche Sensoren bis hin zu Druckköpfen. Neben der Herstellung von sehr kleinen, individuellen Bauteilen erlauben moderne Fertigungstechnologien, geometrisch bestimmte Formen großflächig auf die Oberfläche von herkömmlichen, makroskopischen Bauteilen zu übertragen. Dadurch können zusätzliche Funktionen generiert werden. Diese Art der Modifikation wird Funktionalisieren von Bauteiloberflächen genannt. In Abstimmung auf den Anwendungsfall können Produkteigenschaften neu erzeugt oder bereits vorhandene verbessert werden. Beispielsweise lassen sich durch laserbasierte Mikrostrukturierung optische Beugungseigenschaften gezielt verändern, oder durch das Aufbringen von mikroskopischen, pilzförmigen Strukturen wasserabweisende (hydrophobe) Eigenschaften erzielen (vgl. [1], [2], Kapitel 7.1).

Zwar bietet das Funktionalisieren von Oberflächen eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Entwicklung neuer oder der Optimierung bestehender Produkte, jedoch ist die technische Umsetzung mit großen Herausforderungen verbunden. Unter anderem sind die Fertigungsprozesse aus technologischer Sicht deutlich komplexer als jene der klassischen Verfahren und bedürfen einer exakten Abstimmung der zum Teil miteinander wechselwirkenden Prozessparameter.

Im Zuge dieser Arbeit wird die Technologie des elektrochemischen Abtrags mit dem Ziel der Erzeugung von funktionalisierten Oberflächen näher untersucht. Aus technologischer Sicht können in der Fertigungstechnik zwei elektrochemische Verfahren unterschieden werden, die Galvanotechnik und das elektrochemische Abtragen. Beide beruhen auf dem Prinzip der Elektrolyse und können grob betrachtet als Umkehrprozess verstanden werden. Während bei der Galvanotechnik eine Metallabscheidung an einer der beiden Elektroden aus einem mit Metallionen angereicherten Elektrolyten stattfindet, nutzt man beim elektrochemischen Abtragen die umgekehrte Polarisierung der Elektroden, um Material eines Werkstückes

kontrolliert abzutragen. Dabei werden zuerst Atome oder Moleküle durch Vorhandensein entgegengesetzt geladener Ionen im Elektrolyten während deren elektrischen Entladung gelöst und hydratisiert (siehe Kapitel 3.2). Anschließend können sie durch die Ausbildung von Hydroxiden ausgefällt oder über den Elektrolyten abtransportiert werden. Die Hauptvorteile dieser Technologie gegenüber klassischer fertigungstechnischer Verfahren liegen einerseits in der nahezu verschleißfreien und thermisch neutralen Bearbeitung, andererseits in der Möglichkeit der Bearbeitung hochfester und hartspröder Spezialwerkstoffe. Auf Grund des Fehlens eines mechanischen Kontaktes zwischen Werkzeug und Werkstück sind außerdem große Aspektverhältnisse realisierbar.

Um einen fundierten Überblick über das zu erarbeitende Themengebiet zu erhalten, wurde für diese Diplomarbeit eine umfassende Grundlagenrecherche zu den Themengebieten technische Chemie und Elektrochemie unter Zuhilfenahme etablierter Fachbücher durchgeführt. Die Ermittlung der relevanten Literaturquellen erfolgte in einem ersten Schritt durch Suche auf den Webseiten der Universitätsbibliothek der TU Wien (<http://www.ub.tuwien.ac.at/>). Die dort einsehbare Literatur in Form von Büchern, Papers oder Journals in Papierform ist für Studenten frei zugänglich und kann somit bei korrektem Verweis auf diese Quellen legal genutzt werden. In einem weiteren Schritt wurde die Recherche auf fachbezogene, internationale Publikationen durch den Einsatz folgender Suchmaschinen ausgeweitet:

- www.sciencedirect.com
- www.scopus.com
- scholar.google.com
- www.springerlink.com

Die genutzte Literatur ist vollständig im Quellenverzeichnis zusammengefasst.

2 Motivation und Zielsetzung

Die am Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik befindliche Bearbeitungsmaschine von ECMTEC mit der Typen-Bezeichnung „Micro-Production“ bietet das zur Erforschung der Technologie des elektrochemischen Abtragens mit ultrakurzen Spannungspulsen notwendige Potential. Als Versuchsanlage konzipiert, sind ihre Hardwarekomponenten leicht zugänglich und alle Parameter innerhalb breiter Grenzen frei variierbar. Im Zuge der Maschinennutzung sollen einerseits Verbesserungs- und Adaptionsvorschläge zur noch nicht umfassend erforschten Bearbeitungstechnologie generiert und andererseits fertigungstechnisch bislang nicht erschlossene Beiträge zu aktuellen Forschungsprojekten geleistet werden. Deren Inhalte sind Fragestellungen zur technischen Umsetzbarkeit theoretischer Ansätze mit dem Hintergrund der wirtschaftlichen Nutzung. Eine dieser Fragestellungen, nämlich der Frage nach der Möglichkeit der Herstellung von funktionalen Mikrostrukturen auf Bauteiloberflächen ist eine Hauptmotivation für diese Arbeit. Nach Wiederinbetriebnahme der elektrochemischen Versuchsanlage werden Experimente zur Beantwortung dieser Frage unternommen.

Den ersten inhaltlichen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die Einführung in die theoretischen Grundlagen der elektrochemischen Bearbeitung. Darin wird auf die während der Bearbeitung ablaufenden elektrochemischen Prozesse und deren Einflussgrößen näher eingegangen. Der zweite Teil dieser Arbeit beinhaltet die Untersuchung der zur Verfügung gestellten μ PECM-Bearbeitungsmaschine zur Erlangung detaillierter Information über den Zustand der elektrischen Komponenten und der Genauigkeit der Antriebe. Dazu gehört die Überprüfung des Pulsstromgenerators auf dessen Leistungsfähigkeit sowie die Vermessung und Qualifizierung der verbauten Antriebe und Führungen auf deren Positionier- und Rundlaufabweichungen. Eine solche Maschinengenauigkeitsuntersuchung stellt die Grundlage dar, um die aus den anschließend durchgeführten Experimenten abgeleiteten Ergebnisse und Erkenntnisse objektiv beurteilen zu können. Eine Beschreibung der zur experimentellen Umsetzung der Genauigkeitsuntersuchung eingesetzten Messmittel ist Gegenstand von Kapitel 5.

Im dritten Teil dieser Arbeit werden Experimente zur maschineninternen Fertigung von Werkzeugen durch Umkehren des elektrochemischen Abtragprozesses beschrieben. Diese Bearbeitungsstrategie bietet einige Vorteile gegenüber der externen Fertigung von geometrisch bestimmten Elektrodenformen, worauf in Kapitel 8 näher eingegangen wird. Ziel dieser Experimente ist die empirische Ermittlung geeigneter Prozessparameter für die Herstellung von Mikrowerkzeugen mit geometrisch definierter Form.

Die dadurch erzeugten Werkzeugelektroden werden nach der messtechnischen Qualifizierung und einhergehender Dokumentation zur weiteren elektrochemischen Bearbeitung des Werkstückes genutzt. In Abhängigkeit der Materialkombination von Werkstück und Werkzeug müssen erneut geeignete Prozessparameter und Elektrolytlösungen zur Abbildung der durch das Werkzeug vorgegebenen geometrischen Form auf das Werkstück ermittelt werden. Um den Einstieg in die Mikrostrukturierung zu erleichtern wird in einem ersten Schritt die bereits bei der Herstellung der Werkzeuggeometrie bzw. Werkzeugform erprobte Materialkombination von Wolfram/Wolfram untersucht. Die Herausforderung besteht darin, die durch das Werkzeug vorgegebenen Konturen möglichst exakt auf das Werkstück zu übertragen.

Ziel anschließender Experimente ist unter anderem die Erzeugung von definierten Mikrostrukturen am Werkstück, welche der Oberfläche wasserabweisende Eigenschaften verleihen sollen. Die experimentelle Umsetzung dieser elektrochemischen Mikrostrukturierung für zwei unterschiedliche Materialpaarungen (Wolfram/Wolfram sowie Wolfram/Warmarbeitsstahl) wird in Kapitel 9 und 10 näher beschrieben. Im Zuge eines aktuellen Forschungsprojektes wurden potentiell geeignete geometrische Formen zur Generierung hydrophober Oberflächeneigenschaften wie folgt festgelegt:

- Zylindrische Werkzeugelektrode mit einem Durchmesser von unter 20 μm
- Kegelige Elektrodenspitze mit einer Höhe von 10 bis 20 μm und einem Basisdurchmesser von 10 bis 20 μm
- Pyramidenförmige Elektrodenspitze mit einer Höhe von 10 bis 20 μm und einer Basisseitenlänge von 10 bis 20 μm

Als Werkstückmaterial wurde der Warmarbeitsstahl 1.2343 (X37CrMoV5-1) vorgegeben. Auf Grundlage einer umfangreichen Recherche zu potentiellen Elektrolytlösungen für die elektrochemische Bearbeitung von Stählen werden anwendbare Elektrolytlösungen ausgewählt und auf deren Eignung hin getestet. Die Erkenntnisse daraus werden anschließend für die finalen Experimente mit dem Ziel der Mikrostrukturierung des Warmarbeitsstahls 1.2343 genutzt. Das abschließende Kapitel enthält Verbesserungsvorschläge der bestehenden Versuchsanlage sowie Vorschläge für weiterführende Maßnahmen zur Umsetzung der Forschungsziele.

3 Grundlagen der elektrochemischen Bearbeitung

Wie der Name bereits verrät, handelt es sich beim elektrochemischen Abtragen, um einen Prozess der sich aus elektrischen und chemischen Mechanismen zusammensetzt. Grundlegendes Wirkprinzip dabei ist die Elektrolyse, auf welche in Kapitel 3.1 näher eingegangen wird. Technologisch betrachtet werden die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 in sechs Hauptgruppen und diese wiederum in mehrere Gruppen unterteilt (siehe Abbildung 1). Das Abtragen wird gemäß DIN 8590 in drei Untergruppen unterteilt: das thermische Abtragen (z.B. Funkenerosion), das chemische Abtragen (z.B. Ätzen) und das elektrochemische Abtragen.

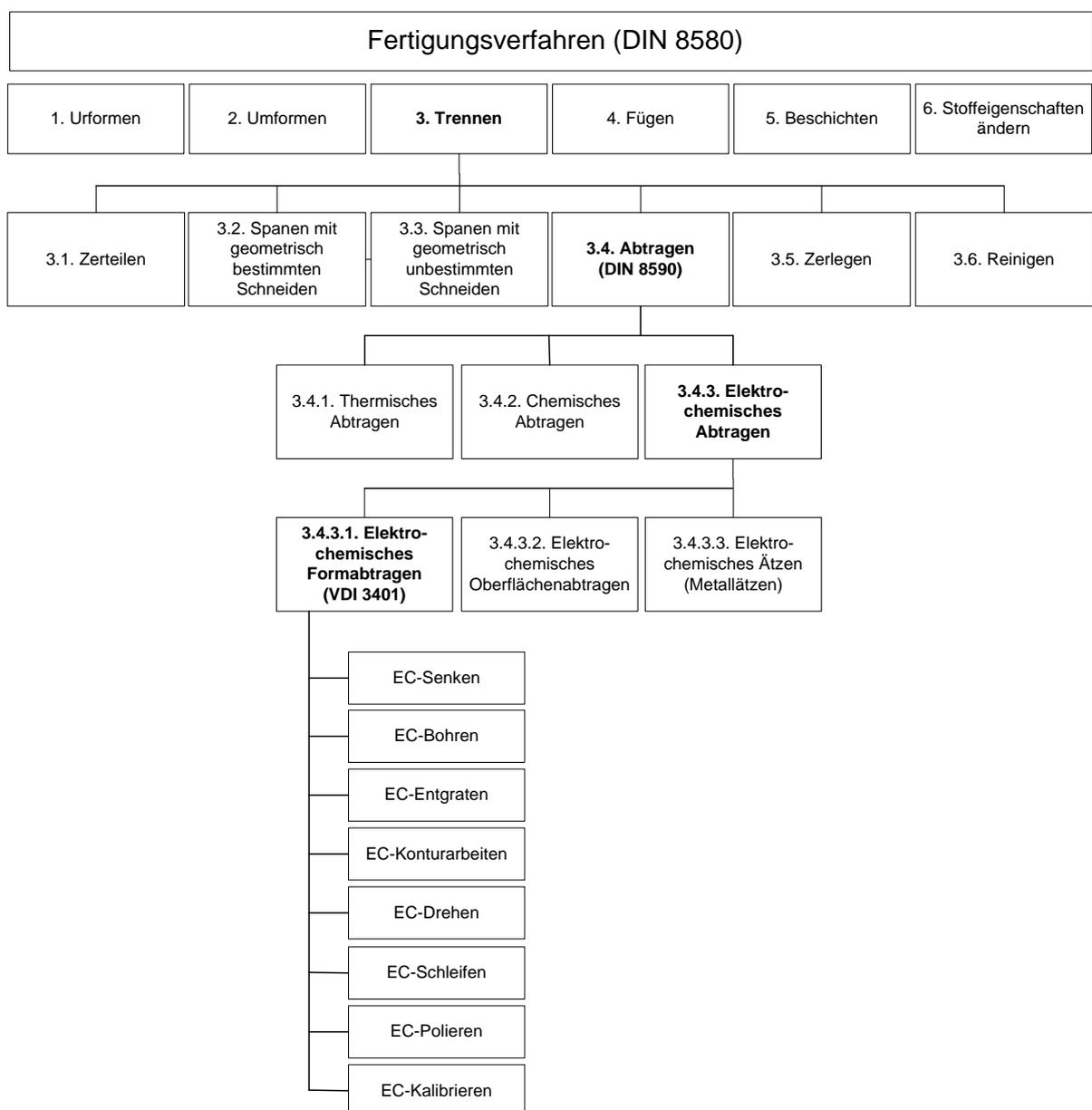


Abbildung 1: Einordnung des elektrochemischen Abtragens innerhalb der Struktur der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (vgl. [3], S. 7ff.), DIN 8590 (vgl. [4], S. 23) und VDI 3401 (vgl. [5], S. 3)

Die VDI-Richtlinie 3401 befasst sich mit dem Verfahren des elektrochemischen Formabtragens von Metallen und praxisrelevanten Hinweisen (VDI 3401, Blatt 1) sowie mit der Behandlung der eingesetzten Elektrolytlösungen, Abwässer und Schlämmen (VDI 3401, Blatt 3).

3.1 Elektrolyse

Beim elektrochemischen Prozess der Elektrolyse wird ein offener Stromkreis zwischen zwei räumlich voneinander getrennten Elektroden (Anode und Kathode) über eine elektrisch leitende Flüssigkeit (Elektrolyt) geschlossen. Dadurch kommt es zur Polarisierung von Anode und Kathode und dem damit verbundenen Wandern der ebenfalls polarisierten Ionen (Anionen und Kationen) im Elektrolyten zum jeweils anderen Pol. Das Anlegen einer Stromquelle mit geeigneter Stärke und einer Gleichspannung größer gleich der Zersetzungsspannung bewirkt, dass Elektronen aus der negativ geladenen Elektrode, namentlich Kathode, von den anliegenden positiv geladenen Kationen abgezogen werden und sich entladen. Dieser Prozess nennt sich Reduktion. Vice versa geben die negativ geladenen Anionen Elektronen an die positiv geladene Anode ab, welche dadurch oxidiert wird. (vgl. [6], S. 189). Abbildung 2 zeigt eine Versuchsanordnung zur Elektrolyse.

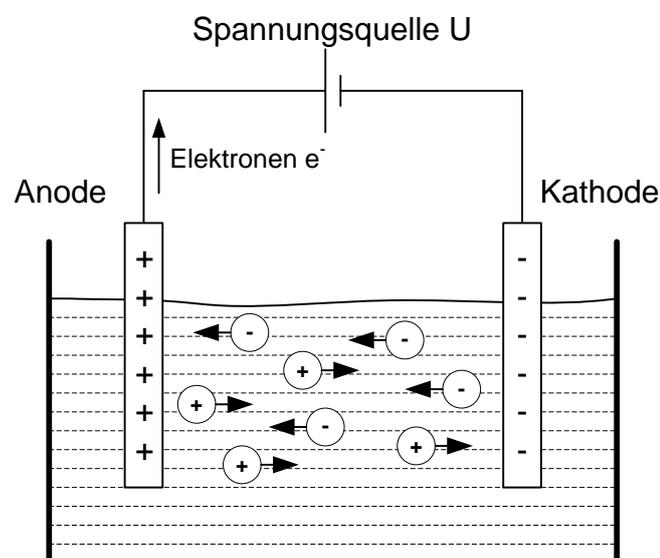


Abbildung 2: Schema einer Elektrolyseapparatur (vgl. [7], S.26)

Wesentlich für den Ionentransport und damit dem Stromfluss ist die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten. Wässrige Elektrolyte mit H_2O als Basis erzeugt man durch Beimengung von Stoffen wie z.B. Salzen, die darin in bewegliche Ionen zerfallen. Dabei lässt sich in Abhängigkeit ihrer Zerfallsrate zwischen starken und schwachen Elektrolyten unterscheiden. „Bei gleicher Stoffmengenkonzentration leiten schwache Elektrolyte den elektrischen Strom schlechter als starke Elektrolyte“ (vgl. [8], S. 112f.).

Typisches Anwendungsgebiet des Verfahrens der Elektrolyse ist die Galvanotechnik. Bei der galvanischen, also kathodischen Metallabscheidung wird ein Werkstück (Kathode) mit einem Metall beschichtet. Dazu wählt man als Elektrolyt eine wässrige Lösung mit einem Salz jenes Materials, mit welchem das Werkstück (Kathode) beschichtet werden soll. Durch den Prozess der Elektrolyse werden die in der Lösung polarisierten Kationen an der Kathode reduziert und erzeugen so eine Beschichtung deren lokale Dicke von der Stromlinienverteilung abhängig ist. Die Stromlinienverteilung ergibt sich auf Grund der geometrischen Form des Werkstückes, der Position und Form der Elektroden und deren Oberflächenbeschaffenheit. Wird als Anode das gleiche Material gewählt, mit welchem die Kathode beschichtet werden soll, wird die Elektrolytlösung kontinuierlich mit frischen Ionen aus der Anode versorgt. Durch spezielle Verfahren wie der reinen chemischen Metallabscheidung können auch nichtmetallische Werkstoffe beschichtet werden (vgl. [9], S.187ff.).

3.2 Elektrochemisches Abtragen von Metall

Beim elektrochemischen Abtragen von Metall unter Verwendung wässriger Elektrolyte werden an der Anode Metallionen gelöst, hydratisiert oder oxidiert und zusammen mit der entstehenden Abwärme über den Elektrolyten abtransportiert. Der Prozess ist vergleichbar mit jener der Korrosion, jedoch stark beschleunigt und präzise kontrolliert (vgl. [10], S. 1). Im Vergleich zur spanenden Fertigung stehen bei der elektrochemischen Bearbeitung Werkzeug und Werkstück nicht im direkten Kontakt. Daraus ergibt sich auch der Hauptvorteil dieses Verfahrens, nämlich keine prozessbedingte mechanische und nur eine geringe thermische Beanspruchung von Werkzeug und Werkstück. Zusätzlich spielen bei der elektrochemischen Bearbeitung nicht die mechanischen Materialeigenschaften wie Härte, Steifigkeit oder Duktilität eine Rolle, sondern einzig die elektrochemischen Eigenschaften der am Prozess beteiligten Materialien. Das intuitive Verständnis des elektrochemischen Abtragprozesses wird dadurch erschwert, dass eine Vielzahl an physikalischen Prozessen, wie laminare / turbulente Elektrolytströmung, Ionentransport durch Diffusion, Konvektion und Migration, überlagerte elektrochemische Reaktionen im Elektroden-Elektrolyt-Interface, homogene Reaktionen, Erzeugung von Reaktionswärme und Stromwärme, Gasbildung, Wärmeleitung, natürliche und erzwungene Wärmekonvektion, Oxidschichtbildung, Pulsstromzustände, kapazitive Effekte, usw. parallel ablaufen und sich gegenseitig stark beeinflussen (vgl. [11], S. 1).

Aufgrund der Vielzahl an prozesstechnischen Parametern und der damit verbundenen Komplexität der Prozesssteuerung wird bei der Einstellung der Prozessparameter meist auf die Trial & Error-Methode zurückgegriffen. Da dieses Vorgehen zeit- und kostenintensiv ist, sind verschiedene mathematische

Modellansätze zur Simulation des ECM-Prozesses Ziel aktueller Forschungsaktivitäten (vgl. [10], S. 1). Abbildung 3 zeigt die Einflussfaktoren bei der elektrochemischen Bearbeitung.

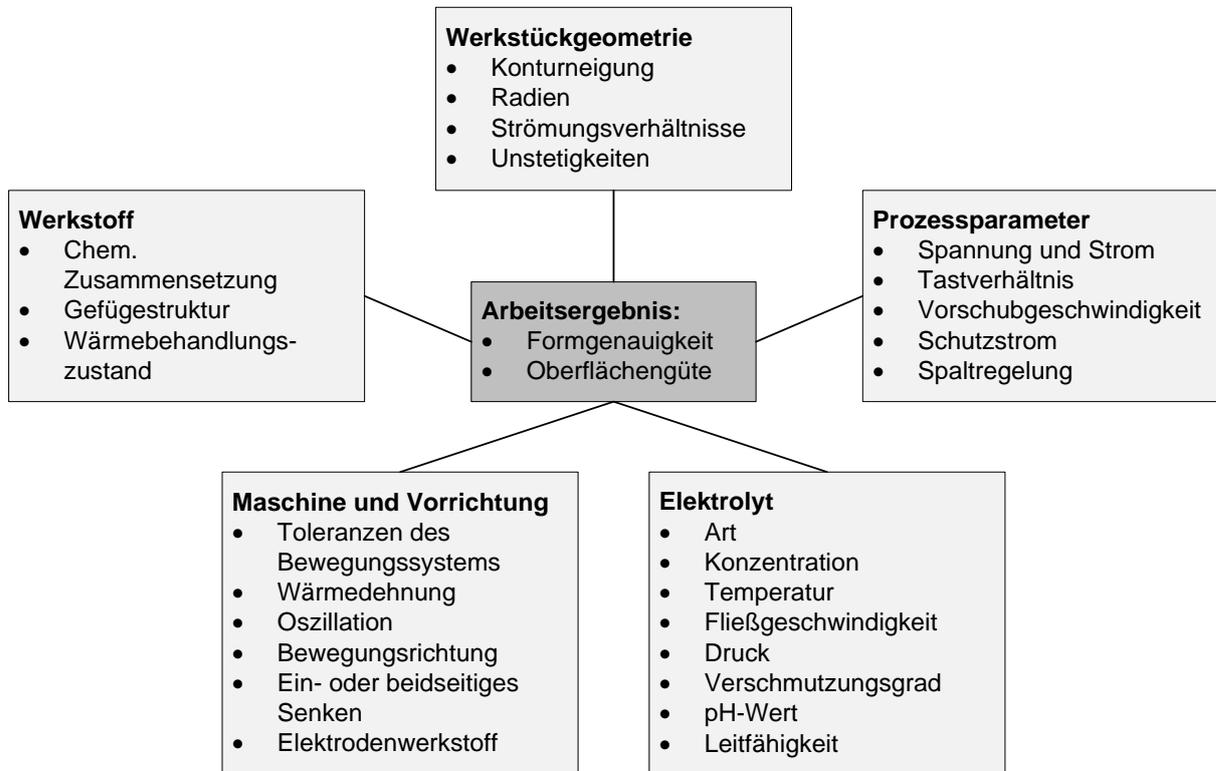


Abbildung 3: Einflussfaktoren beim elektrochemischen Bearbeiten (vgl. [12], S.11)

Betrachtet man den Prozess der elektrochemischen Metallauflösung im Detail, so lassen sich drei Phasen erkennen, welche später parallel ablaufen (siehe Abbildung 4). In der ersten Phase löst sich ein Metallatom aus seinem Gitterplatz und geht in den beweglichen Oberflächenzustand über, wo es bereits teilweise hydratisiert wird. Durch Aufnahme von Elektronen der Wassermoleküle wird es dann vollständig hydratisiert und geht in Lösung (vgl. [13], S.234). In der zweiten Phase bewegt sich das polarisierte, hydratisierte Metallatom durch den wässrigen Elektrolyten in Richtung Kathode. Dabei kommen drei Stofftransportmechanismen zum Tragen, nämlich Konvektion, Diffusion und Migration. Bei der Konvektion handelt es sich um einen vom lokalen Energieniveau abhängigen Stofftransport, bei dem die Metallatome durch die temperaturbedingten Druckunterschiede im Elektrolyten vom Ort höherer Temperatur zum Ort niedrigerer Temperatur streben. Mit zunehmendem Abstand zur Anode nimmt der konvektionsbedingte Stofftransport ab, im Bereich der Kathode geht er gegen Null (vgl. [8], S. 243f.). Bei der Diffusion handelt es sich um eine thermische Eigenbewegung der Teilchen durch Konzentrationsunterschiede. Da sich die Moleküle im Elektrolyten in ständiger, statisch nicht gerichteter Wärmebewegung befinden, genügt das Vorhandensein eines Konzentrationsgefälles, um diese Moleküle in eine gerichtete Bewegung vom Ort

höherer Konzentration zum Ort niedrigerer Konzentration zu versetzen (vgl. [8], S. 244f.).

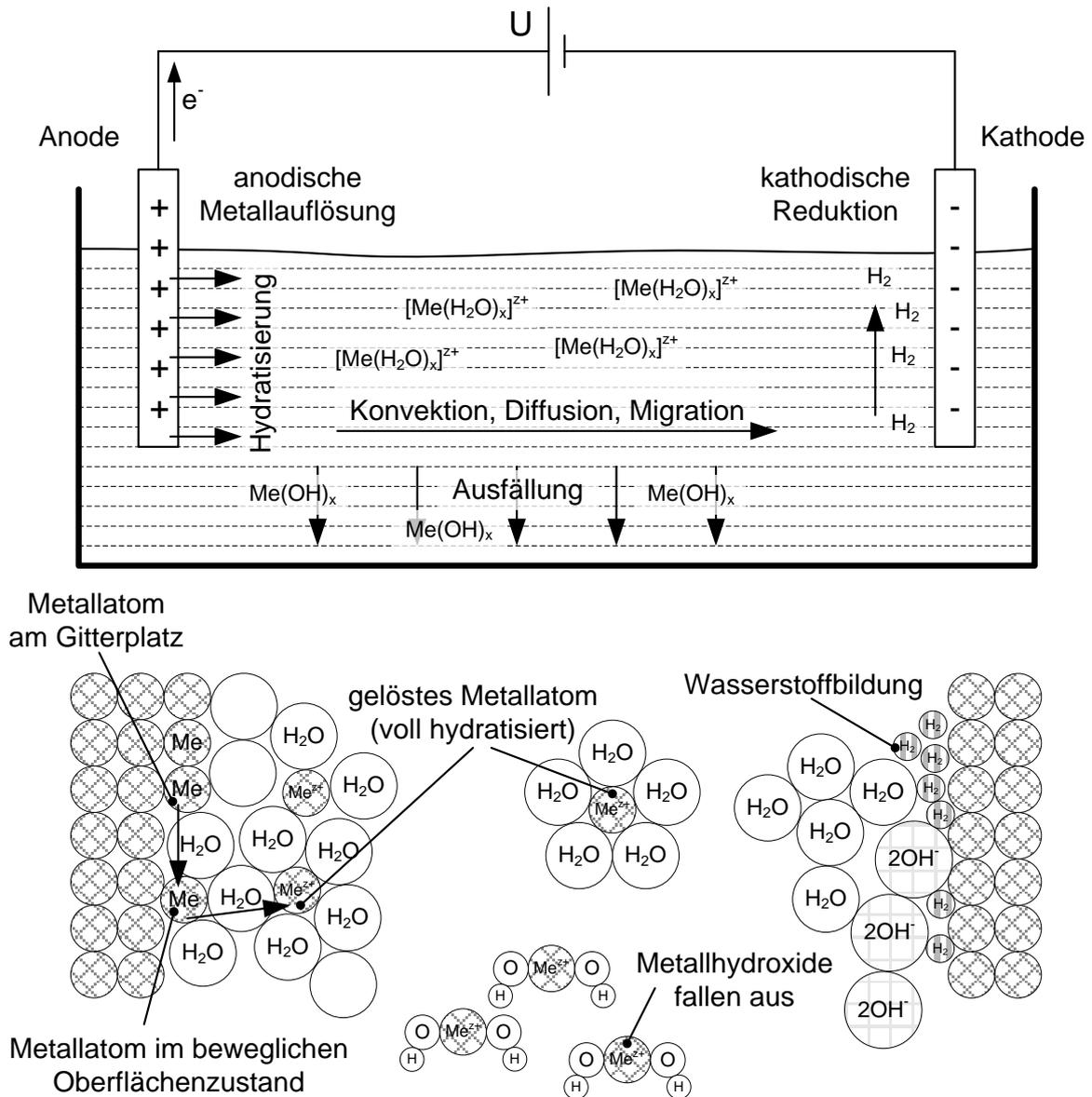


Abbildung 4: Vorgänge bei der elektrochemischen Metallauflösung (vgl. [9], S. 134, [8], S. 241ff., [13], S. 234)

Da es sich bei den hydratisierten Metallatomen, um positiv geladene Ionen (Kationen) handelt, die sich in einem elektrischen Feld befinden, sind sie einer elektrostatischen Kraft ausgesetzt. Die dadurch entstehende Bewegung der Kationen in Richtung der negativ geladenen Kathode nennt man Migration. Sie ist von der Stärke des anliegenden elektrischen Feldes und damit von dem Quotienten aus Spannung und Abstand der Elektroden zueinander abhängig. Ihr Anteil an der Gesamtbewegung ist jedoch üblicherweise klein, da der Potentialgradient bei gut leitenden Elektrolytlösungen in den meisten praktischen Fällen gering ist (vgl. [8], S. 245f. und [13], S. 204). Diese drei Mechanismen bewirken und fördern eine

Beschleunigung der Metallionen in Richtung Kathode. Die sich einstellende maximale Geschwindigkeit ergibt sich durch ein Gleichgewicht aus elektrischer Kraft und der mit steigender Geschwindigkeit zunehmenden Stokesschen Reibungskraft (vgl. [13], S. 11f.).

In einer möglichen dritten Phase kommt es zur Reaktion der gelösten Metallionen mit Bestandteilen des Elektrolyten und der damit verbundenen Bildung von Hydroxiden. Die Neigung zur Ausbildung von Hydroxiden ist abhängig vom gelösten Metall und dem pH-Wert des Elektrolyten (vgl. [5], S. 5).

Entfernen sich die Hydroxide auf Grund des wirkenden Schwerefeldes oder der geometrischen Anordnung von der Werkzeugelektrode oder werden die gelösten, voll hydratisierten Metallatome durch den Einsatz eines geeigneten Spülsystems/-Mechanismus vor dem Erreichen des kathodischen Werkzeuges abtransportiert, findet dort keine elektrochemische Metallabscheidung bzw. galvanische Schichtentstehung statt (vgl. [8], S. 241f.). Positiv wirkt in diesem Zusammenhang auch die prozessbedingte elektrolytische Gasbildung an den Elektroden, die eine Verwirbelung der gelösten Metallatome im umgebenden Elektrolyten fördert. Es sei hier nochmals festgehalten, dass an der Kathode prozessbedingt kein elektrochemischer Abtrag stattfindet (vgl. [9], S. 135).

Als Nebenprodukte des Prozesses entstehen in Abhängigkeit des zu bearbeitenden Materials und des Elektrolyten Verunreinigungen und diverse Gase, welche entsprechend der geltenden Sicherheitsbestimmungen und Umweltauflagen behandelt werden müssen (vgl. [14]). Bei Bearbeitungsstrategien, die einen hohen Verbrauch von Elektrolyten erfordern, bietet sich ein Kreislaufsystem zur Wiederaufbereitung an (siehe Abbildung 15). Die Abtragprodukte, welche bei passendem pH-Wert des Elektrolyten als Metallhydroxide in sog. Schlämmen anfallen, können durch Sedimentieren oder Zentrifugieren entfernt werden.

Bei der Bearbeitung von chromhaltigen Materialien wie z.B. rostfreien Stählen, entstehen unter anderem sechswertige Chromverbindungen, welche auf den Menschen toxisch und stark karzinogen wirken. Daher müssen sie im Zuge der Abwasseraufbereitung zu dreiwertigem Chrom reduziert werden. Gelöste Schwermetalle können durch Neutralisation und der damit verbundenen Bildung von schwerlöslichen Metallhydroxiden oder Salzen chemisch abgeschieden werden. Weitere bei der elektrochemischen Bearbeitung anfallende Problemstoffe sind toxische Nitrite. Sie müssen entweder durch Oxidation oder Reduktion zu Nitraten umgewandelt werden (vgl. [14], S. 3ff., siehe auch 3.7.7).

Durch den Elektronenaustausch und der H^+ -Bildung an der Anode wird die Grenzschicht zwischen Werkstück und Elektrolyt chemisch sauer (pH-Wert < 7). Parallel bildet sich an der Anode, wie Formel (1) verdeutlicht, Sauerstoffgas O_2 ,

welches den Abtragprozess und die erzeugte Oberflächenqualität unter anderem durch Kavitation negativ beeinflusst (vgl. [12], S. 16f.). Unter Kavitation versteht man das Verdampfen von Flüssigkeiten durch einen strömungsbedingten Unterdruck und der anschließenden Implosion der entstandenen Dampfblasen (vgl. [15], S. 249). Die Menge des sich bildenden Sauerstoffs ist abhängig von der Höhe der Stromdichte und des Elektrodenpotentials im transpassiven Bereich (siehe Abbildung 5). Am kathodischen Werkzeug hingegen bildet sich Wasserstoffgas H_2 , welches über den Elektrolytstrom abgeführt oder im Maschinenraum abgesaugt werden muss (vgl. [13], S. 236):



Neben den in Abbildung 3 dargestellten Einflussfaktoren stellt auch das Abtragsvolumen V_{SP} eine wichtige Kenngröße der elektrochemischen Bearbeitung dar. Es ist abhängig von der Abtraggeschwindigkeit v_a und der Stromdichte J (vgl. [9], S. 139):

$$V_{SP} = \frac{v_a}{J} \quad (2)$$

Unter der Stromdichte J versteht man den vom Widerstand der Fläche F abhängigen Stromfluss I in A/mm^2 (vgl. [12], S. 26):

$$J = \frac{I}{F} \quad (3)$$

Eine Erhöhung der Stromdichte führt zu einer Senkung des Mittenrauwertes R_a und damit zur Verbesserung der Oberflächengüte (vgl. [9], S. 147f.). Ein Phänomen, welches einen starken Einfluss auf die elektrochemische Bearbeitung ausübt ist die Passivierung der Anodenoberfläche. Darunter versteht man die bei der anodischen Auflösung bedingte Anhäufung von Metallionen an der Materialoberfläche. „Dies kann bei einer bestimmten Auflösungsgeschwindigkeit zum Überschreiten des Löslichkeitsprodukts des Metallhydroxids oder –oxids an der Phasengrenze führen“ (vgl. [13], S. 236). Die sich bildende Passivschicht bewirkt ab einem bestimmten Elektrodenpotential (dem sog. Flade-Potential) ein Sinken der Stromdichte (Abbildung 5). Bei stetiger Erhöhung der Potentialdifferenz erreicht man in Abhängigkeit der Elektrolyt-/Materialpaarung und der Elektrolytkonzentration den transpassiven Bereich, in welchem meist durch zusätzliche Sauerstoffbildung die Stromdichte wieder steigt. Ob dieser transpassive Bereich nun in der Realität erreicht werden kann oder nicht, hängt davon ab, ob die sich ausbildende Passivschicht elektronenleitend ist und damit geringere Potentialdifferenzen zum Überwinden des passiven Bereichs benötigt (wie z.B. bei Eisen, Nickel, Kobalt und Zink) oder nicht (wie z.B. bei Aluminium, Titan oder Tantal). Eine Aktivierung ist auch im

Passivbereich durch Beimischung geeigneter Stoffe möglich (vgl. [13], S. 236f.). Bei Stahl erreicht man dies zum Beispiel durch eine Kombination aus Salzsäure (HCl) und Flußsäure (HF) – eine aggressive Elektrolytmischung, die die Ausbildung einer Oxidschicht unterdrückt (vgl. [16], S. 77).

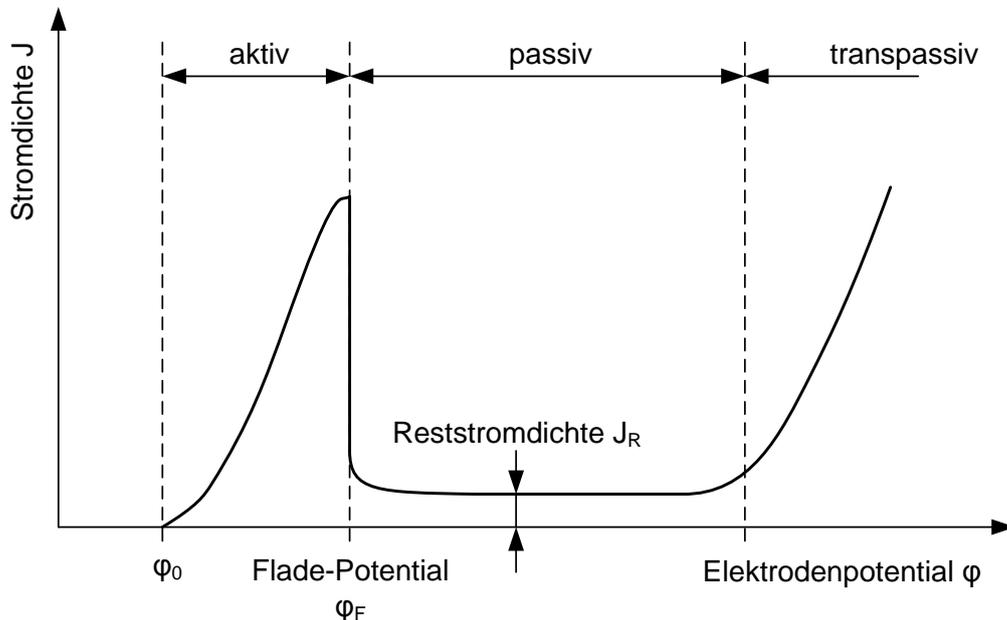


Abbildung 5: Strom-Spannungs-Kurve der Metallauflösung bei Bildung einer passiven Deckschicht (vgl. [13], S. 236)

Aus fertigungstechnischer Sicht wird beim elektrochemischen Senken zwischen Seiten- und Stirnspalt unterschieden. Im Fall einer zylindrischen Werkzeugelektrode befindet sich der Stirnspalt zwischen unterer Zylinderdeckfläche und Werkstückoberfläche. Auf Grund der geraden Stromlinien im Stirnspalt können kleine Arbeitsspalte und eine hohe geometrische Maßhaltigkeit erreicht werden (vgl. [12], S. 23). Wird auch entlang der Zylindermantelfläche elektrochemisch abgetragen, so spricht man von der Bearbeitung im Seitenspalt. Unter dem Begriff des Arbeitsspalt wird jener Bereich zwischen Anode und Kathode verstanden, in dem der elektrochemische Abtragprozess abläuft – dies kann den Seiten- aber auch Stirnspalt beinhalten. Bei der herkömmlichen elektrochemischen Bearbeitung liegt der Arbeitsspalt im Bereich von ca. 1 mm (vgl. [12], S. 19).

3.3 Abgrenzung zu anderen trennenden Bearbeitungsverfahren

Das elektrochemische Abtragen als industrielles Fertigungsverfahren wird bisher nur in jenen Bereichen eingesetzt, wo die spanende Fertigung an ihre Grenzen stößt. Die Gründe dafür liegen hauptsächlich an der guten Verfügbarkeit von herkömmlichen Bearbeitungsmaschinen und das über Jahrzehnte aufgebaute Prozess-Know-How.

Eben diese Gründe führen dazu, dass es für jüngere Fertigungsverfahren wie das elektrochemische Abtragen, das funkenerosive Abtragen oder die Laserablation bis vor kurzem nur einen kleinen Markt gab. Die Tendenz hin zu komplexeren und vor allem kleineren Produkten führt dazu, dass den zuletzt genannten Verfahren immer mehr Aufmerksamkeit geschenkt wird. Zusätzlich erfordern moderne Werkstoffe, wie metallische Verbundwerkstoffe, spezielle Bearbeitungsstrategien, die mit herkömmlichen Verfahren nur schwer zu realisieren sind. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der genannten Bearbeitungsverfahren.

Vor- und Nachteile trennender Bearbeitungsverfahren	Trennen			
	Spanen m. geometrisch bestimmter Schneide	Abtragen		
		Elektrochemisches Abtragen ECM	Thermisches Abtragen	
			Funkenerosives Abtragen EDM	Laserablation
Mechanischer Eintrag	hoch			
Thermischer Eintrag	hoch	niedrig	hoch	hoch
Werkzeugverschleiß	mittel	niedrig	niedrig	
Werkzeugkosten	mittel	niedrig	niedrig	
Bearbeitungsdauer	niedrig	hoch	mittel	mittel
Maßhaltigkeit	hoch	hoch	mittel	mittel
Untere Grenze herstellbarer Geometrien	≈ 100 µm	≈ 10 µm	≈ 50 µm	≈ 1 - 10 µm*
Erzielbare Oberflächengüte	hoch	hoch	mittel	mittel
Aufwand Infrastruktur	niedrig	mittel	niedrig	hoch
Anschaffungskosten Maschine	niedrig/mittel	mittel	mittel	hoch

* ideale, physikalische Grenze des Fokuspunktdurchmessers ist die Wellenlänge (CO₂-Laser ≈ 10 µm, Nd:YAG-Laser ≈ 1 µm)

Tabelle 1: Vergleich trennender Bearbeitungsverfahren

3.4 PECM und µPECM

Im Vergleich zum kontinuierlichen elektrochemischen Abtragen, setzt man beim Pulsed oder Precise Electro Chemical Machining (kurz: PECM) elektrische Spannungspulse zum Aktivieren des Elektrolyse- und damit des Abtragprozesses ein. Durch das modulierte Pulsen der Spannung können höhere Stromdichten angelegt werden, die mit Abnahme der Pulsdauer ansteigen. Steigende Stromdichten J führen auf Grund ihrer indirekten Proportionalität nach Formel (4) zu einer Reduktion des Arbeitsspalt s (vgl. [9], S. 140).

$$s \approx \frac{1}{J} \quad (4)$$

Über die Dauer der Pulsweite lässt sich daher die Breite des Arbeitsspalt es einstellen. Im elektrischen Ersatzschaltbild des gepulsten elektrochemischen Abtragprozesses verhält sich der Elektrolyt wie ein Widerstand R dessen Betrag von der Breite des Arbeitsspalt es abhängt (siehe Abbildung 6).

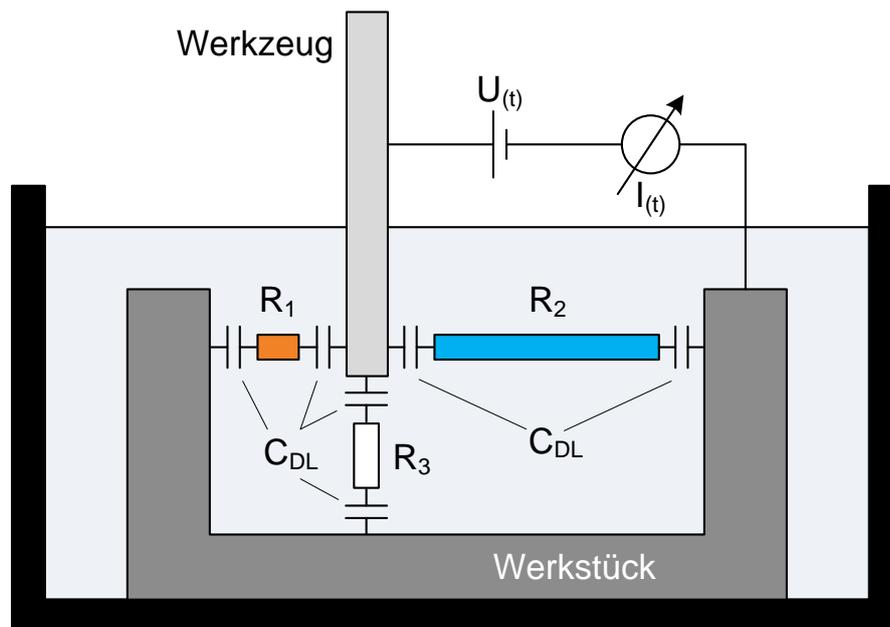


Abbildung 6: Elektrisches Ersatzschaltbild des elektrochemischen Abtragprozesses (vgl. [17], S. 10)

Die Grenzfläche zwischen Elektrolyt und Elektrode, die sog. Doppelschicht (Double Layer - DL), verhält sich wie ein Kondensator mit einer vom Abstand weitgehend unabhängigen Kapazität C_{DL} . Wird ein elektrischer Spannungspuls angelegt, beginnen sich die Kondensatoren mit der Zeitkonstante τ zu laden (siehe Formel (5)).

$$\tau = R * C_{DL} \quad (5)$$

Der Betrag der Zeitkonstante ist bei Annahme konstanter Kapazitäten nur vom Widerstand, d.h. der Spaltbreite abhängig. Abbildung 7 zeigt das Signal einer gepulsten Rechteck-Spannung und den damit verbundenen, charakteristischen Parameter ppr. Zusätzlich werden zwei beispielhafte Sprungantworten der in Abbildung 6 dargestellten RC-Glieder gezeigt. Im ersten Fall (orangefarbener Widerstand / orange Linie) ist der Arbeitsspalt ausreichend gering, sodass die Elektrolyse-Reaktionsspannung überschritten wird und damit ein elektrochemischer Abtrag möglich ist. Im zweiten Fall (blauer Widerstand / blaue Linie) kann dies nicht erreicht werden da die Spaltweite bzw. der Widerstand zu groß ist.

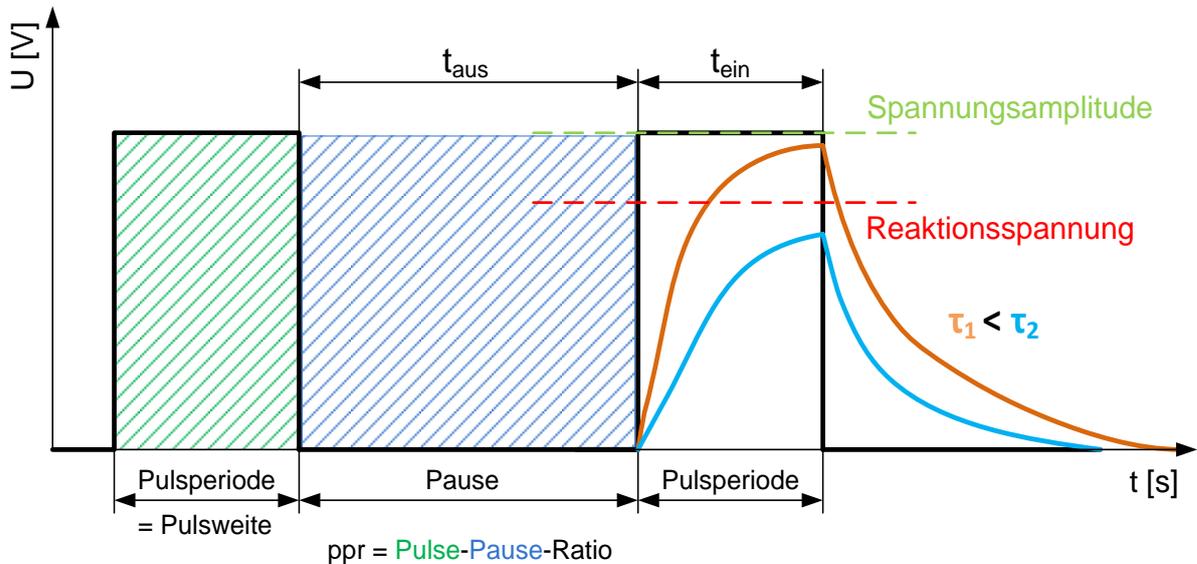


Abbildung 7: Sprungantwort und Puls-Pause-Ratio (Puls-Pause-Verhältnis)

Damit stellt sich bei ausreichend langer Bearbeitungszeit eine um die Werkzeugelektrode konstante und von der Pulsweite abhängige Arbeitsspaltbreite ein.

Neben der Reduktion des Arbeitsspaltbes begünstigt das Pulsen der Spannung den Abtransport der Löslichkeitsprodukte und den Austausch des verbrauchten Elektrolyten bedingt durch das entstandene Konzentrationsgefälle. Diese Pause, bei der die Spannung zwischen den Pulsen auf null sinkt, bzw. eine Umpolung stattfindet, wird Relaxationszeit t_{aus} genannt (vgl. [18], S. 2). Je nach Dauer der Pulsperioden unterscheidet man zwischen PECM und μ PECM, wobei letzteres für ECM mit ultrakurzen Spannungspulsen im Mikro- bzw. Nanosekundenbereich steht.

Durch die Reduktion der Pulsweite und damit des Arbeitsspaltbes auf Werte von 0,001 mm bis 0,1 mm und der dadurch bewirkten Abflachung der Stromlinien zwischen Kathode und Anode können im Vergleich zum herkömmlichen ECM exaktere Konturen gefertigt werden (vgl. [12], S. 19f.). Wichtig ist dabei jedoch, dass ein guter Abtransport der entstehenden Metallhydroxide gewährleistet wird, da es sonst zu Kurzschlüssen oder Funkenüberschlägen kommen kann. Dies kann einerseits durch einen optimierten Elektrolytfluss geschehen, was eine Druck- bzw. Durchflussregelung voraussetzt, oder durch das Oszillieren der Werkzeugelektrode. Die Hubbewegung der Elektrode öffnet den Arbeitsspalt und gewährleistet eine bessere Abfuhr der entstehenden Abtragprodukte, Wärmeenergie und Gasblasen (vgl. [12], S. 20). Realisiert wird die Oszillation üblicherweise durch den Einsatz eines Piezo- oder Exzenterwellenantriebes. Die Oszillationsfrequenz solcher Systeme liegt im Bereich von 50 Hz (vgl. [9], S. 157). Aus der Kombination von Hubbewegung und Pulsweitenmodulation, d.h. durch Festlegung von Ein- und Ausschaltwinkel und

der jeweiligen Pulsdauer, lässt sich der Bearbeitungsprozess weiter optimieren (Abbildung 8).

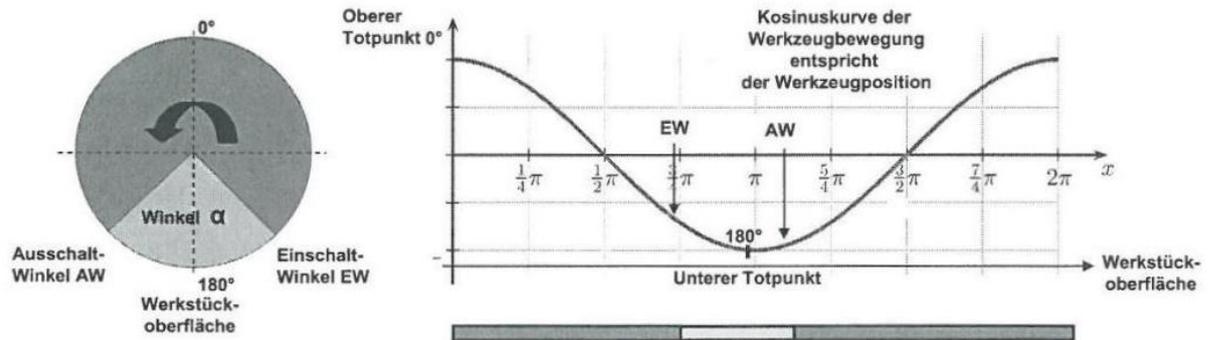


Abbildung 8: Kenngrößen der elektrochemischen Bearbeitung mit mechanischer Oszillation der Werkzeugelektrode (vgl. [12], S.21)

Die Vermeidung bzw. Überwindung einer Passivschicht an der anodischen Werkstückoberfläche stellt auch beim μ PECM mit ultrakurzen Spannungspulsen eine große Herausforderung dar. Eine Möglichkeit hohe Reproduzierbarkeit bei gleichzeitig hoher Abtraggeschwindigkeit zu erzielen, besteht darin, die Passivierung der Metalloberfläche chemisch unter Einsatz von hochkonzentrierten, aggressiven Elektrolyten zu unterdrücken. Kock hat in Experimenten gezeigt, dass dies auch elektrochemisch durch eine Abfolge von Reduktions- und Oxidationsspannungspulsen möglich ist (vgl. [16], S. 80ff.). Die technische Umsetzung basiert auf einem 2-Kanal-Pulsgenerator, welcher sowohl positive als auch negative Spannungspulse erzeugen kann.

Ein Nachteil der Verwendung von ultrakurzen Spannungspulsen ist die im Vergleich zum kontinuierlichen ECM-Verfahren deutlich erhöhte Bearbeitungszeit durch niedrige Vorschubgeschwindigkeiten. Hohe Vorschubgeschwindigkeit (z.B. > 100 nm/s bei Edelstahl 1.4301, vgl. [16], S. 75) können nur durch Bearbeiten im aktiven oder bedingt im transpassiven Bereich erreicht werden.

3.5 Stand der Technik

Die bereits genannten Vor- und Nachteile der elektrochemischen Bearbeitung gegenüber anderen Fertigungsverfahren ermöglichen die Bearbeitung von einerseits besonders hartspröden Werkstoffen, andererseits von metallischen Verbundwerkstoffen wie sie z.B. in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt werden. Vor allem bei der Feinbearbeitung von Triebwerkskomponenten hat sich die Technologie trotz ihrer Komplexität bewährt. Burger beschreibt die elektrochemische Bearbeitung mit ultrakurzen Spannungspulsen von sog. Superlegierungen IN718 und LEK94, welche als Verbundwerkstoff in Turbinenblisks eingesetzt werden (vgl. [12]). Darunter werden in der Luftfahrtindustrie rotierende Triebwerkskomponenten

bezeichnet, die Schaufeln (eng. Blades) und Scheiben (eng. Disks) in einem Bauteil vereinen. Klocke et al. untersucht einige in Triebwerken eingesetzte Werkstoffe auf deren elektrochemische Bearbeitbarkeit (vgl. [19]). Er konzentriert sich dabei auf die möglichen Abtragraten von titan- und nickelbasierten Legierungen und vergleicht theoretisch berechnete Werte mit den Ergebnissen seiner Experimente.

Da bei der spanenden Bearbeitung die Drehzahl proportional zur Reduktion des Werkzeugdurchmessers steigt, erhöhen sich damit auch die Anforderungen an die Werkzeugmaschine. Das Fertigen von Mikrostrukturen erfordert auf Grund der bei konstanter Schnittgeschwindigkeit proportional zum sinkenden Durchmesser steigenden Drehzahl sehr hohe Werkzeug- und damit Spindeldrehzahlen von 100.000 U/min oder mehr. Bei der elektrochemischen Bearbeitung spielt dieses Problem keine Rolle – vielmehr sinken die elektrischen Parameter mit Abnahme der Geometriegröße. Daher eignet sich im Besonderen das μ PECM-Verfahren auf Grund der geringen Arbeitsspaltbreite zur Fertigung von Mikrogeometrien. So beschreibt beispielsweise Xu et al. seine Untersuchungen zur Verbesserung der Oberflächenrauheit der Seitenspaltbereiche beim elektrochemischen Mikrobearbeiten mittels Drahtelektrode (vgl. [20]). Die eingesetzte Drahtelektrode aus Wolfram besaß einen Durchmesser von 10 μm , als Anodenmaterial wurde eine kobaltbasierte Superlegierung gewählt. Um den Abtransport der sich im Arbeitsspalt aggregierten Abtragprodukte (meist Hydroxide) zu erleichtern und damit die Oberflächenrauheit zu reduzieren, lässt Xu sowohl das Werkzeug als auch das Werkstück in Achsrichtung der Drahtelektrode oszillieren. Ergebnis der optimierten Bearbeitung ist eine Mittenrauheit R_a der Seitenspaltoberfläche von 58 nm.

Durch Modifikation der Werkzeugelektrode gelang es Jo et al. in Durchgangsbohrungen 3D-Mikrogeometrien einzubringen (vgl. [21]). Unter Einsatz eines funkenerosiven Verfahrens erzeugte er eine Scheibenelektrode, dessen Schaft zwecks Isolation mit Polystyrol beschichtet wurde. Die damit gefertigten Hinterschnitte haben Nuttiefen von wenigen Mikrometern und eine hohe Formgüte (Abbildung 9).

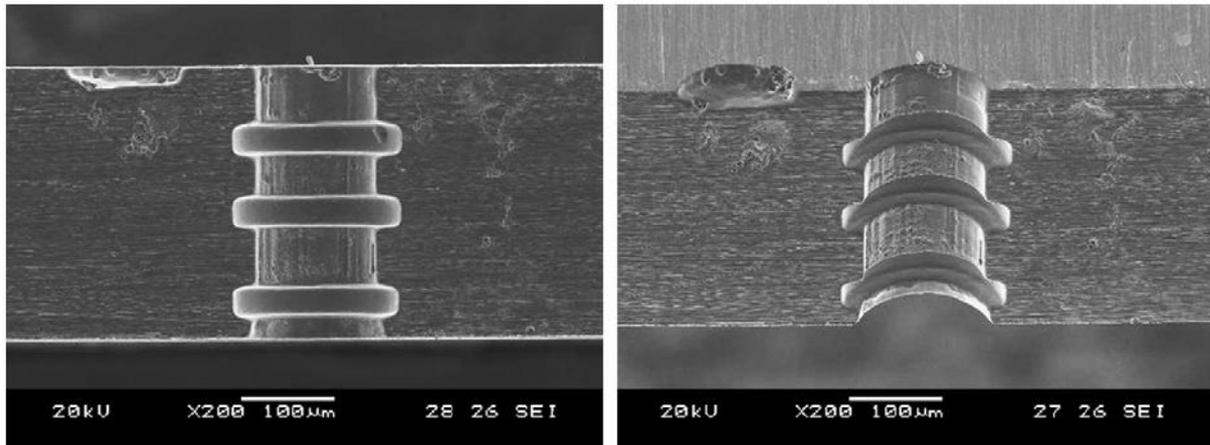


Abbildung 9: Mittels Scheibenelektrode erzeugte Hinterschnitte mit geringer Oberflächenrauheit (vgl. [21], S. 4)

Neben der Reduktion und Modifikation der Werkzeugelektrode stellt die Selektion des zum Werkstückmaterial passenden Elektrolyten eine große Herausforderung dar und muss auf Grund der Komplexität des elektrochemischen Abtragprozesses meist empirisch ermittelt werden.

Kock stellt fest, dass eine Mikrostrukturierung von Edelstahl 1.4301 in reinen Salzelektrolyten auf Grund des neutralen pH-Wertes nicht möglich ist (vgl. [16], S. 75). Daher nutzt er verdünnte Salzsäure zur Durchführung seiner μ PECM-Experimente im transpassiven Bereich. Weiters untersucht Kock das Potential des Einsatzes schwacher Elektrolyte wie Essigsäure bei der Bearbeitung von Werkzeugstahl 1.2312 mit vielversprechenden Ergebnissen (vgl. [16], S.88).

Neben den bereits erwähnten Superlegierungen spielt auch die Bearbeitung von Hartmetall eine große Rolle, da auch dieses mit konventionellen Verfahren nur schlecht bearbeitet werden kann. Bereits 1971 beschäftigt sich Degenhardt mit dem elektrochemischen Senken von Wolframkarbiden (vgl. [22]). Er setzt dabei auf ein bipolares Verfahren, bei welchem Werkzeug und Werkstück durch ständige kontrollierte Umpolung zwischen Anode und Kathode wechseln. Grundidee ist es, die sich bildende Oxidschicht aus gelblichen Wolframtrioxid WO_3 an der Werkstückoberfläche durch kurzzeitige Umpolung der Spannung und der damit einhergehenden kathodischen Aktivierung gezielt abzubauen (vgl. [22], S. 107). Durch diese Aktivierung entwickelt sich an der Phasengrenze des Wolframkarbid-Werkstückes Wasserstoffgas, welches die Passivschicht durch Ausbildung von besser löslichen Oxiden reduziert. Ein Nachteil dieser Herangehensweise ist der durch die Umpolung induzierte elektrochemische Abtrag an der nun anodischen Werkzeugelektrode. In seiner umfangreichen Untersuchung des Prozesses betrachtet er die Einflüsse des Elektrodenwerkstoffes, der Einsenkgeschwindigkeit, der Arbeitsspannung, der Impulsdauer, der Elektrolytzusammensetzung sowie deren Konzentration auf das Abtragverhalten von Wolframkarbiden. Als technologisch

günstiger Elektrodenwerkstoff zur Bearbeitung von WC ist laut Degenhardt Graphit zu empfehlen (vgl. [22], S. 141).

Nach Choi et al. wird zur Bearbeitung von Wolframkarbid mit Kobaltmatrix ein Elektrolyt benötigt, der in der Lage ist, im Zuge der elektrochemischen Bearbeitung sowohl Wolfram als auch Kobalt parallel aufzulösen (vgl. [23]). Er konnte zeigen, dass sich unter Verwendung von NaNO_3 als Elektrolyten Kobaltoxid bildet, welches sich im Arbeitsspalt kumuliert und den Auflösungsprozess zunehmend stört. Da sich H_2SO_4 gut zum Lösen von Kobalt eignet, untersuchte Choi auch diesen Elektrolyten. In diesem Fall bildete sich Wolframoxid, welches gleich dem Kobaltoxid den elektrochemischen Bearbeitungsprozess störte und die erzeugte Oberflächenqualität negativ beeinflusste. Er kam zum Schluss, dass es einer Kombination beider getesteten Elektrolyte benötigte und erzielte die besten Oberflächenergebnisse mit einer Elektrolytlösung von 0,5 M NaNO_3 + 0,2 M H_2SO_4 .

Von Schubert et al. durchgeführte Experimente mit einer Kathode aus Gold ergaben sehr gute Ergebnisse beim elektrochemischen Abtragen von 99,95% reinem Kobalt. Als Elektrolyt wurde dabei Natriumnitrat NaNO_3 mit einem pH-Wert von 6 verwendet (vgl. [24]).

Durch die Vielzahl an beeinflussenden Parametern und der damit verbundenen aufwändigen empirischen Optimierung des elektrochemischen Abtragprozesses, ist die Entwicklung von Simulationsmodellen Teil aktueller Forschungsaktivitäten. Zum Beispiel beschreibt Deconinck et al. in [10], [11] und [25] ein numerisches, temperaturabhängiges Simulationsmodell welches den Massenaustausch als Konsequenz der Diffusion, Konvektion und Migration sowie der temperaturabhängigen Polarisationsbeziehungen im Elektrolyt / Elektroden-Interface berücksichtigt. Simuliert wird das elektrochemische Abtragen von Stahl (6C27) mit NaNO_3 als wässrigem Elektrolyten und einer Elektrode aus Bronze. Im Zuge dieser Publikation wurde die Entwicklung von Reaktionsgasen an Anode und Kathode sowie das Strömungsverhalten des Elektrolyten genauer untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Wärmeübertragung durch die Elektrode und die Wärmeerzeugung durch die Reaktionen an der Elektrode eine wichtige Rolle bei der Gasentwicklung spielen.

3.6 Materialien

Mit dem ECM-Verfahren können grundsätzlich alle leitenden, metallischen Werkstoffe bearbeitet werden. Auf Grund der Komplexität des Prozesses und der längeren Bearbeitungsdauer wird ECM im industriellen Maße hauptsächlich für hochfeste Werkstoffe wie Stähle unterschiedlicher Legierungselemente, Nickellegierungen, Titanlegierungen, Kobaltlegierungen eingesetzt (vgl. [26], S. 517). Ausnahme bilden Fertigungsprozesse von aufwendigen Kleinserien mit komplexen

Freiformflächen, besonders aufwendige Lochmuster mit vielen sehr kleinen Bohrungen oder nicht runden Lochquerschnitten, bei denen sich der Einsatz von ECM trotz höherer Prozessanpassungskosten auch bei Standardmaterialien lohnt.

Hauptanforderungen an die Werkzeugelektrode sind eine gute elektrische Leitfähigkeit, eine hohe mechanische Belastbarkeit im Falle eines Kontaktes mit dem Werkstück sowie in Abhängigkeit der Bearbeitungsstrategie (monopolares oder bipolares Verfahren) eine hohe elektrochemische Beständigkeit. Da reines Wolfram diese Anforderungen erfüllt und gut elektrochemisch oder mittels Funkenerosion bearbeitbar ist (sog. Werkzeugshaping), ist es als Werkzeugmaterial zur Bearbeitung der im Zuge dieser Arbeit untersuchten Anodenwerkstoffe geeignet.

Neben Wolfram wird häufig Kohlenstoff in Faserform als Werkzeugmaterial eingesetzt. Kohlenstofffasern weisen eine gute elektrische Leitfähigkeit auf und besitzen im Vergleich zu metallischen Drähten gleichen Durchmessers eine höhere Zugfestigkeit. Produktionsbedingt sind sie zylindrisch und besitzen Durchmesser von unter 10 μm . Da ein gezieltes Werkzeugformen bei Kohlenstoffelektroden schwierig ist, kann die fest vorgegebene Zylinderform einen großen Nachteil im Vergleich zu metallischen Elektroden darstellen. Wielage et al. beschreibt verschiedene Kohlefasern und deren Eignung als ECM-Elektroden (vgl. [27], S. 1f.). Er konnte zeigen, dass der Verschleiß der Werkzeugelektrode aus Kohlenstoff stark von deren Herstellungsverfahren und Beschichtung (Schlichte) abhängt.

Da mittels μPECM meist sehr kleine Geometrien gefertigt werden sollen, ist die geometrische Form des Werkzeuges von ganz wesentlicher Bedeutung. Üblicherweise benutzt man handelsübliche, gerade Drähte als Elektroden, welche einen Durchmesser im Bereich von 0,1 mm bis 1 mm besitzen. Sollen Geometrien im Mikrometerbereich gefertigt werden, muss dieser Draht vorbearbeitet werden. Dies kann auf unterschiedliche Arten geschehen, wobei die Funkenerosion und die elektrochemische Bearbeitung am weitesten verbreitet sind. Jo et al. beschreibt die Fertigung einer Mikroscheibenelektrode mittels EDM-Verfahren (vgl. [21]). Nachteil der externen Fertigung der Werkzeugelektrode ist das Handling zwischen den Bearbeitungsmaschinen und der dadurch bedingte (mehrfache) Einspannfehler. Aus diesem Grund bieten ECM-Bearbeitungsmaschinen die Möglichkeit, durch elektrische Umpolung der Elektroden den Abtragprozess vom Werkstück auf das Werkzeug zu übertragen, um damit die Werkzeuggeometrie maschinenintern anzupassen (siehe Kapitel 8).

3.7 Elektrolyt

Für einen funktionierenden elektrochemischen Abtragprozess wird zwischen Anode und Kathode ein elektrisch leitfähiges Medium benötigt. Dieses Medium entsteht durch den Zerfall von chemischen Verbindungen den sog. Elektrolyten (Salze,

Säuren, Basen) in einem Lösungsmittel (z.B. Wasser). Dieser reversible Prozess wird elektrolytische Dissoziation genannt und resultiert in im Lösungsmittel frei beweglichen, geladenen Atomen bzw. Molekülen, sog. Anionen (negativ geladen) und Kationen (positiv geladen). Aus diesen ionisierten Teilchen ergibt sich die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten. „Lösungen bzw. Schmelzen von Elektrolyten heißen zum Unterschied zu den Metallen (Leiter erster Art) Leiter zweiter Art (= Ionenleiter)“ (vgl. [6], S. 187). Tabelle 2 enthält eine Reihe an Elektrolytlösungen, die zur elektrochemischen Bearbeitung geeignet sind, sowie deren Vor- und Nachteile.

Elektrolyt-lösung	Materialeignung	Konzentration	Vorteile	Nachteile
NaCl, KCl	Stähle Grauguß Al; Al-Leg. Cu; Cu-Leg. Ni; Ni-Leg. Co; Co-Leg. Mo; Mo-Leg. Ti; Ti-Leg.	bis 30 %	billig, ungiftig, nicht brennbar, fast alle Materialien bearbeitbar, hohe Abtragrate	große Spaltaufweitung, hohe Streuwirkung, Neigung zum Korngrenzenangriff, Leitfähigkeit ist temperaturabhängig
NaNO ₃ , KNO ₃	Stähle Grauguß Al; Al-Leg. Cu; Cu-Leg. Ni; Ni-Leg. Co; Co-Leg. Mo; Mo-Leg.	bis 35 %	bessere Oberfläche als bei NaCl, weniger korrodierend	doppelt so teuer wie NaCl, brennbar, hohe Konzentration für gute Leitfähigkeit erforderlich, Leitfähigkeit ist temperaturabhängig, Abtragrate niedriger
NaClO ₃	Stähle	bis 20 %	bestes Abtragverhalten und beste Oberfläche, Leitfähigkeit relativ unabhängig von der Temperatur	sehr teuer, giftig, brennbar, höhere Spannung erforderlich
H ₂ SO ₄	Stähle	bis 10 %	hält Abtragprodukte in Lösung, brauchbar für Bohrungen geringen Durchmessers	teuer, korrosiv, verbraucht sich während der Elektrolyse
NaOH	W WC	bis 5 %	einzig bekannte Elektrolytlösung für EC-Bearbeitung von W und WC	NaOH verbraucht sich
NaCl + NaOH	WC-Co-Leg.	15 % NaCl + 3 % NaOH	WC-Co-Leg. bearbeitbar	geringe Abtragrate, NaOH verbraucht sich
NaCl + NaF	Ti-Leg.	max. 0,3 % NaF	brauchbare Oberfläche im Stirnspalt	höhere Spannung erforderlich, Neigung zur Grübchenbildung

Tabelle 2: Elektrolytlösungen zur elektrochemischen Senkbearbeitung sowie deren Vor- und Nachteile (vgl. [22], S. 50)

3.7.1 Spezifische Leitfähigkeit

Eine einfache elektrochemische Zelle besteht aus einem Elektrolytbad, zwei darin eingetauchten, quaderförmigen, parallel ausgerichteten Elektroden und einer Spannungsversorgung. Wird eine Gleichspannung an die Elektroden angelegt, wandern die im Elektrolyten gelösten Ionen mit einer bestimmten Geschwindigkeit zur entgegengesetzt gepolten Elektrode. Dieser Ionenwanderung wirkt der elektrische Widerstand R entgegen, der einerseits vom Abstand h zwischen den Elektroden und andererseits von deren Fläche F abhängt (vgl. [28], S.35ff.). Es gilt folgende Beziehung:

$$R = \rho * \frac{h}{F} \quad (6)$$

Der Proportionalitätsfaktor ρ wird als spezifischer Widerstand bezeichnet, sein Kehrwert die spezifische Leitfähigkeit κ .

$$\kappa = \frac{h}{F * R} \quad (7)$$

Die spezifische Leitfähigkeit ist sowohl konzentrationsabhängig c als auch temperaturabhängig (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11).

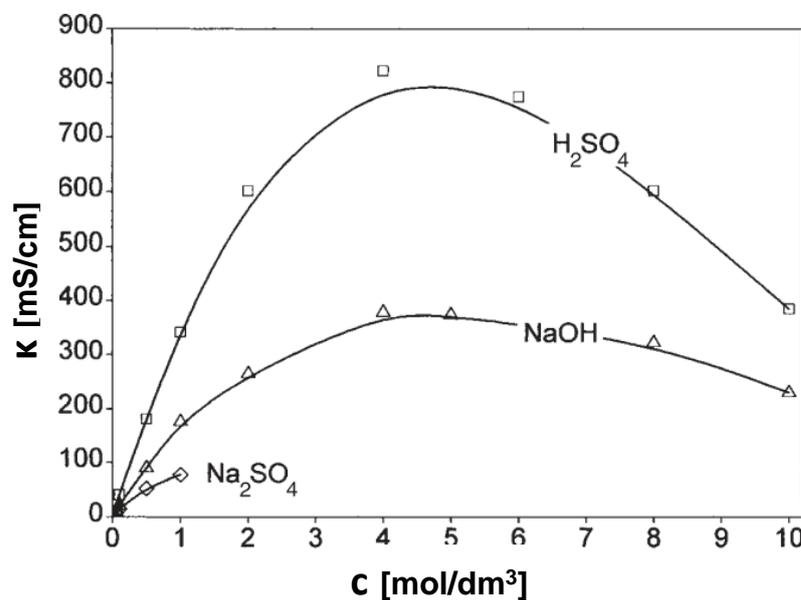


Abbildung 10: Konzentrationsabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit (vgl. [28], S.43f.)

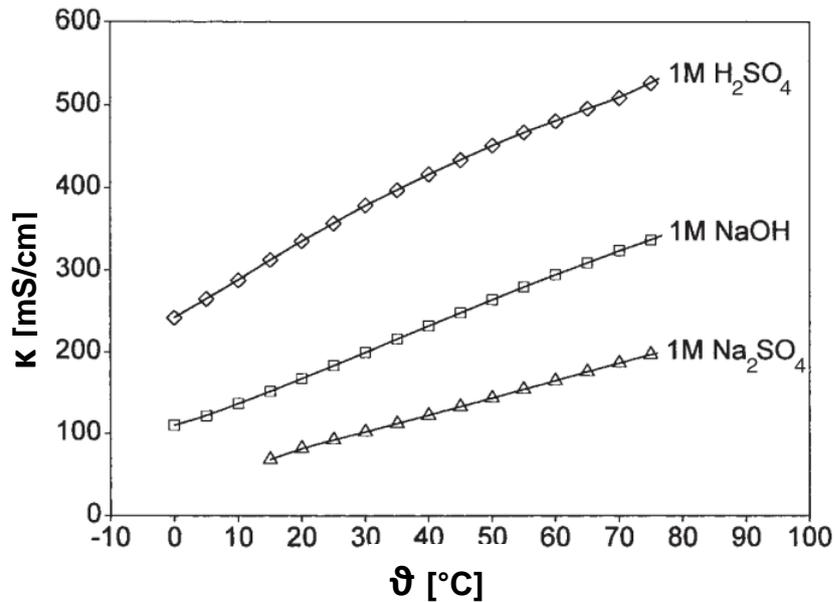


Abbildung 11: Temperaturabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit, (vgl. [28], S.43f.)

3.7.2 Molare Elektrolyt-Leitfähigkeit

Bei der molaren Leitfähigkeit Λ wird die Abhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit κ von der Elektrolytkonzentration c mitberücksichtigt (vgl. [28], S. 46):

$$\Lambda = \frac{\kappa}{c} \tag{8}$$

Die nichtlineare Konzentrationsabhängigkeit der molaren Leitfähigkeit zeigt Tabelle 3 für eine Auswahl an Elektrolyten.

Molare Elektrolyt-Leitfähigkeit $\Lambda_0 \left[\frac{S \cdot cm^2}{mol} \right]$ in Abhängigkeit von der Konzentration bei 19 °C				
Stoff	Stoffmengenkonzentration c [mol/l]			
	1,00	0,1	0,01	0,001
Kaliumchlorid KCl	98,3	112,0	122,4	127,3
Natriumchlorid NaCl	74,4	92,0	102,0	106,5
Natriumnitrat NaNO ₃	-	87,2	98,2	102,9
Natriumhydroxid NaOH	160,0	183,0	200,0	208,0
Salpetersäure HNO ₃	300,0	350,0	368,0	375,0
Salzsäure HCl	-	391,3	412,0	421,4

Tabelle 3: Elektrolyt-Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Konzentration (vgl. [29], S.58)

3.7.3 Einfluss des pH-Wertes

Je nach pH-Wert des Elektrolyten bleiben die herausgelösten Metallkationen entweder gelöst oder bilden unlösliche Metallhydroxide (= Ausfällung). Einen Auszug an Material/pH-Wert-Kombinationen und deren Ausfällungsbeginn zeigt Tabelle 4.

	Theoretische Fällungs-pH-Bereiche			Theoretische Fällungs-pH-Bereiche	
	Fällungsbeginn	Vollständige Abscheidung		Fällungsbeginn	Vollständige Abscheidung
AgOH	8,3	11,3	Zn(OH) ₂	6,6	8,1
Ca(OH) ₂	12,4	13,9	Be(OH) ₂	5,7	7,2
Mg(OH) ₂	9,6	11,1	Cu(OH) ₂	5,1	6,6
Fe(OH) ₂	8,3	9,8	Sn(OH) ₂	2,4	3,9
Ni(OH) ₂	8,1	9,6	Cr(OH) ₂	4,6	5,6
Cd(OH) ₂	8,1	9,6	Al(OH) ₃	3,8	4,8
Mn(OH) ₂	7,9	9,4	Fe(OH) ₃	2,2	3,2
Co(OH) ₂	7,2	8,7	Sb(OH) ₃	0,9	1,9

Tabelle 4: Löslichkeitsprodukte und theoretische pH-Bereiche der Fällung von Hydroxiden (vgl. [30], S. 88)

3.7.4 Temperatureinfluss auf den Elektrolyten

Beim elektrochemischen Abtragen kommt es zu einer Wärmeentwicklung in der elektrochemischen Doppelschicht durch die stattfindenden chemischen Reaktionen. Darunter versteht man die Phasengrenze zwischen Elektrodenleiter (hier Elektrode) und Ionenleiter (hier Elektrolyt). Die Wärme wird durch Konvektion im Elektrolyten und durch Wärmeleitung in den Elektroden übertragen und spielt eine wichtige Rolle im Abtragprozess (vgl. [11], S.2). Simulationen zeigen, dass die Wärmeentwicklung an der Elektrodengrenzschicht zu einer Temperaturerhöhung von 25 °C auf 50 °C führen kann (vgl. [11], S. 3). Der elektrolytspezifische Temperaturkoeffizient α [K⁻¹] beschreibt den annähernd linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und Leitfähigkeit, welche bei steigender Temperatur durch Abnahme der Viskosität des Elektrolyten ebenfalls ansteigt. Tabelle 5 zeigt die Temperaturkoeffizienten ausgewählter Ionen.

Ion	α [K ⁻¹]
Cl ⁻	0,0194
K ⁺	0,0187
Na ⁺	0,0208
NO ₃ ⁻	0,0183
OH ⁻	0,0199

Tabelle 5: Temperaturkoeffizienten verschiedener Ionen (vgl. [29], S.58)

3.7.5 Zu- und Abfuhr des Elektrolyten

Neben den elektrochemischen Eigenschaften, spielt auch die Zu- und Abfuhr des Elektrolyten eine wesentliche Rolle. Sie ermöglicht die Versorgung des Arbeitsspalt mit frischem Medium und dient dem Abtransport von hydratisierten Atomen/Molekülen und Hydroxiden. Der Elektrolyt kann auf unterschiedliche Weise in den und aus dem Arbeitsspalt gelangen.

3.7.5.1 Werkstück im Elektrolytbad

Dabei handelt es sich um die einfachste und kostengünstigste Methode eines elektrochemischen Versuchsaufbaus, da das Werkstück lediglich in einer Wanne gespannt und anschließend mit dem Elektrolyten bedeckt wird (siehe Abbildung 12). Der schlechte Abtransport des an der Anode oxidierten Materials auf Grund fehlender Elektrolytströmung führt zu grober Oberflächenqualität am Werkstück und zu einem unruhigen Abtragprozess.

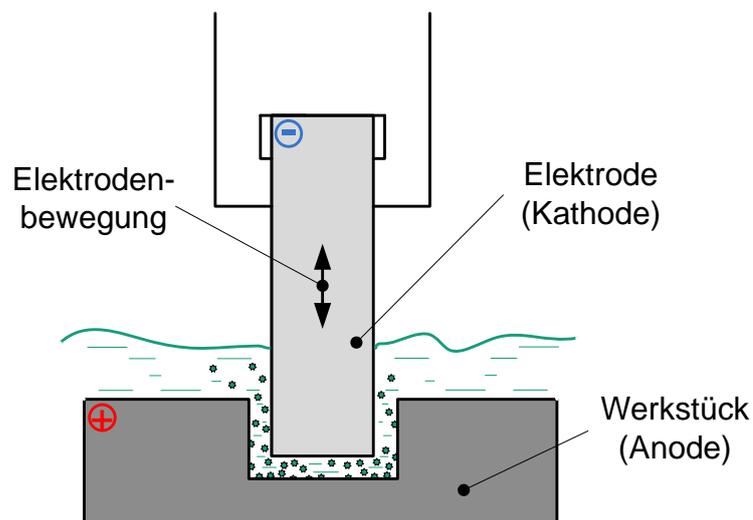


Abbildung 12: Elektrolytbad ohne Spülung

3.7.5.2 Elektrolytstrom durch die Werkzeugelektrode

Hier wird der Elektrolyt durch ein rohrförmiges Werkzeug geführt und transportiert beim Austritt über den Stirn- und Seitenspalt das gelöste Material ab (siehe Abbildung 13).

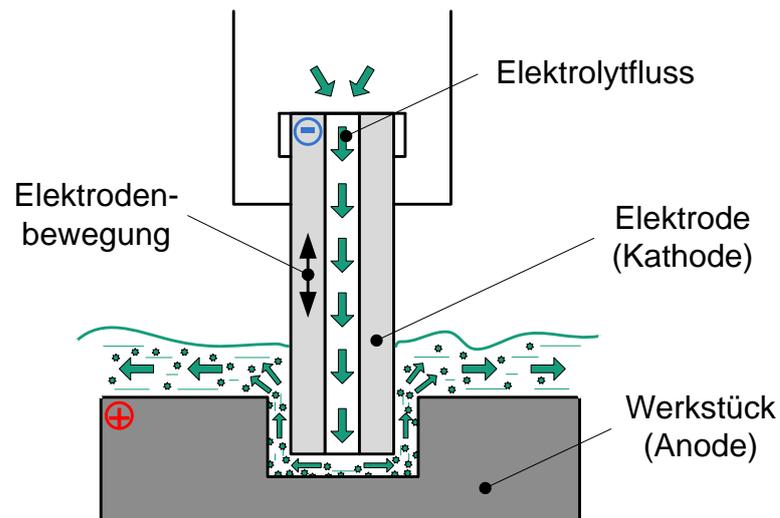


Abbildung 13: Elektrolytstrom mit Zufuhr über die Elektrode

Diese Art der Spülung ist deutlich aufwendiger, denn sie bedarf einerseits einer Rohrelektrode, eines adaptierten Werkzeughalters und zumindest einer Elektrolyt-Pumpe (siehe [9], S. 144). Ein solches Spülsystem kann einerseits als Kreislaufsystem konzipiert sein, bei dem der Elektrolyt aufbereitet oder unaufbereitet zirkuliert wird, oder andererseits als Einwegsystem, bei dem der einmal durch die Elektrode gepumpte Elektrolyt anschließend entsorgt wird. Informationen zur Nachbehandlung und Aufbereitung von verunreinigten Elektrolytlösungen sind in der VDI 3401 / Blatt 3 ausführlich beschrieben.

3.7.5.3 Elektrolytstrom von außen

Da die Spülung durch die Elektrode nicht immer möglich ist, z.B. bei sehr kleinen Durchmessern oder aus Kostengründen, kann der Elektrolyt auch von außen zugeführt werden. Nachteilig ist hierbei, dass eine Flussrichtung vorhanden ist und damit ungleichmäßige Strömungsverhältnisse im Spalt entstehen (siehe Abbildung 14).

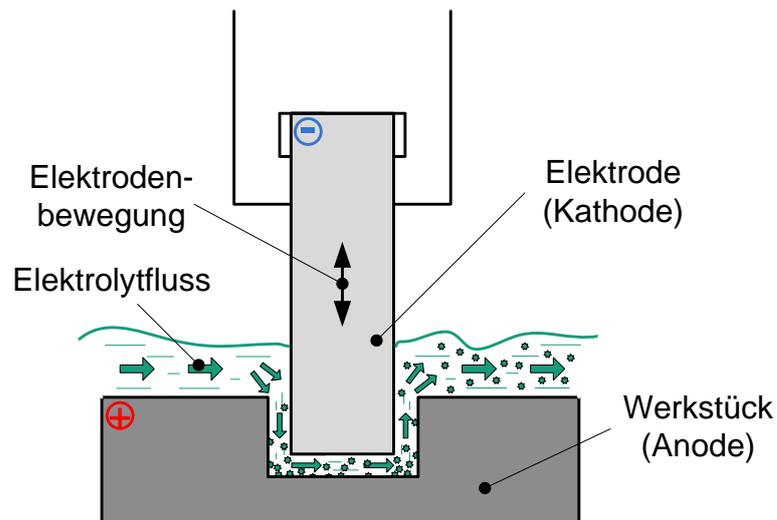


Abbildung 14: Elektrolytstrom mit seitlicher Zuführung

Das zugeführte Elektrolytvolumen kann dabei mittels Volumenstromregelung eingestellt werden.

3.7.6 Wiederaufbereitung der Elektrolyte

Wird eine kontinuierliche Bearbeitung mit gleichbleibender Qualität angestrebt, liegt es nahe, den Arbeitsspalt zu spülen, um die Abtragprodukte abzuführen. Dadurch steigen der Elektrolytverbrauch und damit die Beschaffungs- und Entsorgungskosten. Daher wird vor allem bei größeren Anlagen mit hohem Elektrolytdurchsatz ein Wiederaufbereitungskreislauf integriert, welcher beispielhaft in Abbildung 15 dargestellt ist. Da bei der Bearbeitung in Abhängigkeit der Elektroden- / Elektrolytkombination ökologisch und gesundheitlich problematische Stoffe entstehen können, ist die Wiederaufbereitung mit großem Aufwand verbunden. In einem ersten Schritt muss der Dünnschlamm z.B. per Zentrifuge vom flüssigen Elektrolyten getrennt werden. Bei dessen chemischer Nachbehandlung fallen die festen Bestandteile aus und können abgeschieden werden. Der flüssige Elektrolyt muss anschließend wieder auf die notwendige Prozesstemperatur gebracht und chemisch angereichert bzw. verdünnt werden. Dies geschieht in einem Aufbereitungstank von welchem aus der Elektrolyt nach der Aufbereitung wieder dem Bearbeitungsbecken zugeführt wird.

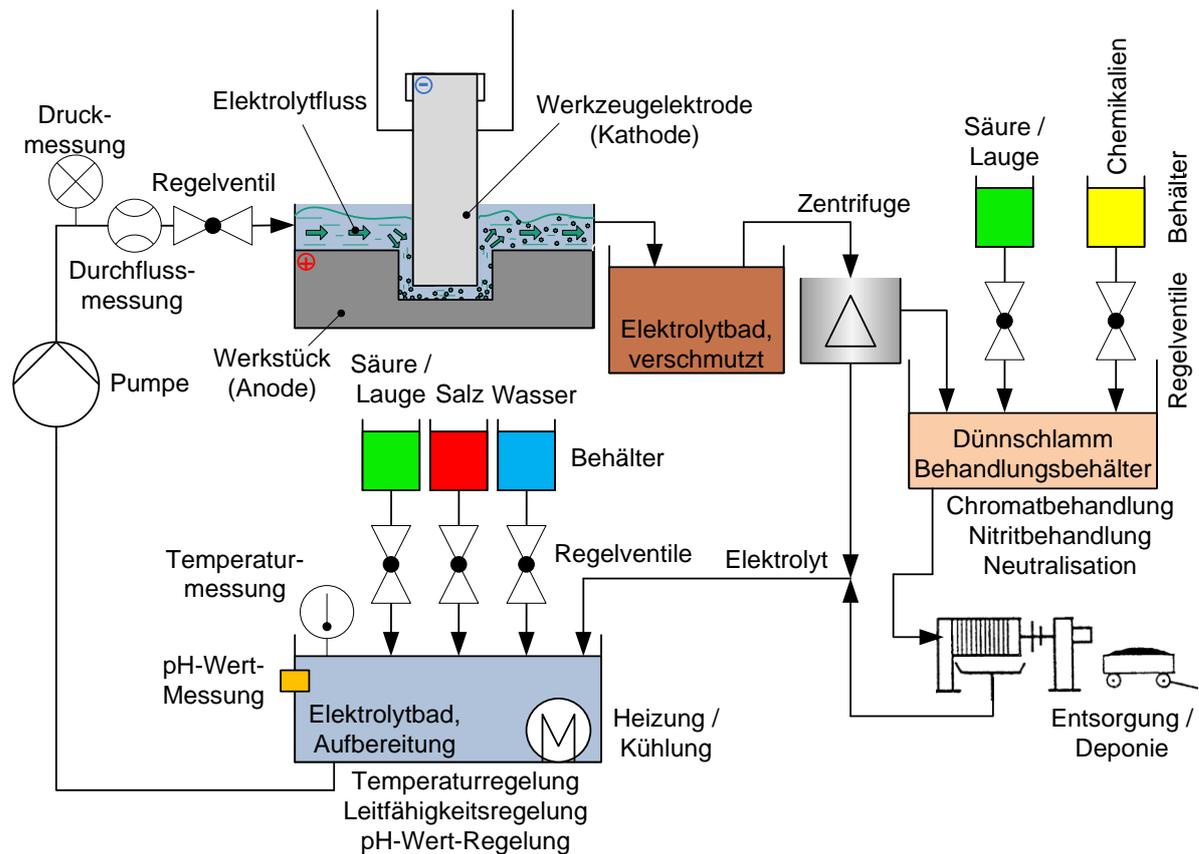


Abbildung 15: Elektrolytkreislauf mit Abscheidung und Aufbereitung

3.7.7 Sicherheitsaspekte im Umgang mit Elektrolyten

Von den meisten als Elektrolyten eingesetzten Chemikalien gehen Gefahren für Mensch und Umwelt aus. Daher ist es notwendig in Abhängigkeit der verwendeten chemischen Lösungen entsprechende Vorsichtsmaßnahmen zu treffen. Dies betrifft vor allem die angemessene und gewissenhafte Wahl persönlicher Schutzausrüstung aber auch die Wahl geeigneter, resistenter Kontaktmaterialien (Behälter, Reagenzien, Pipetten, etc.). Tabelle 6 enthält häufig zur elektrochemischen Bearbeitung von Wolfram und Stählen eingesetzte Chemikalien und die innerhalb der EU vorgeschriebenen Gefahrstoffkennzeichnungen. Die Bedeutung der R- und S-Sätze sind Anhang III (Seite 145) zu entnehmen.

Stoffbezeichnung	Formel	Gefahrensymbol	R(isk)- und S(afety)-Sätze
Natriumnitrat	NaNO ₃	O, Xn	R: 8-22 S: 22-41
Natriumhydroxid (Natronlauge)	NaOH	C	R: 35 S: (1/2)-26-37/39-45
Schwefelsäure	H ₂ SO ₄	C	R: 35 S: (1/2)-26-30-45
Chlorwasserstoff (Salzsäure)	HCl	T, C	R: 23-35 S: (1/2)-9-26-36/37/39-45
Fluorwasserstoff (Flusssäure)	HF	T+, C	R: 26/27/28-35 S: (1/2)-7/9-26-36/37-45
Chrom(VI)-Oxid	CrO ₃	O, T+, N	R: 45-46-9-24/25-26-35-42/43-48/23-62-50/53 S: 53-45-60-61

Tabelle 6: Häufig für die elektrochemische Bearbeitung eingesetzte Chemikalien, deren Gefahrensymbole sowie R- und S-Sätze

Bei der elektrochemischen Bearbeitung von korrosionsbeständigen und anderen hochlegierten Stählen mit hohem Chromanteil kann mehrwertiges Chrom gebildet werden. Insbesondere das sechswertige Chrom(VI) stellt eine sehr große Gesundheitsgefahr für den Menschen dar. Es wird durch folgende Anodenreaktion gebildet (vgl. [31], S. 224):



Da Chrom(VI)-Verbindungen eine sehr hohe Wasserlöslichkeit aufweisen, sind sie nach Entstehung beim ECM-Prozess im wässrigen Elektrolyten gelöst. Da sich Grenzwerte für das Arbeiten mit Gefahrenstoffen auf die Konzentration in der Luft am Arbeitsplatz beziehen (sog. MAK-Werte), können sie nicht direkt übernommen werden. Vor allem auch deshalb, weil eine inhalative Aufnahme des Arbeitsmediums nicht wahrscheinlich ist. „Auf Grund des sehr hohen gesundheitlichen Gefährdungspotentials von Chromverbindungen sind Schutzmaßnahmen zu treffen, die einen direkten Körperkontakt (z.B. Schutzhandschuhe) mit den Chromverbindungen verhindern. Ebenfalls ist eine Verschleppung zu vermeiden“ (vgl. [31], S. 225f.). Insbesondere das Zerstäuben von Elektrolytresten durch Drucklufttrocknung muss unter Absaugung geschehen.

Zusätzlich können bei Verwendung eines Natriumnitrat-Elektrolyten toxische Nitrite durch folgende Kathodenreaktion entstehen:



Bei Stickstoffdioxid (NO₂) handelt es sich um ein toxisches, stechend chlorähnlich riechendes Gas, das bei geringen Konzentrationen kaum wahrgenommen wird. Einatmen führt zu Kopfschmerzen, Schwindel und bei höheren Konzentrationen zu

Atemnot und zur Bildung von Lungenödemen. Daher muss geeigneter Atemschutz verwendet oder eine Absaugung der entstehenden Gase sichergestellt werden.

Einige zur Bearbeitung von Stählen verwendete Elektrolytlösungen bestehen aus gesundheitsgefährdenden und konzentrierten Säuren. Für deren Manipulation, wie sie z.B. bei der Herstellung von Lösungen notwendig ist, müssen eine Reihe von Sicherheitsvorkehrungen beachtet werden. Dazu zählen neben der Verwendung geeigneter persönlicher Schutzausrüstung wie Handschuhe, Schutzbrille, festes Schuhwerk und Labormantel auch spezielle chemikalienspezifische Maßnahmen. Z.B. erfordert der Umgang mit konzentrierter Salzsäure ($\text{HCl} > 20\%$), Flusssäure oder Schwefelsäure ($\text{H}_2\text{SO}_4 > 20\%$) einen Arbeitsplatz mit Absaugung und Spritzschutzwand. Auch die Lagerung der erzeugten schwächeren Lösungen sowie der bereits eingesetzten verunreinigten Elektrolyte muss der Brandschutzverordnung entsprechen. Dazu dienen besondere feuerfeste Chemikalienschränke mit interner Abluft-Absaugung. Zusätzlich müssen bei Arbeiten mit Säuren, Laugen oder Hydroxiden stets Spüllösungen zur Dekontamination von Augen und Haut greifbar sein. Bei Verätzungen muss stets rasch gehandelt werden, jede Sekunde zählt. Grundsätzlich ist Wasser auf Grund seiner verdünnenden Wirkung und besten Verfügbarkeit eine gute Wahl. Vor allem aber bei Verätzungen der Augen kann die Spülung mit normalem Wasser, welches gegenüber dem intraokularen Milieu hypoton ist, die schädigende Wirkung der Säure oder Lauge auf Grund des osmotischen Druckes noch verstärken. Daher wird in einem solchen Fall die Verwendung von tränenisotonischen oder hypertonischen Lösungen wie z.B. 1%-ige Kochsalzlösung empfohlen. Die Verwendung einer hypertonischen Lösung führt zu einer Mobilisierung der Ionen und dadurch zu einem Ionen- und Wasserfluss aus dem geschädigten Gewebe heraus und verhindert dadurch eine tiefere Schädigung (vgl. [32], S. 3).

Die Gefahr bei Verätzung durch Flusssäure (HF) besteht neben der oberflächlichen Gewebeschädigung durch Wasserstoffionen (H^+), durch das Eindringen von Fluorionen (F^-) und der damit verbundenen Zerstörung tieferer Gewebeschichten. „Durch die Bindung an Magnesium- und Calciumionen im Körper und durch die Hemmung lebenswichtiger Enzyme kann es zu akut bedrohlichen Stoffwechselstörungen der Leber- und Nierenfunktion kommen (= Resorptive Giftwirkung)“ (vgl. [33], S. 1). Durch Spülung der Wunde mit Wasser kann nur eine oberflächliche Verdünnung erreicht werden. Um nach einer Spülung mit Wasser die Fluorionen zu binden, wird empfohlen die betroffene Stelle mit Calciumgluconat zu behandeln. Es kann in Form eines Gels aufgetragen oder als lokale Injektion eingebracht werden. Neben Calciumgluconat ist auch eine Spüllösung unter dem Namen Hexafluorine erhältlich. Damit werden die H^+ - und F^- -Ionen gebunden und inaktiviert (vgl. [34]).

3.8 Wirtschaftliche Aspekte der elektrochemischen Bearbeitung

Die technologiespezifischen Merkmale des μ PECM-Verfahrens resultieren in einem wirtschaftlichen Mehrwert für die Industrie, wobei das Hauptanwendungsgebiet die Bearbeitung von schwer mit herkömmlichen Verfahren zu bearbeitenden, elektrisch leitenden Materialien wie Superlegierungen, Titanlegierungen, Werkzeugstahl, usw. ist. Diese Materialien spielen eine immer wichtigere Rolle in Bereichen wie Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie, Rüstungsindustrie und im Formenbau. Steigende Anforderungen an die Fertigung komplexer Formen wie z.B. elliptische Bohrungen, besonders kleine und/oder tiefe Bohrungen, flache Eintrittswinkel, feine (Oberflächen-) Strukturen, komplexe Freiformflächen usw. verlangen nach präzisen, mechanisch und thermisch neutralen Bearbeitungsverfahren wie dem ECM. Großer wirtschaftlicher Nutzen kann beispielsweise auch dann erzielt werden, wenn große Lochmuster mit kleinen, komplexen Bohrquerschnitten gefertigt werden müssen. Durch ein einmalig zu fertigendes passendes Gegenstück welches die Werkzeugelektrode bildet, können große Lochmuster in einem einzigen Arbeitsschritt gefertigt werden.

Die Anschaffungskosten einer EC-Bearbeitungsmaschine sind aktuell höher als jene herkömmlicher Bearbeitungsmaschinen, die Betriebskosten auf Grund des geringen Werkzeugverschleißes jedoch niedriger (vgl. [35]). Daher eignen sie sich besonders für die Serien- und Massenproduktion von komplexen Bauteilen/Oberflächen (vgl. [26], S. 517).

Industriebereich	Anwendungsbeispiele
Luft- und Raumfahrt	Turbinenblisks, Gasturbinenschaufeln Getriebe, Düsen, Krümmer, Diffusoren, Ventile
Automotive	Turbolader, Getriebe, Kraftstoffsysteme, Bremssysteme, Ölflusslösungen, Kolben, Wellen, Fahrzeuglogos
Biomedizin	Implantate (Hüftgelenke), Chirurgische Instrumente, Skalpelle, Sägen und Knochenbohrer, Klemmen
Energie und Offshore	Petrochemie, Öl- und Gasproduktion (Windkraftanlagen), Bohrinstallationen, Turbinenmotorkomponenten: Kraftstoffzellen, Ventile, Düsen und Pumpen
Konsumgüter	Uhren, Pillenmatrizen, Köpfe von Rasierapparaten, Sammlermünzen
Chemie	Mikroreaktoren, Mikrowärmetauscher
Marine	Kompressorschaufeln, Propeller, Impeller
Werkzeugmaschinen	Komponenten von Laserschweißmaschinen

Tabelle 7: Einsatzgebiete des ECM-Verfahrens und Anwendungsbeispiele

Anwendungsbeispiele des ECM-Verfahrens:

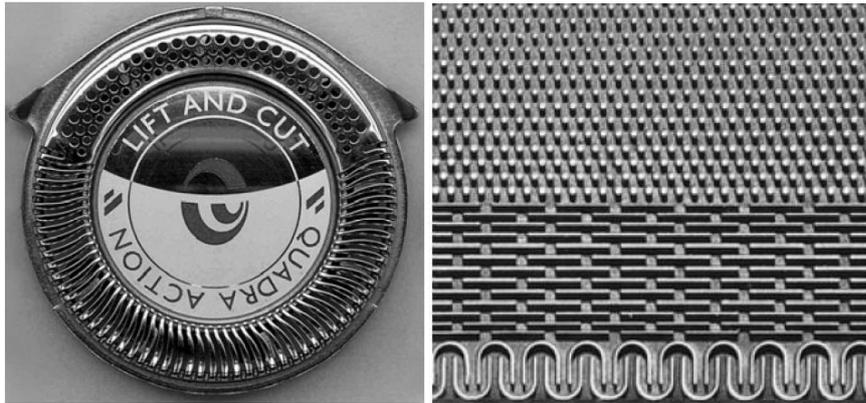


Abbildung 16: Anwendungsbeispiel 1: Kopf eines Rasierapparates (links), feine Mikrostrukturen 20 x 30 mm (rechts) (vgl. [9], S. 166)



Abbildung 17: Anwendungsbeispiel 2: Finishing eines Turbinenblisks (vgl. [36])



Abbildung 18: Anwendungsbeispiel 3: Künstliches Knie- / Hüftgelenk (vgl. [37])

4 Versuchsanlage

Bei der Versuchsanlage handelt es sich um eine μ PECM-Laboranlage des deutschen Unternehmens ECMTEC GmbH mit der Bezeichnung „Micro-Production“ aus dem Jahr 2008 (siehe Abbildung 19). Laut Herstellerangaben wurde die Maschine für eine universitäre und industrielle Forschungsumgebung entwickelt. Sie erlaubt Zugriff auf alle Betriebs- und Prozessparameter und ist modular aufgebaut. Durch eine Portalbauweise aus Granit besitzt die Anlage günstige thermische und schwingungstechnische Eigenschaften sowie laut Hersteller eine hohe Präzision. Die Spindel mit der Z-Pinole ist am oberen Portalträger positioniert. Der Kreuztisch kann durch Stellmotoren in X- und Y-Richtung verfahren werden.

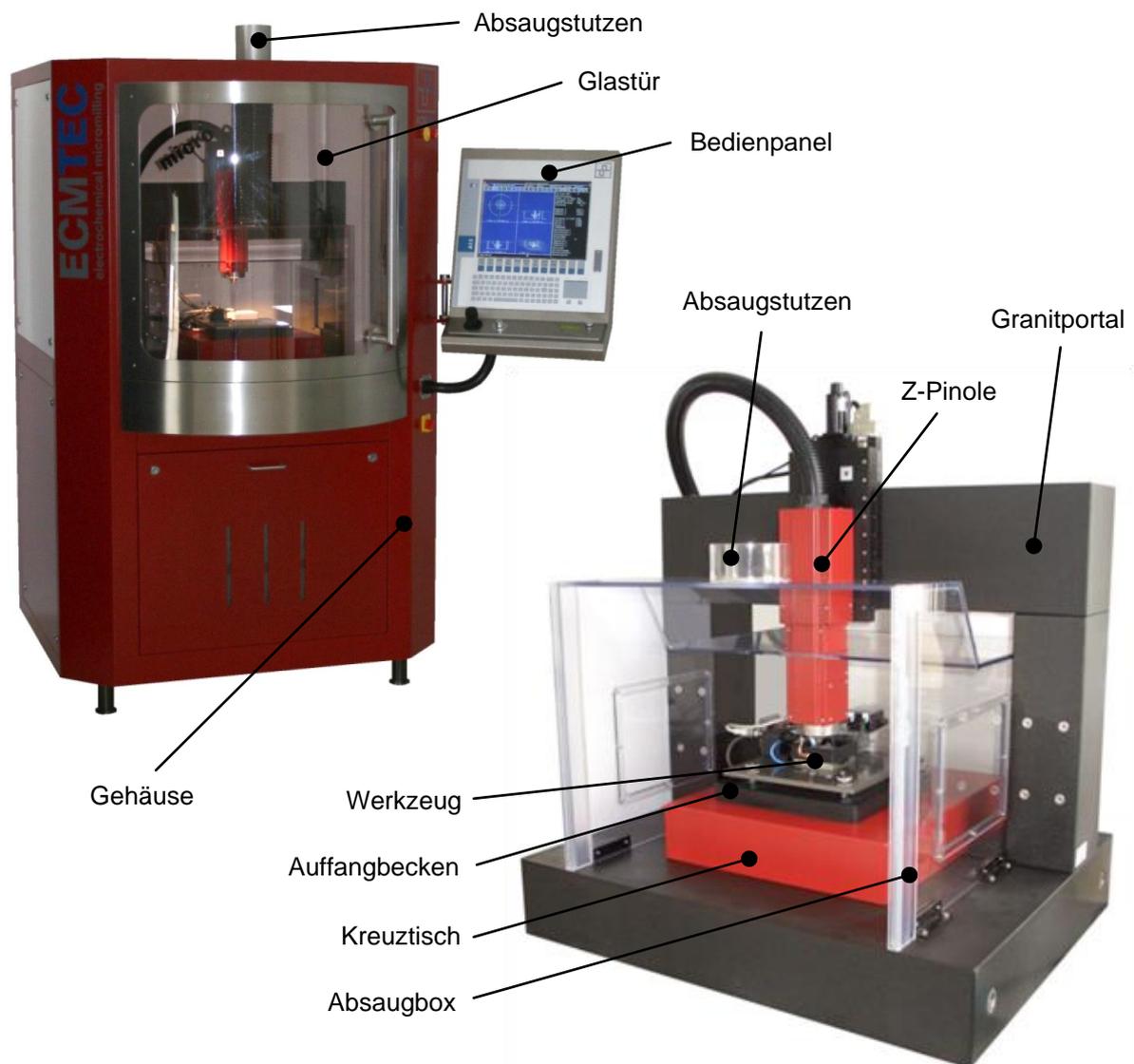


Abbildung 19: ECMTEC "Micro-Production" μ PECM-Versuchsanlage

4.1 Aufbau

Die Bearbeitungsmaschine besteht aus einem Gehäuse, welches alle elektrischen und mechanischen Komponenten beinhaltet. Ein extern montiertes, schwenkbares Bedienpanel mit Bildschirm bietet einen Überblick über alle prozessrelevanten Parameter und erlaubt eine benutzerfreundliche Programmierung. An der Oberseite des Gehäuses befindet sich ein Absaugsystem bestehend aus einem Schlauch und einem regelbaren Ventilator, über welches die während der elektrochemischen Bearbeitung entstehenden Prozessgase abtransportiert werden. Die elektrische Versorgung der Anlage erfolgt über eine 240 V Wechselstromquelle. Daneben gibt es noch eine Druckluftversorgung, über welche das pneumatische Werkzeugspannsystem gespeist wird. Eine Glastür schützt den Bediener vor Gasen und etwaigen Elektrolytspritzern und erlaubt gleichzeitig Einblick ins Innere der Maschine, den Arbeitsraum, in welchem sich der Kreuztisch und die Drehspindel befinden. Seitliche Klappen ermöglichen den Zugang zu den Steuerungselementen.

4.1.1 Hardware

Der Kreuztisch auf dem das Werkstück befestigt wird, stammt von der Firma Uhl aus Deutschland. Er besitzt eine Ablaufgenauigkeit von 1 μm bei einem maximalen Verfahrweg von 100 x 100 mm und bildet die X/Y-Arbeitsebene des Bearbeitungssystems (siehe Abbildung 20). Unter der Ablaufgenauigkeit einer Kugelschienenführung werden die in der Praxis in allen 6 Freiheitsgraden auftretenden Abweichungen der translatorischen Bewegung eines Kugelwagens zur idealen Geraden verstanden (vgl. [38], S. 11ff.).

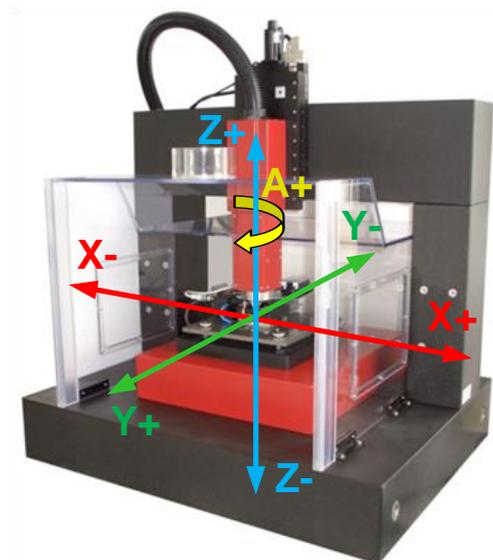


Abbildung 20: ECMTEC „Micro-Production“, Achsen und Orientierung

Das Positioniersystem des Kreuztisches ist mit dem Messsystem LIP 481 der deutschen Firma Heidenhain ausgestattet.

Es besteht aus einer Glaskeramik mit aufgebrachtem Phasengitter, einer Teilungsperiode von 4 μm und besitzt eine Genauigkeitsklasse von $\pm 1 \mu\text{m}$ (vgl. [39]). Bei der Achssteuerung handelt es sich um das Feinpositioniersystem LSTEP der Fa. Lang (DE). Der am Granitportal der Firma Meska (DE) befestigte Lineartisch mit der Bezeichnung LTZ-US01 weist eine Geradheit und Ebenheit von 1 μm auf. Am Lineartisch ist eine Spindel mit Werkzeugaufnahme angebracht (siehe Abbildung 20, A-Achse). Diese dient einerseits zur Bearbeitung, dem sog. „Tooling“, der Werkzeugelektrode bei konstanter Drehzahl, andererseits deren relativen Winkelpositionierung und ist in ganzen Gradschritten drehbar. Als Referenzmarke (= 0°-Drehposition) dient eine Kerbe in der Werkzeugaufnahme die über einen berührungslos arbeitenden Hallsensor detektiert wird. Die maximale Drehzahl beträgt ca. 1,1 U/s (= 66 U/min). Eine Elektrode mit zylindrischem Schaft wird in eine dreifach geschlitzte Spannzange mit passendem Innendurchmesser aufgenommen. Die Spannzange ist Teil der Werkzeugaufnahme welche über einen Kegel an der Spindel, der sog. Spindelwelle zentriert wird und pneumatisch schnellgespannt bzw. ausgeworfen werden kann. Das Werkstück wird über Schrauben im Spül- oder Bearbeitungsbecken befestigt. Zur Einbringung der Elektrolytlösung wurde ein Fördersystem mit drei Schlauchpumpen und Vorratsbehältern vorgesehen. Die Ansteuerung der Pumpen geschieht über die Benutzeroberfläche der integrierten Software, wobei das Fördersystem lediglich zum Befüllen des Bearbeitungsbeckens dient und nicht auf eine kontinuierliche Spülung ausgelegt ist. Daher erfolgt die Ansteuerung der Pumpen ausschließlich mit maximaler Spannung von 24 V. Mittels eines Ultraschallsensors, welcher direkt über dem Becken angebracht wird, kann der Füllstand des Bearbeitungsbeckens gemessen und geregelt werden. Der gesamte Bearbeitungsraum ist von einer Kunststoffbox mit Absaugstutzen umschlossen. Die bei der elektrochemischen Bearbeitung entstehenden Gase wie z.B. molekularer Wasserstoff und Sauerstoff werden durch die Kunststoffbox am freien Austreten gehindert und mittels eines extern angebrachten Absaugsystems abgeführt. Die wichtigsten technischen Daten der Maschine sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Technische Daten ECMTEC „Micro-Production“	
Signalperiode des Messsystems:	2 μm
Auflösung des Messsystems:	10 nm
Minimale Geschwindigkeit:	< 6 $\mu\text{m}/\text{min}$
Arbeitsweg der Achsen (X, Y, Z):	100 mm
Maximales Werkstückmaß:	98 x 98 x 15 mm ³
Genauigkeit der Führungsmechanik:	1 μm

Tabelle 8: Technische Daten ECMTEC "Micro-Production"

Das Herzstück einer μ PECM-Anlage ist der Pulsstromgenerator, welcher Impulse mit einer Amplitude von bis zu 8 Volt und einer Pulsdauer im Bereich 100 ns – 1,6 μ s erzeugen kann. Damit werden hohe Momentanleistungen bzw. Stromdichten erreicht, die einen geringen Arbeitsspalt und damit präzise Bearbeitungsergebnisse ermöglichen.

Zur Realisierung der gewünschten Prozessparameter benötigt man elektronische Regler, die Potentiostat und Galvanostat genannt werden. Der Potentiostat dient dazu die Spannung zwischen zwei Elektroden auf einen vorgegebenen Wert, unabhängig vom fließenden Strom, konstant zu halten (vgl. [40], S. 105f.). Im Gegensatz dazu wird mit Hilfe des Galvanostats der Strom unabhängig von der anliegenden Spannung auf einem vorgegebenen Wert gehalten. Im Falle der ECM-Bearbeitung benötigt man daher zusätzliche Elektroden, welche Referenz- und Gegenelektrode genannt werden (Abbildung 21).

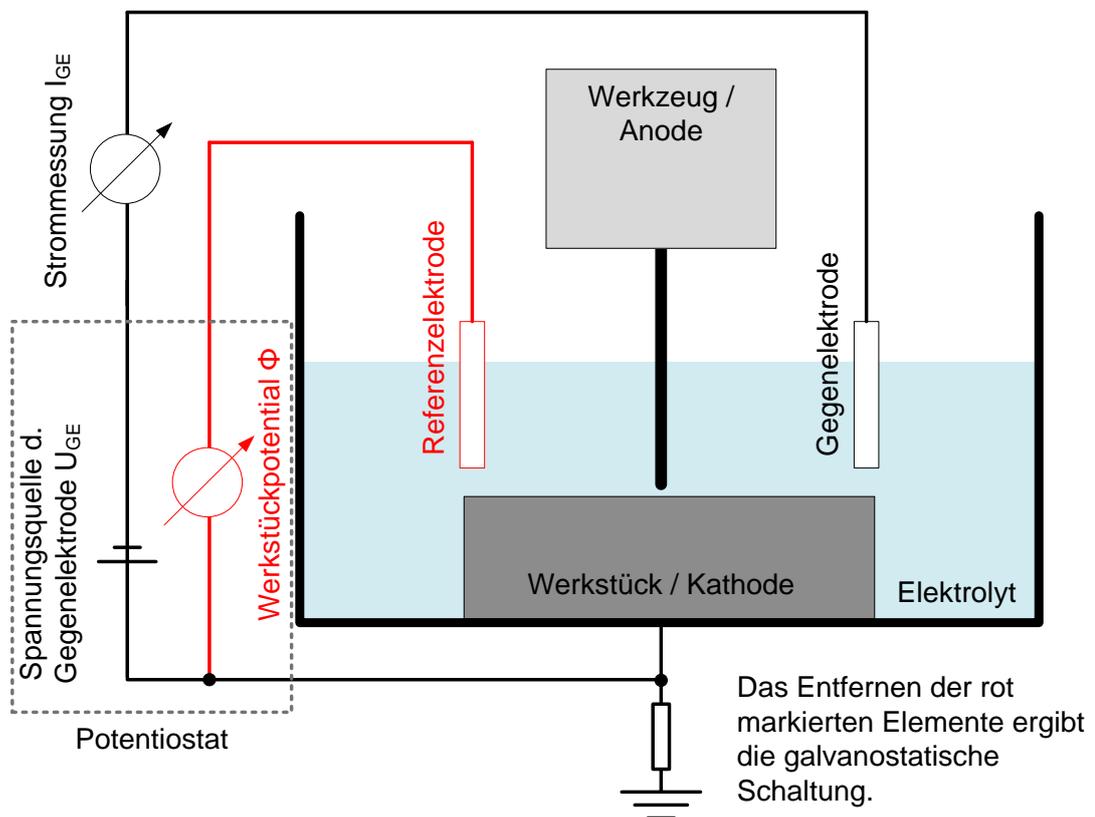


Abbildung 21: Schemadarstellung der Bearbeitungszelle mit Potentiostat und Galvanostat (vgl. [17], S. 10)

4.1.2 Software

ECMTEC nutzt eine firmeneigene Software zur Bedienung der Maschine. Über die Benutzeroberfläche können alle relevanten Parameter manuell eingestellt werden (Abbildung 22). Die Programmierung der Achssteuerung basiert auf dem G-Code (auch DIN/ISO-Programmierung genannt, vgl. [41] & [42]). Die Hauptvorteile dieser

Programmierung sind ihre weite Verbreitung und ihre einfache Lesbarkeit. Zusätzlich zu den Standardbefehlen (G- und M-Befehle) wurde eine Reihe an Sonderbefehlen (Q- und W-Befehle) für die elektrochemische Bearbeitung implementiert. Die Q-Befehle dienen dem Setzen/Überschreiben von Programmvariablen, die W-Befehle der Prozesssteuerung. Eine Zusammenfassung dieser Befehle befindet sich in Anhang V (Seite 149ff.). Die Einstellungen der wesentlichen Bearbeitungsparameter werden üblicherweise im CNC-Programm festgelegt, können aber über die Software jederzeit, auch während der Bearbeitung, manuell angepasst werden. Symbolfelder unterhalb der Menüzeile erlauben den Schnellzugriff auf die wichtigsten Befehle.

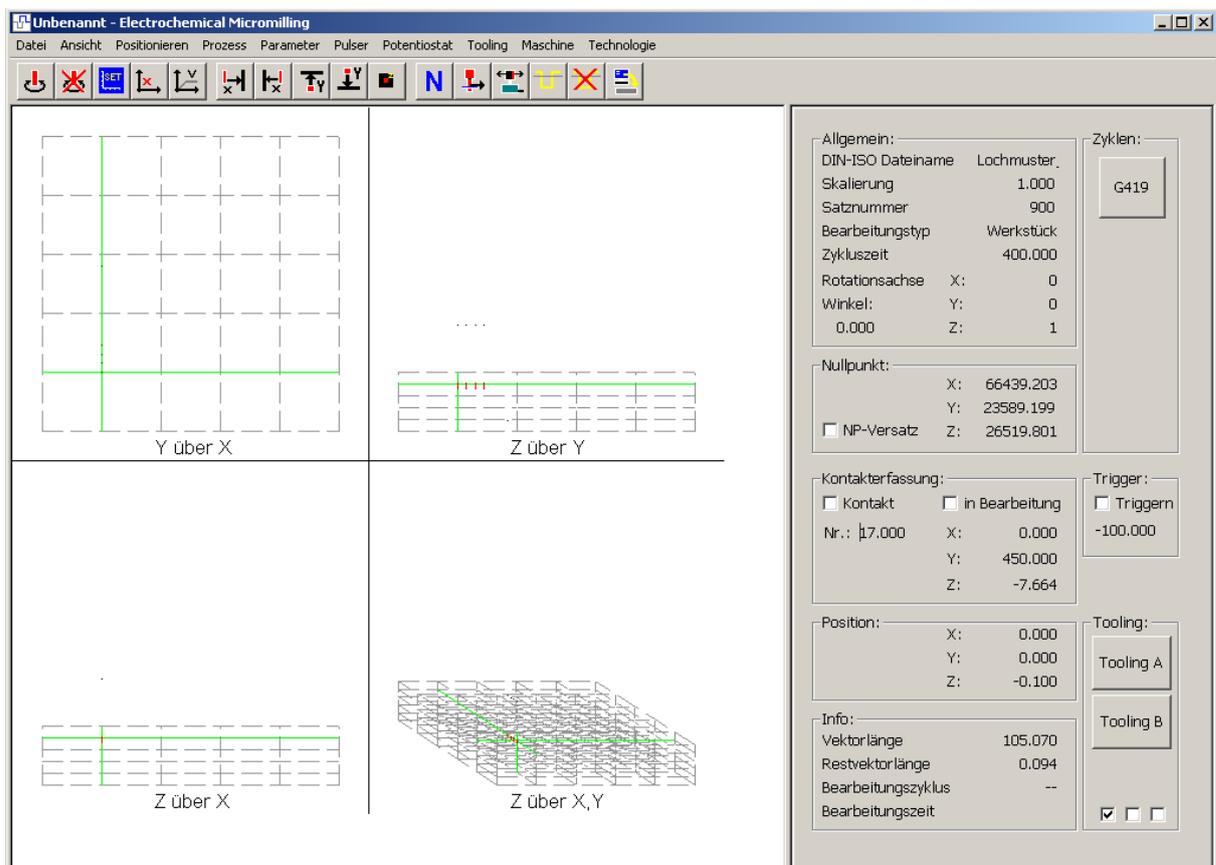


Abbildung 22: Benutzeroberfläche der ECMTEC Software, Startfenster

Im rechten Bereich der Abbildung 22, wird der Arbeitsraum in verschiedenen Projektionen und die bereits zurückgelegten Wege des aktuellen CNC-Programms (in rot) dargestellt. Der linke Bereich gibt Aufschluss über den Programmfortschritt sowie über die aktuelle Position relativ zum vorher festgelegten Nullpunkt. Im Kästchen mit dem Titel „Info“ wird der noch zurückzulegende Weg, die Restvektorlänge, des jeweiligen Arbeitsschrittes angezeigt.

4.2 Beschreibung der Prozessparameter

Die wichtigsten elektrischen Prozessparameter der Bearbeitungsmaschine ECMTEC „Micro-Production“ können im Softwarefenster „Parametrisierung“ im Reiter

„Potentiostat“ verändert werden. Abbildung 23 zeigt die darin enthaltenen Einstellmöglichkeiten zum elektrischen Puls sowie zur Regelung und Kontakterfassung.

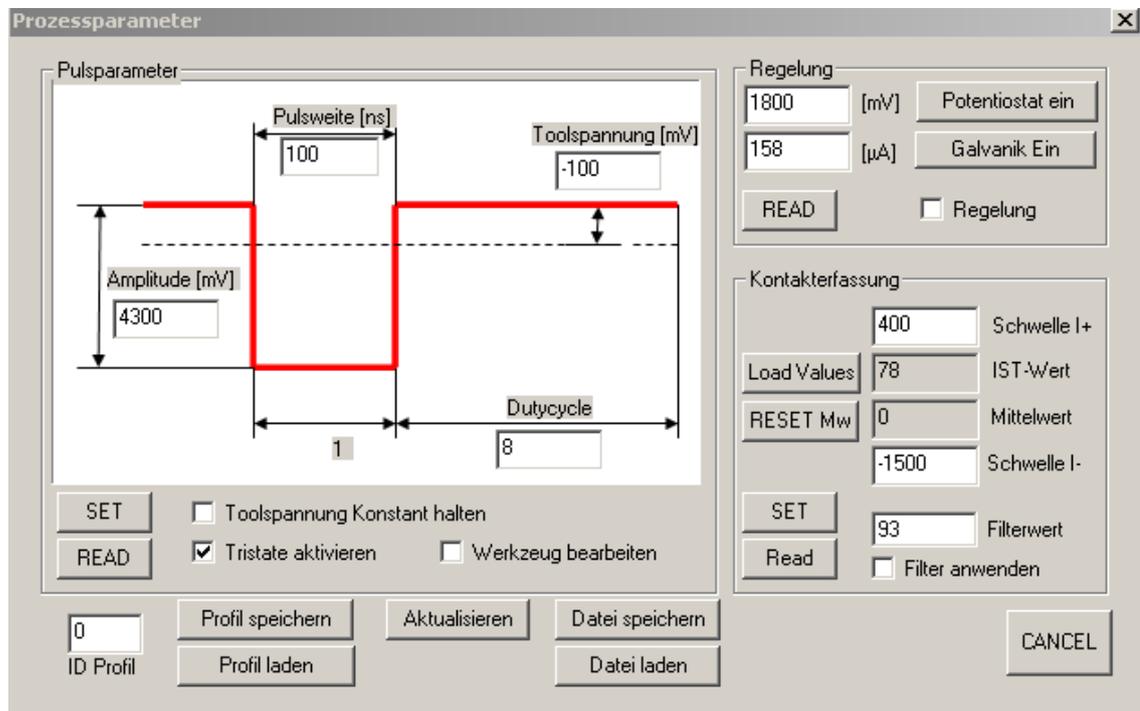


Abbildung 23: Bedienfeld der elektrischen Parameter des Pulsgenerators

Nach Änderung der Werte in der Eingabemaske werden durch Drücken des „SET“-Buttons die Daten überschrieben und erscheinen geändert im Display, welches eine Überwachung der tatsächlich anliegenden Prozessparameter erlaubt (Abbildung 24).

```

T: +429mV   P: +100ns
A: +2016mV  E: +185mV
G: +2202mV  Z: +500mV
I: +883µA   V: -1000mV
  
```

Abbildung 24: Displaydarstellung der tatsächlich und aktuell gemessenen Prozessparameter

Im Folgenden werden die wichtigsten Prozessparameter sowie deren Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis kurz beschrieben.

4.2.1 Spannung am Werkzeug

Kurzzeichen: T [mV]; G-Code: Q201 xxx*

Die Spannung am Werkzeug, welche auch als Toolspannung bezeichnet wird, ist jene Spannung, die während der Pausenzeit zwischen Anode und Kathode anliegt. Sie wird üblicherweise mit zur Pulsamplitude entgegengesetztem Vorzeichen

gewählt, da es ansonsten auch in der Pausenzeit zu einem (unerwünschten) elektrochemischen Abtrag kommen kann.

4.2.2 Pulsamplitude der Spannung

Kurzzeichen: A [mV]; G-Code: Q202 xxx*

Die Pulsamplitude ist die Summe der Beträge von anliegender Spannung während des Pulses und jener während der Pause. Durch die Höhe der Pulsamplitude kann die Abtragungsgeschwindigkeit wesentlich beeinflusst werden.

4.2.3 Pulsweite des Spannungspulses

Kurzzeichen: P [ns]; G-Code: Q203 xxx*

Die Pulsweite ist jene Zeitspanne, in welcher der Spannungspuls mit voller Amplitude A zwischen Anode und Kathode anliegen soll. Je kürzer die Pulsweite gewählt wird, umso exakter kann die Zielgeometrie abgebildet werden.

4.2.4 Puls-Pause-Verhältnis (Puls-Pause-Ratio)

Kurzzeichen: ppr []; G-Code: Q204 xxx*

Das Puls-Pause-Verhältnis ist das Verhältnis zwischen der Dauer des Spannungspulses, welche über die Pulsweite definiert wird, und der Dauer der Pausenzeit. Beispielsweise ergibt sich bei einer Pulsweite P von 100 ns und einem gewählten Puls-Pause-Verhältnis ppr von 6 („Duty-Cycle“ in der Eingabemaske) eine Pausenzeit von 600 ns. Diese Pausenzeit dient dem Abtransport von im Elektrolyten gelösten Metallionen über den Arbeitsspalt.

4.2.5 Oberer/Unterer Spannungsgrenzwert/Schwellwert

Oberer Schwellwert: Kurzzeichen: O↑ [mV]; G-Code: Q205 xxx*

Unterer Schwellwert: Kurzzeichen: U↓ [mV]; G-Code: Q206 xxx*

Oberer und unterer Schwellwert dienen der elektrischen Kontakterfassung, einerseits beim Einmessen der Werkstückoberfläche mittels Werkzeugelektrode als Taster und andererseits, um mechanischen Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück während der Bearbeitung rechtzeitig zu erkennen und damit zu verhindern.

4.2.6 Strom durch die Gegenelektrode

Kurzzeichen: I [μ A]; G-Code: -

Die Messung des Stromes durch die Gegenelektrode dient seiner Regelung mittels Galvanostat. Der Wert ist im Fenster „Prozessparameter“ unter „Regelung“ im Kästchen „Galvanik“ einzutragen und durch Klicken auf den Button „Galvanik ein“ zu aktivieren (siehe Abbildung 23).

4.2.7 Potentialdifferenz der Gegenelektrode

Kurzzeichen: G [mV]; G-Code: -

Die Messung der Potentialdifferenz der Gegenelektrode dient der Regelung der Spannung mittels Potentiostat. Der Wert ist im Fenster „Prozessparameter“ unter „Regelung“ im Kästchen „Potentiostat“ einzutragen und per Klick auf den Button „Potentiostat ein“ zu aktivieren (siehe Abbildung 23).

4.2.8 Signalspannung

Kurzzeichen: Ξ [mV]; G-Code: -

Die Signalspannung zeigt den aktuellen Ist-Wert der Kontakterfassung. Übersteigt dieser Wert die eingestellten Schwellwerte, wird eine Kontaktwarnung angezeigt (rote LED im Bedienpult) und der Zähler der Kontakterfassung um 1 erhöht.

4.2.9 Vorschubgeschwindigkeit

Kurzzeichen: F [mm/min]; G-Code: Fxx*

Neben den elektrischen Prozessparametern ist die Vorschubgeschwindigkeit eine wichtige Stellgröße der elektrochemischen Bearbeitung.

4.2.10 Überlagerte Werkzeugbewegung

Kurzzeichen: - [1/10 μ m]; G-Code: Q101 xxx*

Als überlagerte Werkzeugbewegung bezeichnet man eine zusätzliche Bewegung des Werkzeuges relativ zur gewöhnlichen linearen Vorschubbewegung. Es wird auch Schrittkrement für die überlagerte Vorwärtsfahrt genannt und ist in vier Richtungen einstellbar (VOR/RÜCK/RECHTS/LINKS). Damit lässt sich der Vorschub auch während der Bearbeitung in kleinen Schritten anpassen (siehe Abbildung 25, rote Markierung).

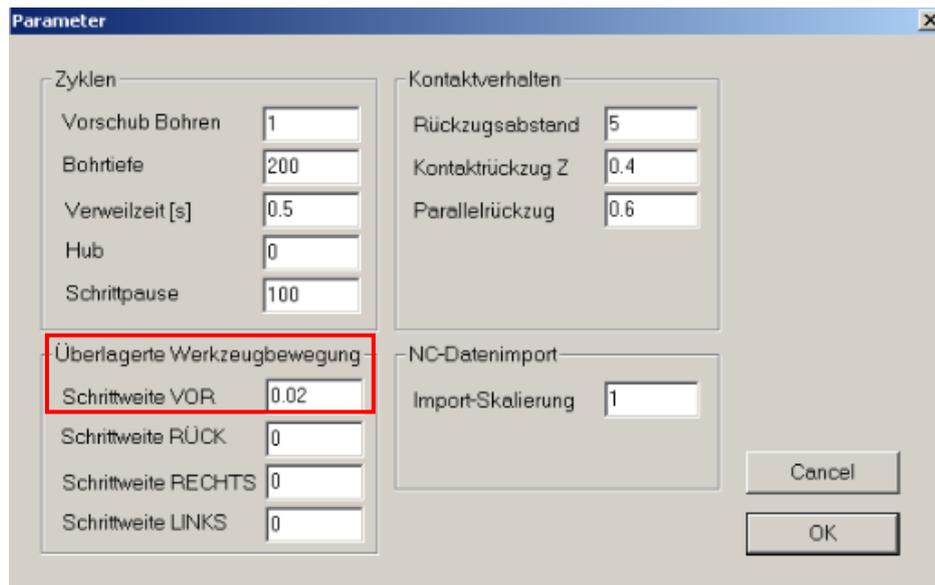


Abbildung 25: Anpassung der überlagerten Werkzeugbewegung (Vorschub während der Bearbeitung)

4.3 Versuchsaufbau

Der eigentliche Bearbeitungsprozess findet innerhalb eines separaten Kunststoffgehäuses, der sogenannten Absaugbox statt, welche sich im oberen Teil des Maschinengehäuses befindet (siehe Abbildung 26). Diese Box bildet eine abgeschlossene Einheit, um die bei der Elektrolyse entstehenden Prozessgase über den Absaugstutzen ableiten zu können. Der Kreuztisch ist auf einer Granitplatte angebracht, auf welchem wiederum eine schwarze Abtropfwanne und eine gelbe Plattform aus chemikalienresistentem Kunststoff befestigt sind. Um den elektrischen Kontakt zur Werkstückprobe herzustellen, bedarf es einer leitfähigen Grundplatte, in welche das Bearbeitungsbecken eingeschoben wird. Diese Grundplatte ist mit zwei Leitungen versehen, einer Rückleitung in schwarz und der Kurzschlussbrücke in Gelb, die während der Bearbeitung mit dem gelben Stecker am Gehäuse des Pulsgenerators verbunden werden muss. Die Kurzschlussbrücke dient der Reduktion von parasitären Kapazitäten, welche durch die hohe Pulsfrequenz und der ansonsten langen Rückleitung entstehen (siehe Abbildung 26).

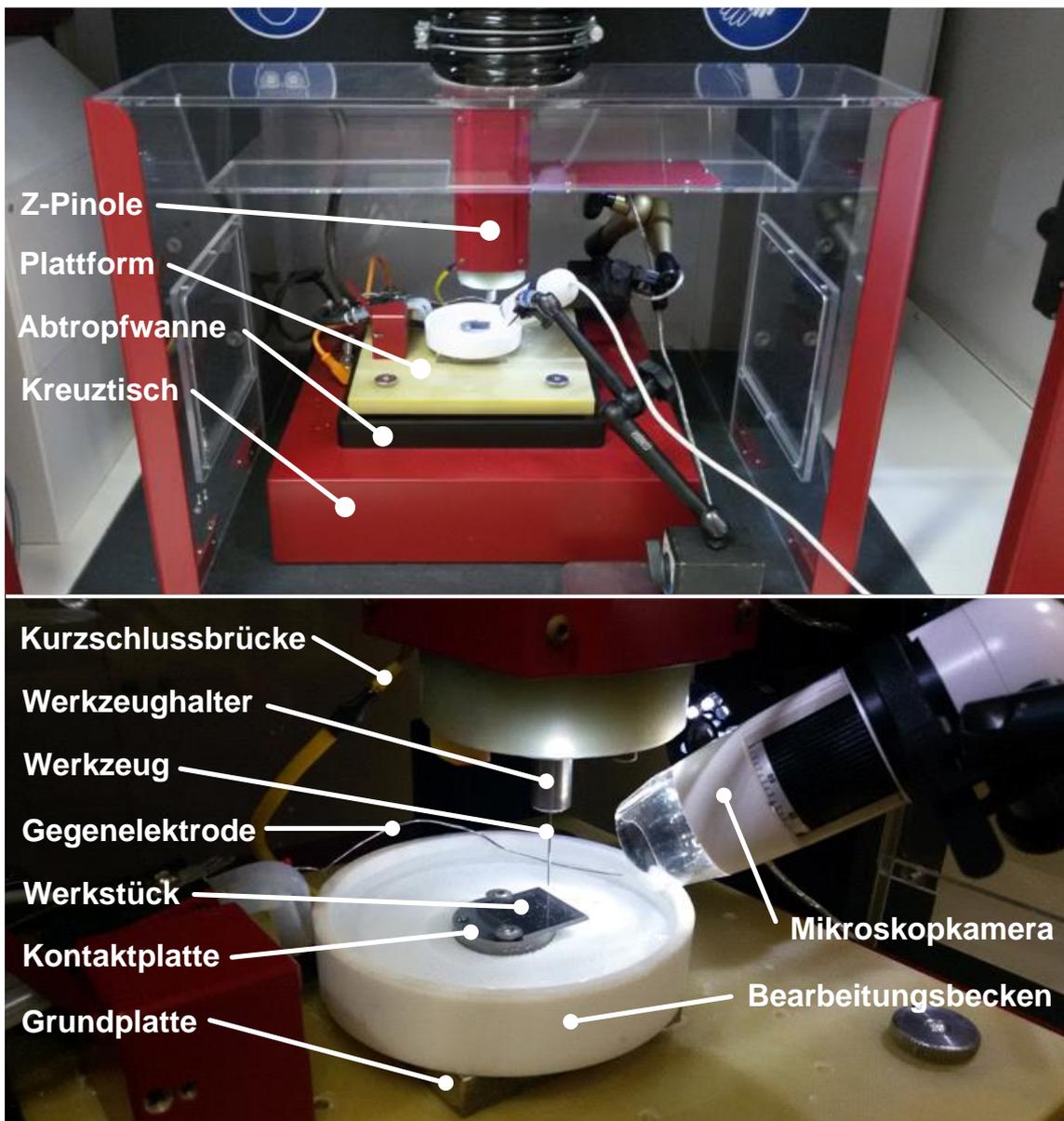


Abbildung 26: Versuchsaufbau (oben: Gesamtansicht, unten: Detailansicht)

Das Bearbeitungsbecken aus PTFE (Handelsbezeichnung „Teflon“) beinhaltet eine metallische Plattform (die sog. Kontaktplatte) mit einem Durchmesser von 25 mm auf die das zu bearbeitende Werkstück aufgespannt wird. Für die Bearbeitung wird das Becken mit dem Elektrolyten gefüllt und die Gegenelektrode aus leitfähigem und chemisch beständigem Material (wie z.B. Platin) eingetaucht. Sie dient der Messung des Stromes zwischen Anode und Gegenelektrode im Bezug zu einem Referenzpotential (potentiostatische Schaltung).

5 Messmethoden und Messmittel

Im Zuge dieser Arbeit wurden unterschiedliche Messmethoden und Messmittel zur Erhebung von Daten und Untersuchung von Prozessen eingesetzt, welche im folgenden Kapitel genauer beschrieben werden.

5.1 Maschinengenauigkeitsuntersuchung

Für die Untersuchung der Maschinengenauigkeit wurden sowohl taktile wie auch optische Längenmessgeräte in unterschiedlichen Ausführungen eingesetzt.

5.1.1 Fühlhebelmessgerät TESA Tesatast S D28

Zur Messung der Rundheitsgenauigkeit der Spindelwelle wurde das Fühlhebelmessgerät von TESA eingesetzt. Es besitzt eine analoge Messuhranzeige mit einer Auflösung von $2\ \mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 27). Am Ende des Hebeltasters mit 12,5 mm Länge befindet sich eine Kugel aus Hartmetall (HM). Die Messspanne des Systems beträgt 0,2 mm bei einer Messkraft von 0,15 N (vgl. [43]).



Abbildung 27: TESA Tesatast S D28 (vgl. [44])

5.1.2 Micro-Epsilon eddyNCDT 3100

Neben dem taktilen Fühlhebelmessgerät wurde ein kontaktloses Wirbelstrommesssystem (eng. eddy-current) zur genaueren Untersuchung der Rundheitsabweichungen der Drehspindel genutzt. Das Messprinzip dieses Systems basiert auf der Änderung der Spulenimpedanz durch Erzeugung von Wirbelströmen in einem elektrisch leitfähigen Objekt (vgl. [45], S. 583). Die Änderung der Impedanz liefert ein elektrisches Signal, welches proportional zum Abstand zwischen Sensor und Messobjekt ist. Nicht magnetische Messobjekte wirken dabei wie ein Verbraucher, dessen Verbrauchsleistung bei geringerem Abstand steigt. Bei magnetischen Messobjekten tritt bei Annäherung zusätzlich der magnetostatische

Effekt auf, der eine Zunahme der Induktivität bewirkt. Die Arbeitsfrequenz des ausgewählten Wirbelstromsensors Micro Epsilon eddyNCDT 3100 liegt bei 25 kHz, die auswertbare Nutzfrequenz bei bis zu 14,4 kHz (vgl. [46], S. 14). Die Auflösung des temperaturkompensierten Systems beträgt maximal 0,025 μm (= 25 nm). Es kamen zwei unterschiedliche Wegsensoren zum Einsatz wobei die Messspannen dieser Sensoren 0,5 mm und 1 mm betragen (vgl. [47]).



Abbildung 28: Micro-Epsilon eddyNCDT 3100 (vgl. [48])

5.1.3 Renishaw Lasermesssystem XL 80 & XC 80

Zur Untersuchung der Genauigkeit der drei Führungsachsen wurde das Laserinterferometer XL 80 der Fa. Renishaw eingesetzt (siehe Abbildung 29). In Kombination mit der Umwelteinheit XC 80, welche für die Kompensation des Temperatur-, Luftdruck- und Luftfeuchteinflusses sorgt, gehört es zu den genauesten Längenmesssystemen am Markt.



Abbildung 29: Renishaw XL-80 Laserquelle

Ein Laserinterferometer basiert auf dem Prinzip der physikalischen Überlagerung von monochromatischen, elektromagnetischen Wellen durch Reflektion an einem Spiegel und der damit verbundenen Auslöschung der Amplitude bei bestimmter Phasenlage.

Als Lichtquelle wird dazu ein Laser mit besonders geringer spektraler Bandbreite, großer Kohärenzlänge und großer Frequenzstabilität verwendet. Zur Messung von Längenänderungen wird der Laserstrahl durch einen halbdurchlässigen Spiegel (Strahlteiler) geführt und in einen Referenzstrahl sowie einen Messstrahl aufgeteilt (siehe Abbildung 30). Der Referenzstrahl wird über einen am Strahlteiler befestigten Reflektor (kombiniertes Element = Interferometer) geleitet, während der Messstrahl durch den Strahlteiler hindurch zu einem zweiten Reflektor läuft. Nach Reflektion treffen beide Strahlen im Strahlteiler wieder aufeinander, werden überlagert und gelangen anschließend zu einem Detektor im Laserkopf, der Phasenlage bzw. Interferenz der beiden Strahlen zueinander auswertet. Dies geschieht durch Zählung der bei der Bewegung des Retroreflektors entstehenden Auslöschungen des am Detektor ankommenden Signals. Über die Wellenlänge des Lasers kann so auf eine Längenänderung rückgerechnet werden.



Abbildung 30: Funktionsprinzip Laserinterferometer (vgl. [49], S. 6)

Die Spezifikationen des Lasermesssystems sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Spezifikation	Bereich
Messbereich	0 – 80 m
Genauigkeit der Positionsmessung	$\pm 0,5 \mu\text{m/m}$
Frequenzstabilität	$\pm 0,05 \mu\text{m/m}$
Auflösung	1 nm
Maximale Geschwindigkeit	4 m/s
Datenaufnahmerate	10 Hz – 50 kHz
Arbeitsbereich mit spezifischer Genauigkeit	0 °C – 40 °C

Tabelle 9: Systemspezifikationen Renishaw XL-80

5.2 Prozessüberwachung

Die Echtzeitüberwachung des Bearbeitungsprozesses ist auf Grund der empirischen Herangehensweise bei der Versuchsdurchführung von großer Bedeutung. Durch die geringen Werkzeugdurchmesser bei der Mikrobearbeitung ist die visuelle Wahrnehmung prozessrelevanter Details mit freiem Auge meist nicht mehr möglich. Zu diesen Details zählen beispielsweise das manuelle Antasten des Werkzeuges am Werkstück, die Beurteilung des Einflusses der Parameter auf die Abtragraten sowie die visuelle Beurteilung der erzeugten Werkzeugform.

5.2.1 Mikroskopkamera - Dino-Lite AM2111 Basic

Mit diesem Gerät lassen sich in Abhängigkeit des Objektabstandes Vergrößerungen bis zu 200-fach realisieren. Über eine USB-Verbindung mit einem PC wird ein Echtzeitvideo übertragen. Die Software erlaubt die Aufzeichnung von Fotos und Videos bei einer Auflösung von 640 x 480 Bildpunkten (VGA).



Abbildung 31: Dino-Lite AM2111 Basic, USB-Mikroskop

Eingesetzt wurde es zur Beobachtung des Prozessgeschehens im Bearbeitungsraum der μ PECM Anlage.

5.2.2 Mikroskopkamera - Reflecta DigiMicroscope USB

Die USB Mikroskopkamera der Firma Reflecta wurde zur optischen Kontrolle der erzeugten Werkzeuggeometrie und zur Verschleißüberwachung im Bearbeitungsraum installiert. Sie wird über USB-Verbindung mit einem PC verbunden und liefert Live-Aufnahmen. Im direkten Vergleich zur Mikroskopkamera der Firma Dino-Lite besitzt sie eine höhere Auflösung von 2 Megapixel sowie eine höhere maximale Vergrößerung von 230-fach. Die 8 LED-Leuchten sind über einen Drehregler dimmbar.



Abbildung 32: Reflecta DigiMicroscope USB

Die im Lieferumfang enthaltene Software erlaubt eine grobe Vermessung der mit der Kamera erzeugten Bilder nach Abgleich der Pixelseitenlänge mit einer Referenzlänge.

5.3 Struktur- und Geometrieuntersuchung

Zur Analyse der Geometrie der elektrochemisch hergestellten Werkzeuge und der damit erzeugten Oberflächenstrukturen wurden optische und mikroskopische Messgeräte eingesetzt.

5.3.1 Stereomikroskop - Krüss

Für eine rasche Erstbegutachtung der Werkzeuge und Bearbeitungsergebnisse kam das Stereomikroskop der Firma Krüss zum Einsatz (Abbildung 33). Es verfügt über einen Vergrößerungsbereich von 7-facher bis 45-facher Vergrößerung bei Verwendung eines 10-fach-Okulars.



Abbildung 33: Stereomikroskop Krüss

5.3.2 3D-Oberflächenmesssystem - Alicona Infinite Focus G5

Zur Dokumentation und Analyse der Ergebnisse wurde das optische 3D-Oberflächenmesssystem Infinite Focus G5 der Firma Alicona eingesetzt (Abbildung 34). Dieses auf dem Messprinzip der Fokusvariation basierende System nutzt die geringe Tiefenschärfe der Optik, um die Tiefeninformation einer Oberfläche zu extrahieren. Hierbei wird, unter fortlaufender Variation des Abstandes zwischen Optik und Messobjekt, die Änderung der Schärfe abhängig von der Topographie der Oberfläche relativ zum Abstand der Optik gemessen. Daraus wird eine dichte 3D-Repräsentation der Oberfläche erzeugt. Dieser Messdatensatz kann in weiterer Folge mittels firmeneigener Softwaremodule ausgewertet oder als Punktwolke in verschiedenen 3D-Formaten (z.B. STL) exportiert werden. Die Softwaremodule bieten die Möglichkeit zur Analyse der Oberflächenrauheit, Oberflächentexturen und geometrischer Formen, welche anhand von Schnittbildern ausgewertet werden können. Das Messsystem besitzt einen automatisierten Objektivrevolver mit sechs Objektiven von 2,5-facher bis 100-facher Vergrößerung und einem sequenziell zuschaltbaren Ringlicht.



Abbildung 34: Alicona Infinite Focus G5 (vgl. [50])

Zur vollständigen Abbildung von rotationssymmetrischen Teilen, kann das Messgerät durch eine Rotationseinheit ergänzt werden (siehe Abbildung 34, Bildmitte). Diese wird am Kreuztisch befestigt und ermöglicht vollständige 3D-Aufnahmen unter hoher horizontaler und vertikaler Auflösung. Zusätzlich zur firmeneigenen Software Alicona Measuresuite 5.1 wurde bei der Auswertung und Vermessung von geometrischen Strukturen mit dem Softwarepaket „GOM Inspect“ der Gesellschaft für Optische Messtechnik gearbeitet (vgl. [51]). Es bietet viele zusätzliche Funktionen, vor allem beim Einpassen und Auswerten von geometrischen Elementen in gemessene Punktwolken.

5.3.3 Digitalmikroskop - Keyence VW-9000

Zur raschen optischen Vermessung der erzeugten Oberflächenstrukturen und Werkzeuggeometrien kam neben dem Stereomikroskop das mobile und modulare Digitalmikroskop VW-9000 des Unternehmens Keyence Corporation zum Einsatz. Es besitzt eine hohe Tiefenschärfe und eine maximale Vergrößerung von 1.000-fach. Durch den elektrischen Vorschubantrieb der Z-Achse können 3D-Datensätze erzeugt werden (Bild-Stacking). Zusätzlich bietet die Software eine HDR-Funktion für einen höheren Dynamikbereich. Neben der Funktion als digitales Mikroskop können damit auch High-Speed-Aufnahmen mit einer maximalen Bildrate von 230.000 Hz aufgezeichnet werden.



Abbildung 35: Keyence VW-9000

5.4 Untersuchung der elektrischen Komponenten

Im Zuge eines Systemchecks und der Prozessanalyse wurde der Pulsgenerator auf seine Funktionsfähigkeit untersucht. Zur Abbildung der Pulse wurde ein digitales Oszilloskop benutzt.

5.4.1 Digitaloszilloskop - National Instruments Digitizer NI USB-5133

Das Modul NI USB-5133 ist ein Oszilloskop zur schnellen und einfachen Datenerfassung mit drei Eingängen und einer maximalen Abtastrate von 100 MHz bei einer Spannung von bis zu 40 V (siehe Abbildung 36). Zur Datenerfassung wird es über eine USB-Schnittstelle mit einem Rechner verbunden.



Abbildung 36: National Instruments Digitizer USB-5133 (vgl. [52])

5.4.2 Grafisches Programmiersystem - National Instrument LabVIEW 2010

Zur Aufzeichnung und Auswertung der vom Oszilloskop bereitgestellten Daten wurde National Instruments LabVIEW 2010 eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein umfassendes grafisches Programmiersystem für den Einsatz in der Mess- und Regelungstechnik.

6 Genauigkeitsuntersuchung der μ PECM Maschine

Das Überprüfen von Werkzeugmaschinen auf deren Genauigkeit dient der Quantifizierung, Bewertung und Beurteilung von Positionsfehlern, die während der Bearbeitung auf Grund von Ungenauigkeiten der Antriebe und Führungen auftreten. Im Zuge der Inbetriebnahme der Bearbeitungsmaschine ECMTEC Micro-Production wurden unterschiedliche Untersuchungen zur Maschinengenauigkeit durchgeführt, welche in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden.

Da die elektrischen Komponenten wesentlich zur Qualität des Bearbeitungsprozesses beitragen, wurde zusätzlich die Funktion des Pulsgenerators überprüft.

6.1 Grundlagen

Werkstückseitige Lage- und Formabweichungen entstehen durch die Summe unterschiedlicher Fehler in der Bearbeitungskette. Diese Fehler können maschinen-, werkzeug- oder prozessbedingt sein. Im Vergleich zu prozessbedingten Genauigkeitsfehlern, lassen sich Werkzeug- und Maschinenfehler sehr gut messen. Werden hohe Anforderungen an die Bearbeitungsqualität gestellt, oder sollen Ursachen für aufgetretene Abweichungen gefunden werden, muss die Genauigkeit der dazu eingesetzten Maschine untersucht werden.

Die Maschinengenauigkeit als Ganzes resultiert aus den Genauigkeiten der einzelnen Führungsachsen. Die Ist-/Soll-Positionsabweichungen der angetriebenen Achsen können entweder getrennt voneinander (z.B. X-Achse) oder auch gemeinsam (z.B. Kreisfahrt in der X/Y-Ebene) durch Einsatz unterschiedlicher Messmittel und Messstrategien erfasst werden. Die dazu verwendeten Messmittel wurden in Kapitel 5 näher beschrieben.

Bei der zu untersuchenden μ PECM-Bearbeitungsmaschine wurden einerseits die zwei horizontalen, über einen Kreuztisch angetriebenen Achsen X und Y, sowie die am Portal befestigte vertikale Z-Achse auf deren Positioniergenauigkeit hin untersucht. Zusätzlich erfolgte eine Überprüfung der Drehspindel auf deren Rundheit und Drehpositioniergenauigkeit.

6.2 Rundheitsuntersuchung der Drehspindel

Der Aufbau von Drehspindel und Werkzeugaufnahme ist in Abbildung 37 anhand eines Querschnittes durch das Gehäuse und die Spindel dargestellt. Das Werkzeug (1) wird mittels Zugspannzange (2) befestigt und zentriert. Der Werkzeughalter (3), in welchen die Zugspannzange eingezogen wird, besitzt an seinem anderen Ende einen Steilkegel. Vier pneumatisch betätigte und um jeweils 90° versetzte

Klemmhebel (4) ziehen den Werkzeughalter in das angetriebene, spindelseitige Gegenstück zum Steilkegel des Werkzeughalters, die sogenannte Spindelwelle (5), und zentrieren ihn.

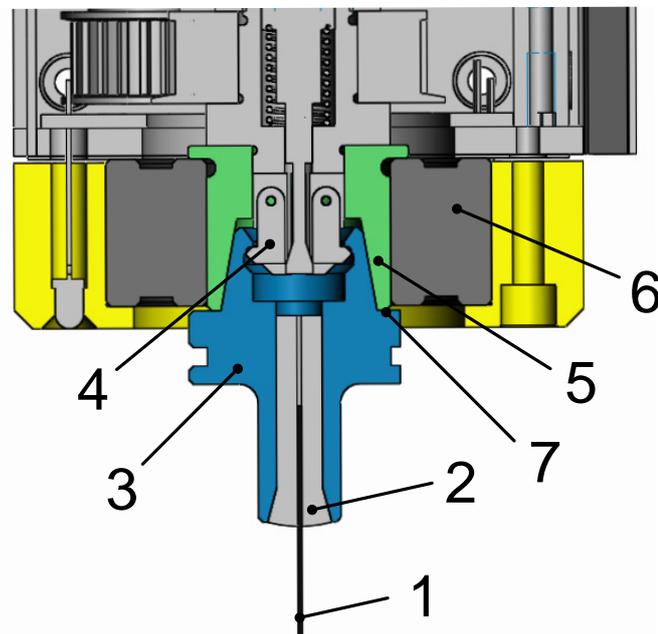


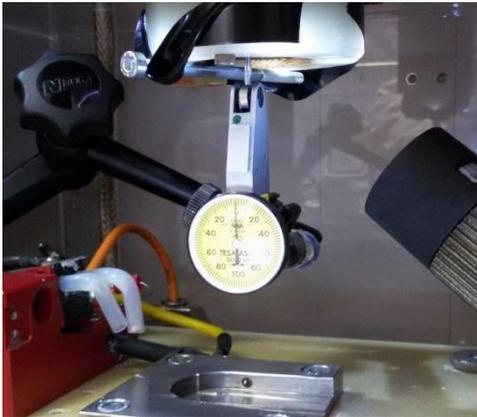
Abbildung 37: Aufbau von Drehspindel und Werkzeughalter

Wird ein Rundheitsfehler an der Werkzeugspitze festgestellt, gilt es die sich vom Lager (6) zum Werkzeug fortplanzende Fehlerkette Schritt für Schritt zu überprüfen. Dazu muss zunächst die Rundheit der Spindelwelle am Steilkegel evaluiert werden. Ein Nachteil des verbauten Systems ist das Fehlen eines festen Nullpunktes der Drehachse, d.h. es existiert kein fester Maßstab zur inkrementellen Positionsmessung. Referenziert wird mittels eines Hall-Sensors der an der Unterseite des Spindelgehäuses befestigt ist und einer am Werkzeughalter eingebrachten Flachstelle, die der Regelung als Referenzmarke dient. Bei dem verbauten Lager (6) handelt es sich um ein zweireihiges Schrägkugellager mit beidseitiger Lippendichtung und einem Druckwinkel von 25° der Fa. INA mit der Bezeichnung 3005-B-2RS-TVH.

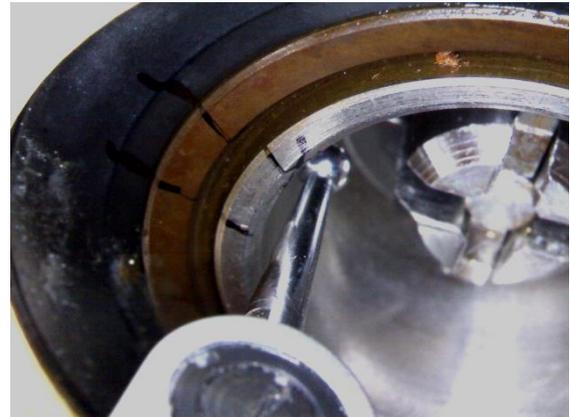
6.2.1 Versuchsaufbau der Rundheitsuntersuchung

Um die Rundheit der Spindelwelle zu messen, kam als Messmittel in einem ersten Schritt das taktile Fühlhebelmessgerät TESA Tesastast S D28 mit Kugeltaster zum Einsatz. Zur Messung der Rundheitsabweichungen orthogonal zur Drehachse wurde das Fühlhebelmessgerät an einem Messuhrhalter befestigt und geeignet positioniert (siehe Abbildung 38). Der an der Unterseite der Spindel angebrachte Hall-Sensor, welcher neben dem bereits erwähnten Referenzieren, zur Erkennung eines eingelegten Werkzeughalters dient, musste für den Zeitraum der Messungen

überbrückt werden. Durch die Überbrückung war es möglich, die Spindel auch ohne eingelegten Werkzeughalter zu drehen.



*Fühlhebelmessgerät am Messuhrhalter,
Hall-Sensor-Überbrückung*



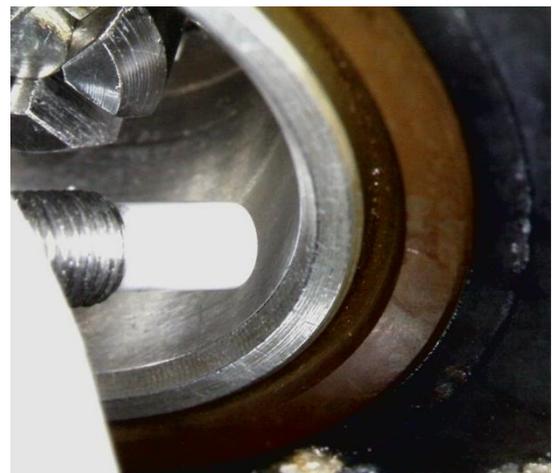
*Hartmetallkugel am Fühlhebel während
Messung an der Kegelfläche der Spindelwelle*

Abbildung 38: Versuchsaufbau der Rundheitsmessung Nr. I

Zusätzlich wurden kontaktlose Messungen mit dem Wirbelstromsensor eddyNCDT 3100 der Fa. Micro-Epsilon durchgeführt. Die Vorteile dieses Sensors im direkten Vergleich zum Fühlhebelmessgerät sind die deutlich höhere Auflösung von $0,025 \mu\text{m}$ und die Möglichkeit zeitdiskreter Messwertaufzeichnungen mit bis zu 14400 Hz . Die Klemmhebeleinheit in der Kegelmittle, verhinderte eine zur Kegeloberfläche orthogonale Anordnung des Sensors (Abbildung 39). Durch Messung des Kegelwinkels des Steilkegels der Spindelwelle und der Winkelposition des Eddy-Sensors zum Horizont, konnte auf die tatsächliche Rundheit orthogonal zur Z-Achse rückgerechnet werden (siehe Abbildung 40).



*Eddy-Sensor (Messbereich $0,5 \text{ mm}$) mit
Befestigung*



*Messposition auf Grund der geometrischen
Gegebenheiten*

Abbildung 39: Versuchsaufbau der Rundheitsmessung Nr. II

6.2.2 Versuchsablauf der Rundheitsuntersuchung

Die Drehachse kann über die Steuerungssoftware in ganzzahligen Gradschritten relativ zur letzten Winkelposition gedreht werden. Um den Zustand der Spindelwelle zu quantifizieren, wurden taktile Messungen in 5° -Schritten durchgeführt. Die Messebene befand sich 1 mm oberhalb der unteren Fasse an der Kegelinneiseite (vgl. Abbildung 38, rechts). Sechs Umdrehungen, welche 432 Messpunkten entsprechen, wurden in direkter Aufeinanderfolge aufgezeichnet, um die Ergebnisse statistisch zu validieren. Angebrachte Markierungen zwischen dem stillstehenden Außenring des Nadellagers und der drehbaren Spindelwelle dienten der Visualisierung von Winkel Fehlern des Positioniersystems. Nach den taktilen Messungen mittels Fühlhebelmessgerät kam ein kontaktloser Eddy-Sensor mit einem Messbereich von 1 mm zum Einsatz. Er wurde auf Grund der leichteren Kalibrierbarkeit in einem ersten Schritt unterhalb der Kegelaufnahme positioniert. Als Winkelindikator der durchgeführten Drehzahlmessung, diente eine am unteren Kreisring der Kegelaufnahme, dem sog. Planring (vgl. Abbildung 37, Nr. 7) angebrachte Referenzmarke, welche im zeitlichen Verlauf bei jeder vollen Umdrehung einen markanten Ausschlag der gemessenen Weg-Amplitude bewirkte. Um die Ergebnisse des per Fühlhebelmessgerät gemessenen Rundheitsfehlers zu validieren, erfolgte eine Wiederholung der Messung mittels kontaktlosen Eddy-Wegsensor, welcher an der Kegelinneiseite positioniert wurde (siehe Abbildung 40). Aus Platzgründen kam ein Sensor mit 0,5 mm Messbereich zum Einsatz.

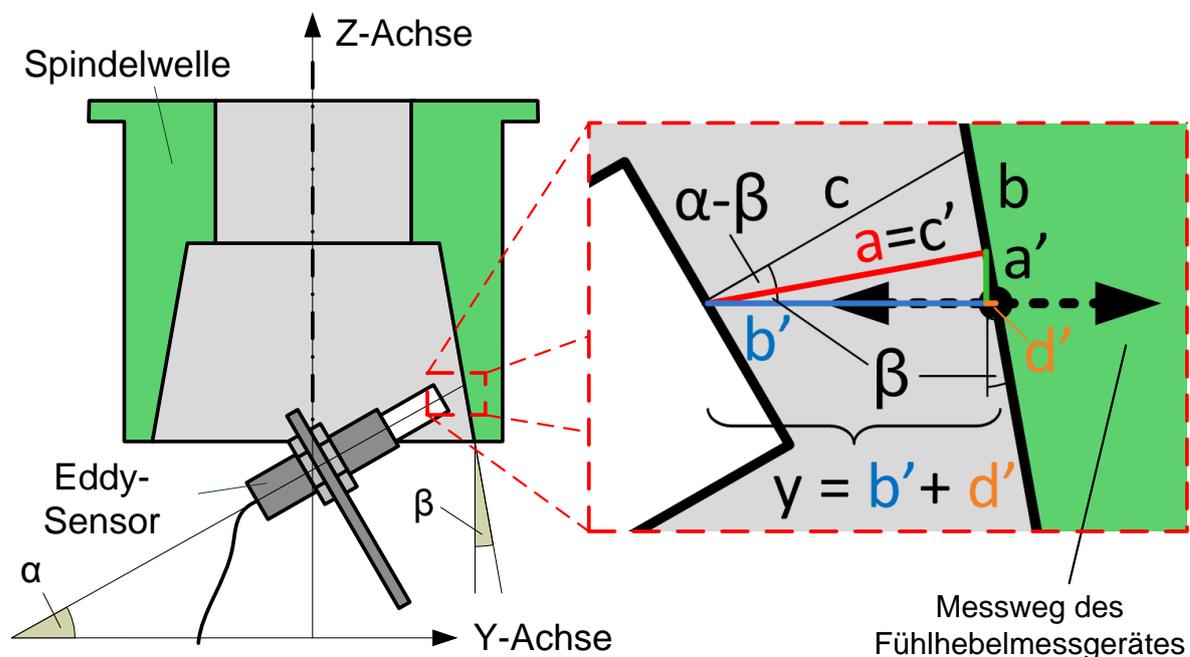


Abbildung 40: Anordnung des Eddy-Sensors zur Messung der Rundheitsabweichung in der Spindelwelle (Versuchsaufbau Nr. II)

Ein direkter Vergleich der taktil und berührungslos gewonnenen Messergebnisse war auf Grund der geometrischen Gegebenheiten nicht möglich. Zur Transformation des

durch Versuchsaufbau Nr. II vorgegebenen Koordinatensystems in das Maschinenkoordinatensystem war es notwendig, die Messwerte entsprechend der Anordnung des Eddy-Sensors zur Kegelfläche der Spindelwelle umzurechnen. Mit der kontaktlos gemessenen Länge c ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$a = c * \cos(\alpha - \beta)$$

$$b' = a * \cos(\beta) = c * \cos(\alpha - \beta) * \cos(\beta)$$

$$y = b' + d' = c * \cos(\alpha - \beta) * \cos(\beta) + c * \cos(\alpha - \beta) * \tan(\beta)$$

$$y = c * \cos(\alpha - \beta) * (\cos(\beta) + \tan(\beta)) \quad (11)$$

Die Variable y ist der Abstand zwischen Sensor und Spindelwelle umgelegt auf die Y-Achse. Der Eddy-Sensor wurde vor der Rundheitsmessung an der Z-Achse kalibriert. Auf Grund der gekrümmten Form der Kegelfläche der Spindelwelle wurden trotz voriger Kalibrierung des Sensors deutliche Abweichungen gemessen. Die Anordnung des Sensors parallel zur Y-Achse des Kreuztisches ermöglichte die Aufzeichnung einer Kalibrierkurve durch Abgleich der Positionswerte der Steuerung mit den Messwerten des Eddy-Sensors (siehe Abbildung 41). Ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,982$ deutet auf eine gute Einpassung der Regressionsgeraden hin (vgl. [53], S. 58f.).

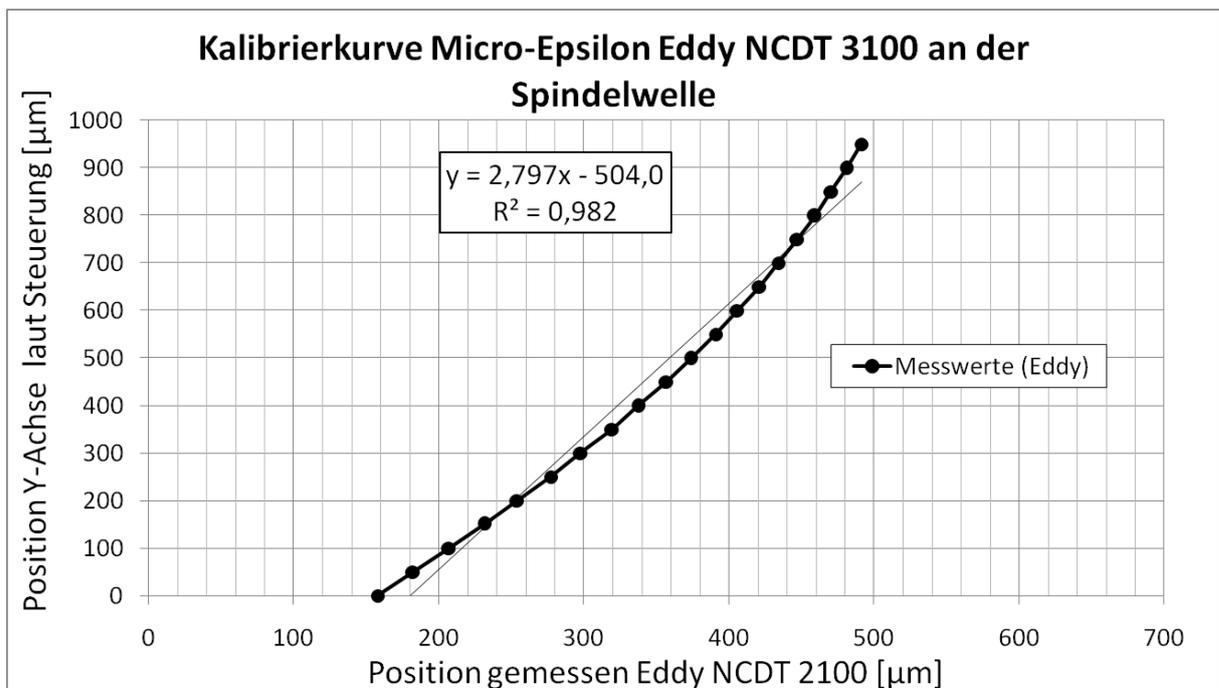


Abbildung 41: Kalibrierkurve entlang der Y-Achse, Eddy NCDT 3100

Durch Umlage der gemessenen Werte auf die Y-Achse und anschließende Umrechnung über die Regressionsgerade konnten Vergleichswerte zur taktilen Messung erzeugt werden.

Um die dynamischen Einflüsse des Systems besser messen und untersuchen zu können, wurde die Drehzahl mit 1 s^{-1} nahe an der maximalen Drehzahl gewählt. Nach den Messungen an der Innenseite der Spindelwelle kam ein Prüfzylinder der Toleranzklasse K (DIN 2269) mit 5 mm Durchmesser und einer Länge von 70 mm zum Einsatz (Abbildung 42). Ein Prüfstift dieser Spezifikation besitzt ein auf den Durchmesser bezogenes Grenzabmaß von $\pm 0,5 \mu\text{m}$, eine Rundheitstoleranz von $0,15 \mu\text{m}$ sowie eine Geradheitstoleranz der Mantellinien von $0,5 \mu\text{m}$ in einem Teilbereich von 10 mm. Die Messposition 1 lag 10 mm vom oberen Einspannpunkt bzw. der Spannzange entfernt, Messposition 2 lag 10 mm oberhalb des unteren Endes des Prüfzylinders. Die Messung erfolgte kontaktlos und dynamisch bei einer Drehzahl von 1 s^{-1} . Zusätzlich wurde der Schaft des Werkzeughalters auf Rundheit untersucht.

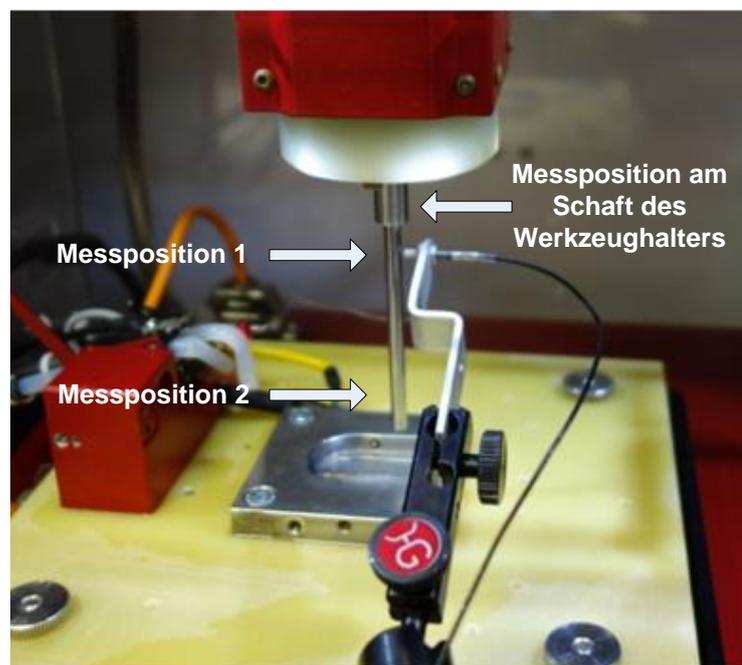


Abbildung 42: Messaufbau der dynamischen Messung des Rundheitsfehlers am kalibrierten Prüfzylinder mittels berührungslosem Sensor (Eddy)

An jeder Messposition wurde ausgehend von der Referenzposition (Kerbe am Werkzeughalter) der Drehachse die Drehbewegung gestartet und über 60 Sekunden aufgezeichnet.

6.2.3 Ergebnisse der Rundheitsuntersuchung

Die taktile Rundheitsuntersuchung an der Werkzeugaufnahme (Spindelwelle, Versuchsaufbau I) ergab einen Rundheitsfehler von $12,5 \mu\text{m}$. Dazu wurden mittels Fühlhebelmessgerät am Steilkegel insgesamt 72 Messwerte pro Umdrehung über sechs Umdrehungen hinweg aufgezeichnet und anschließend ausgewertet (vgl. Abbildung 43). Dies entspricht einer Auflösung von 5° . Da es sich dabei um eine statische Messung ohne Zeitinformation handelt, musste sie zur weiteren Auswertung auf eine Umdrehung normiert werden.

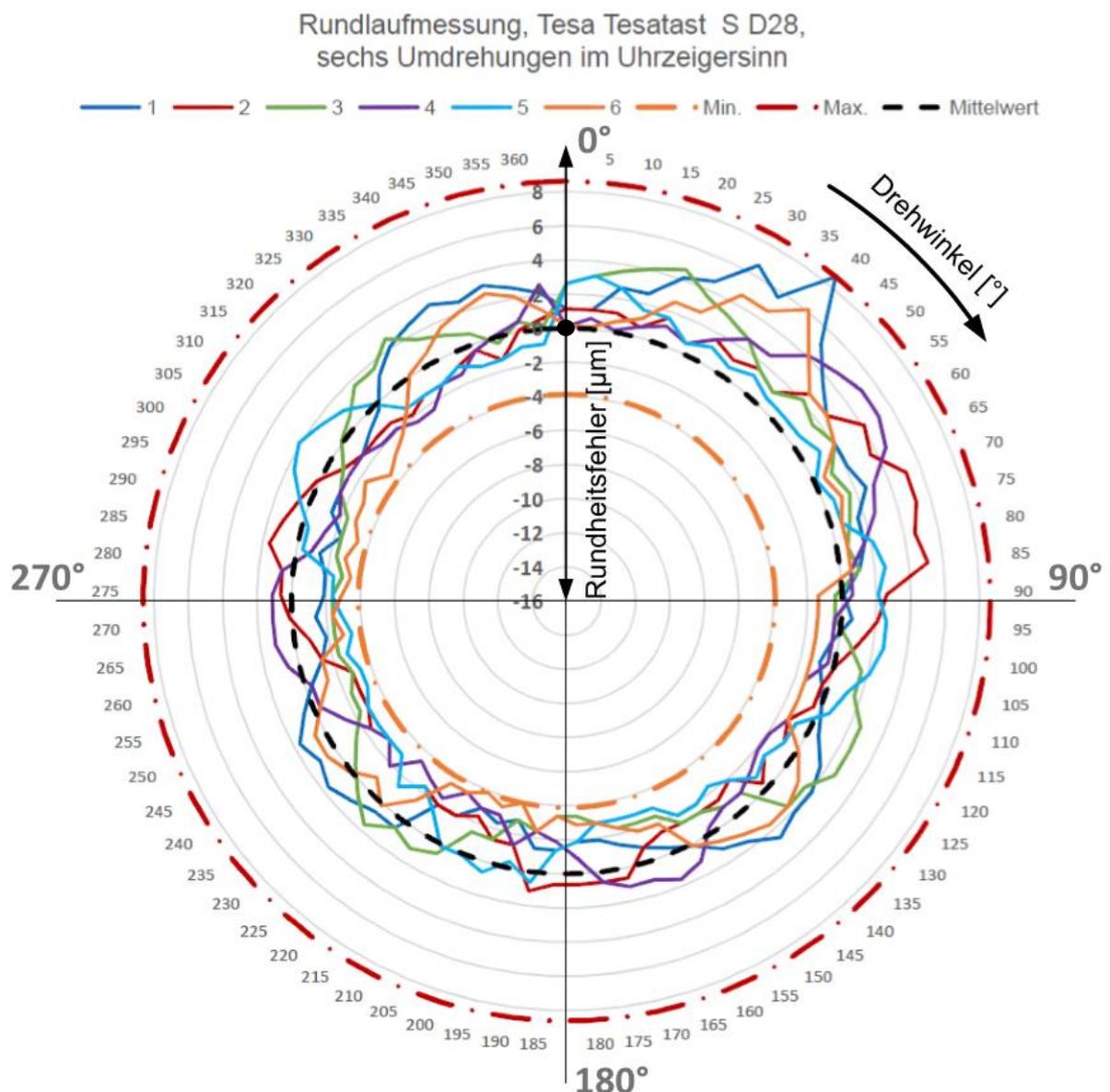


Abbildung 43: Ergebnis der taktile, statischen Rundheitsmessung an der Spindelwelle mittels Fühlhebelmessgerät in 5° -Schritten

Die kontaktlose Wegmessung mittels Wirbelstrom-Sensor (Versuchsaufbau II) ergab einen Rundheitsfehler von $14,9 \mu\text{m}$. Dazu wurden über einen Zeitraum von 60 Sekunden Daten zeitdiskret aufgezeichnet und 6 aneinander folgende

Umdrehungen/Sekunden davon ausgewertet. In Abbildung 44 stellt die gestrichelte Linie den arithmetischen Mittelwert der während 6 Umdrehungen gewonnenen Datenpunkte dar. Von dieser Referenz ausgehend wurden die Abweichungen der einzelnen Messwerte zum gebildeten Mittelwert kreisförmig in 5° -Schritten aufgetragen. Zur besseren Differenzierbarkeit wurde jede der 6 Umdrehungen in einer anderen Farbe abgebildet.

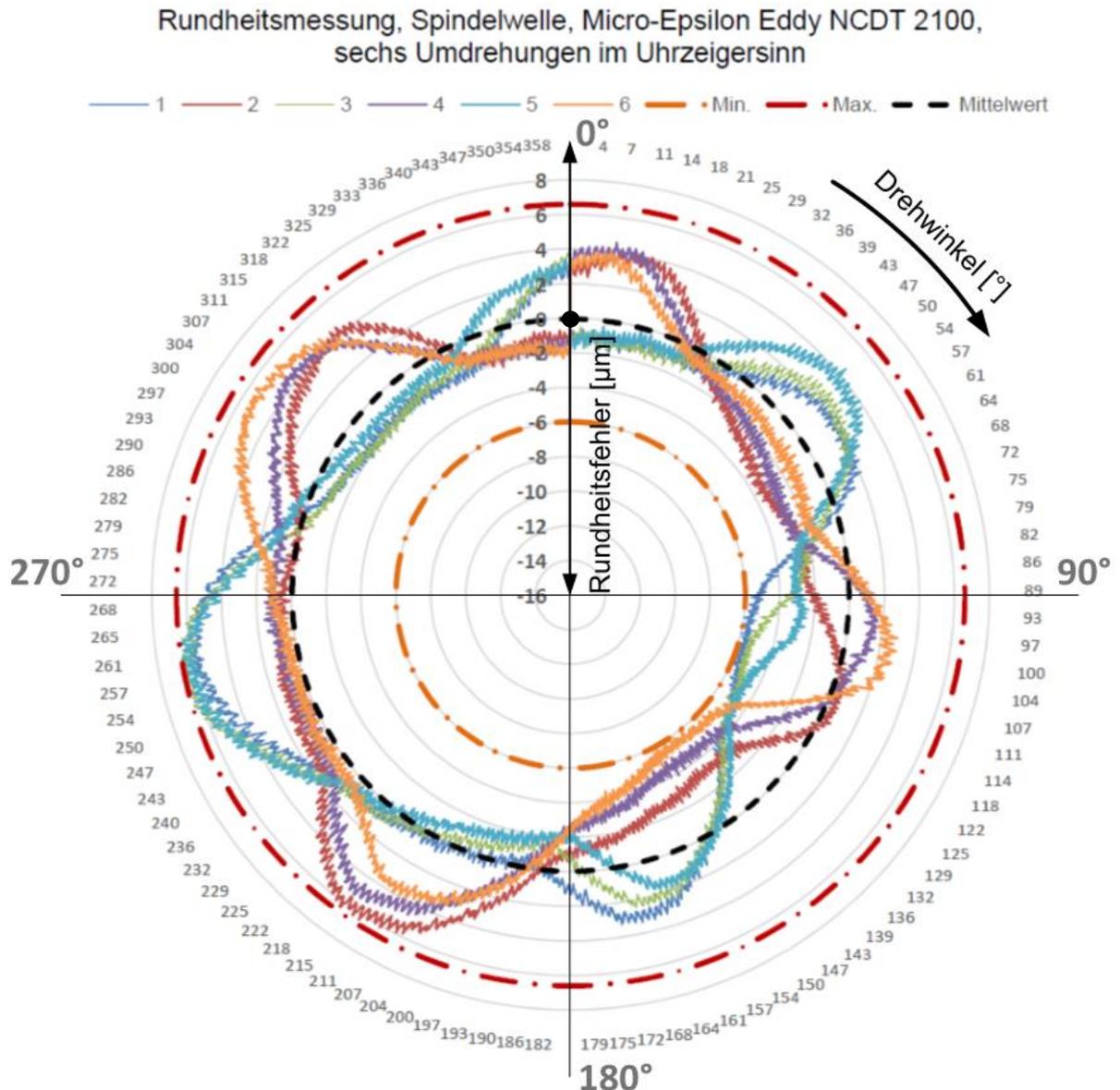


Abbildung 44: Ergebnis der kontaktlosen, dynamischen Rundheitsmessung an der Spindelwelle mittels Wirbelstromsensor

Der Rundheitsplot der zeitdiskreten, dynamischen Messung zeigt einen periodischen Signalverlauf mit einem von der zentralen Lage abweichenden Mittelpunkt, was auf eine Exzentrizität der Drehspindel schließen lässt. Betrachtet man den Rundheitsplot (Signal aufgespannt über eine Umdrehung ($= 2 \cdot \pi$)) so ist eine Formabweichung der Rundheit zu erkennen, welche durch die Ausprägung von einzelnen erhöhten Amplituden im Signalverlauf sichtbar wird. Die Anzahl dieser ausgeprägten

Amplituden liegt bei etwa 3,5. Zur näheren Interpretation der Ergebnisse wurde eine spektrale Untersuchung des dynamisch aufgezeichneten Signals über die Dauer von 60 Sekunden (= 60 Umdrehungen) unter der Anwendung einer Fourier-Transformation durchgeführt. Darunter ist eine Zerlegung eines zeitdiskreten Grundsignals in dessen harmonische Anteile zu verstehen. Die Fast Fourier Transformation (FFT) des Signalverlaufs ergab vier Amplitudenüberhöhungen (Peaks) bei 1 Hz, 2 Hz, 3,6 Hz und 7,2 Hz (Abbildung 45, rotes Signal). Der Peak bei 1 Hz kann als Grundschwingung der Exzentrizität und der Peak bei 2 Hz als dessen 1. Harmonische identifiziert werden.

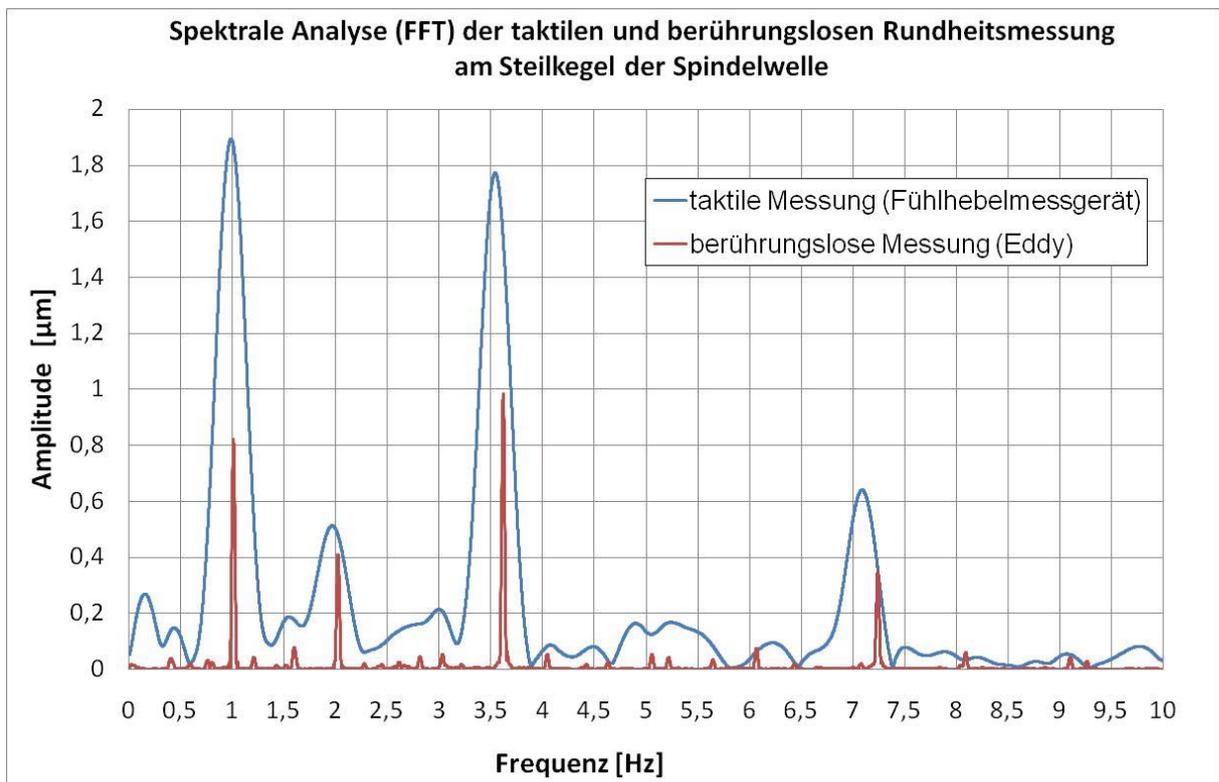


Abbildung 45: FFT des Signalverlaufes der berührungslosen Rundheitsmessung und der normierten taktilen Rundheitsmessung, Abtastrate 14400 Hz, Hanning-Fensterfunktion

Zu Vergleichszwecken folgte eine spektrale Analyse des Grundsignals der taktilen Messung mittels Fühlhebelmessgerät. Um die Rechenoperation durchführen zu können, musste dem Grundsignal, welches weg-/winkelabhängig ist, nachträglich eine Zeitinformation zugewiesen werden. Durch die Aufzeichnung des Grundsignals in 5°-Schritten, ergaben sich 72 Messwerte pro Umdrehung. Eine Normierung auf eine Umdrehung erzeugte daraus 72 Messwerte pro Sekunde, welche anschließend mittels FFT spektral untersucht wurden (Abbildung 45, blaues Signal). Es zeigten sich Peaks bei in etwa denselben Frequenzen von 1 Hz, 2 Hz, 3,5 Hz und 7,1 Hz mit doppelt so großer Amplitude. Hier sei noch einmal betont, dass es sich um eine

statische Messung ohne Zeitinformation handelt und die spektrale Analyse nur zu groben Vergleichszwecken dient.

Nach der Vermessung der Spindelwelle wurde der 70 mm lange Prüfzylinder in die Spannzange und den Werkzeughalter eingespannt und an mehreren Positionen gemessen. Die Signalaufzeichnung erfolgte dynamisch über einen Zeitraum von 60 Sekunden bei einer Drehzahl von 1 U/s. Bei der Untersuchung kam die Einspannproblematik des Spannzangensystems zum Vorschein. Es stellte sich als unmöglich heraus, den 5 mm starken Prüfzylinder mehrmals hintereinander gleich einzusetzen und zu spannen. Ein Hauptproblem stellte dabei die recht kurze Aufnahme der Spannzange dar, welche nur 3 mm betrug. Die Messung wurde erst nach mehreren Einspannversuchen und optisch gutem Rotationsergebnis durchgeführt. Der Rundheitsfehler an Messposition 1 des Prüfzylinders ergab einen Betrag von 45,1 μm . Zur graphischen Darstellung wurden jeweils die ersten 6 Sekunden der Aufzeichnung herangezogen (Abbildung 46).

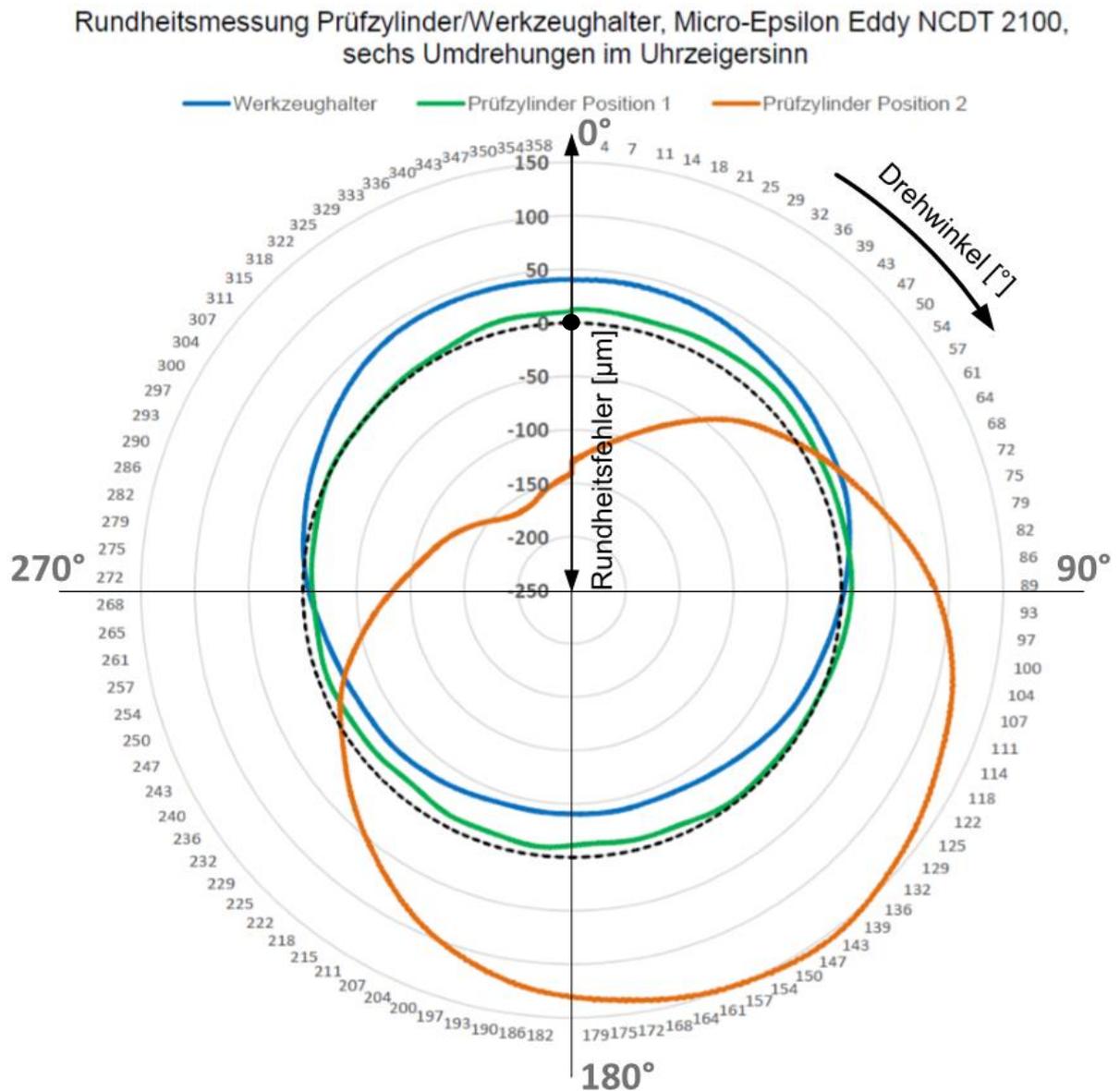


Abbildung 46: Zusammengefasstes Ergebnis der kontaktlosen Rundheitsmessung an 3 Messpositionen mittels Wirbelstromsensor

An Messposition 2 wurde ein Rundheitsfehler von 339,6 μm festgestellt. Die hier als Rundheitsfehler des Prüfzylinders bezeichneten Beträge resultieren aus einer Überlagerung von Fertigungs-, Einspann- und Rundheitsfehlern, wobei eine eindeutige Zuweisung der Anteile mit den zu Verfügung stehenden Messmittel nicht möglich war. Die Messung am Schaft des Werkzeughalters ergab einen Rundheitsfehler von 95,2 μm . Hier ist jedoch zu beachten, dass das Ergebnis der Messung am Schaft des Werkzeughalters für die Untersuchung nicht relevant ist, da sich die Messposition außerhalb der zuvor beschriebenen Fehlerkette befindet und der Schaft breiteren Fertigungstoleranzen unterliegt.

Als Nebenergebnis der taktilen Rundheitsuntersuchungen zeigte sich, dass bei kleiner werdenden Winkelschritten der Winkelfehler pro Schritt anstieg. Aus diesem Grund und um stets an denselben Messpunkten der Kegelinnenfläche zu messen,

wurde nach jeder unvollständigen Umdrehung, der auf 360° fehlende Restwinkel über die Steuerung nachgestellt. Tabelle 10 zeigt den Zusammenhang zwischen Schrittgröße und Drehabweichung pro Umdrehung.

Drehpositionsmessung A-Achse								
Winkelschritt	2°	5°	10°	20°	30°	60°	120°	360°
Winkelsummenfehler pro Umdrehung (= 360°)	21°	10°	8°	3°	$1,7^\circ$	$1,4^\circ$	$0,4^\circ$	$0,1^\circ$

Tabelle 10: Positionierabweichung der A-Achse bei unterschiedlichen Schrittgrößen

6.2.4 Ergebnisse der Drehzahlmessung

Die mittels Eddy-Sensor aufgezeichneten Wegänderungen wurden über ihre Aufnahmefrequenz in ein Zeitsignal umgewandelt und in LabView einer Fourier-Transformation unterzogen, um die Grundschwingung, die äquivalent zur Drehzahl ist, zu erhalten. Tabelle 11 beinhaltet die Ergebnisse der so durchgeführten Drehzahlmessung und die Abweichungen zu den in der Steuerung eingestellten Werten. Die maximale Drehzahl liegt den Messungen zufolge bei $1,058 \text{ s}^{-1}$.

Drehzahlmessung A-Achse								
Drehzahl lt. Steuerung [s^{-1}]	0,01	0,05	0,10	0,20	0,30	0,50	1,00	max.
Drehzahl gemessen [s^{-1}]	0,024	0,076	0,100	0,199	0,298	0,491	0,984	1,058
relativer Fehler	58,9%	33,8%	-0,2%	-0,4%	-0,6%	-1,8%	-1,6%	-

Tabelle 11: Drehzahlabweichung der A-Achse bei unterschiedlichen Drehzahlen

6.3 Evaluierung der drei Hauptachsen

Um die Genauigkeit der drei Linearantriebe der Hauptachsen X, Y und Z zu bestimmen kam das Lasermesssystem XL 80 in Kombination mit der Umwelteinheit XC 80 der Fa. Renishaw zum Einsatz (siehe Kapitel 5.1.3). Inhalt dieser Arbeit sind die Positionsmessung, Rotations- oder Kippwinkelmessung sowie die Geradheitsmessung der Hauptachsen. Laut Datenblatt ergeben sich folgende Messoptionen (vgl. [49], S. 11):

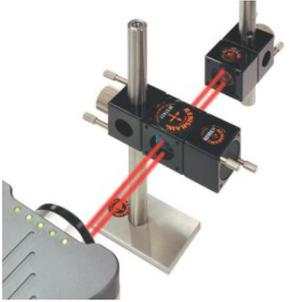
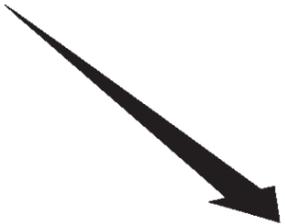
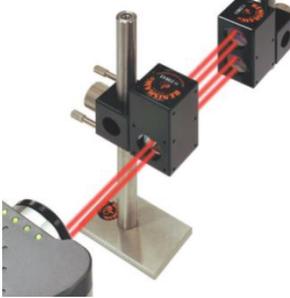
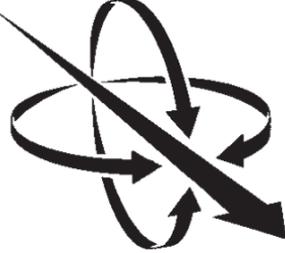
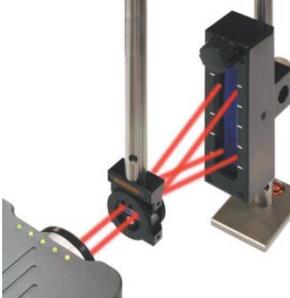
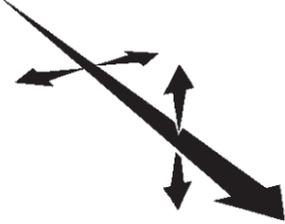
	<p>Positionsmessung</p> <p>Die Positionsmessung ist die am häufigsten durchgeführte Messung an Maschinen. Das System erfasst die Positionier- und Wiederholgenauigkeit durch Vergleich zwischen dem von der Maschine angezeigten Positionswert und der tatsächlichen, vom Laser Interferometer System erfassten Position.</p>	
	<p>Kippwinkelmessung</p> <p>Bei Werkzeugmaschinen und Koordinatenmessgeräten ist die Ursache für Positionierfehler häufig das Kippen der Achsen. Durch den Abbe'schen Effekt werden die Fehler mit zunehmendem Abstand von der Achsführung immer größer.</p>	
	<p>Geradheitsmessung</p> <p>Die Geradheitsmessung wird zur Ermittlung der horizontalen und vertikalen Geradheit der Führung einer Maschine verwendet. Geradheitsfehler haben einen direkten Einfluss auf die Positioniergenauigkeit und Bahngenauigkeit einer Maschine.</p>	

Tabelle 12: Gewählte Messoptionen und deren Beschreibung, Renishaw XL-80 (vgl. [49], S. 11)

6.3.1 Positionsmessung

Bei der Überprüfung der Positionsgenauigkeit eines Antriebes werden die in die Steuerung eingegebenen Koordinaten mit den tatsächlich von den Antrieben angefahrenen Positionen verglichen. Ausgehend von einer Referenz-/Nullposition wird mit einer fixen Schrittweite eine festgelegte Anzahl an Punkten pro Achse angefahren. Bei der hier durchgeführten bidirektionalen Messung, werden die Messpunkte jeweils von zwei Seiten angefahren. Dies wird über eine Umkehrschleife realisiert, die jenen Weg definiert, der nach dem letzten Messpunkt jeder Richtung darüber hinaus zugestellt wird. Die daran anschließende Umkehr der Bewegungsrichtung des Antriebes und erneute Zustellung des in der Umkehrschleife definierten Betrags (nun mit umgekehrten Vorzeichen) ergibt den ersten Messpunkt der nächsten Messreihe. Die Differenzbeträge aus Soll- und Ist-Positionen werden als Abweichung in Mikrometer und in Form eines Diagramms oder einer Tabelle ausgegeben. Die Positionsmessung wurde für jede Achse separat durchgeführt.

6.3.1.1 Versuchsaufbau Positionsmessung

Abbildung 47 zeigt einen beispielhaften Versuchsaufbau zur Messung der Positionsgenauigkeit eines Linearantriebes mittels Lasermesssystem Renishaw XL-80 und XC 80. In dem dargestellten Beispiel steht die Werkzeugspindel still während die untersuchte Achse bewegt wird. Am Achsschlitten wird der Linearreflektor angebracht, während das lineare Interferometer statisch befestigt ist. Es wird üblicherweise entweder direkt an der Werkzeugspindel oder außerhalb des Arbeitsbereiches positioniert.

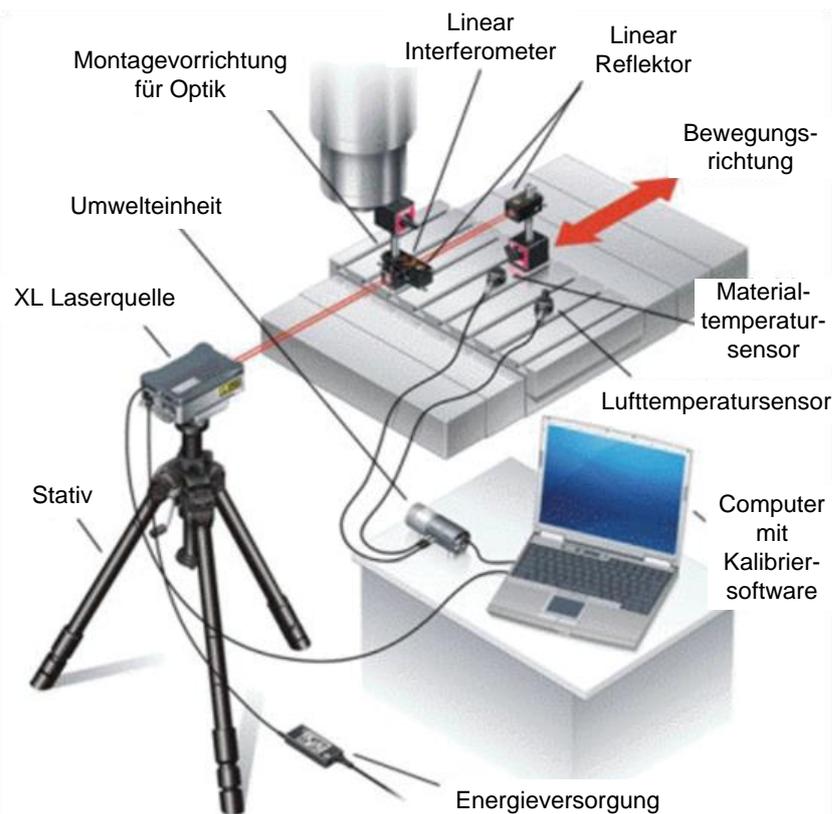


Abbildung 47: Typische Systemkonfiguration mit Renishaw XL-80 zur Messung der Position (vgl. [54], linear measurement set-up)

Im konkreten Fall der Messung der Positioniergenauigkeit an der μ PECM-Maschine ECMTEC „Micro-Production“ wurde das lineare Interferometer bestehend aus einem Strahlenteiler und einem linearen Reflektor außerhalb des Bearbeitungsraumes auf einem Stativ positioniert. Ein weiterer linearer Reflektor wurde direkt am angetriebenen X/Y-Kreuztisch befestigt. Zur Messung der Positioniergenauigkeit der Z-Achse wurde der lineare Reflektor mittels Magnetstativ am Gehäuse der Drehspindel angebracht. Beim Aufbau der Messanordnung wurde besonders auf die Parallelität der Optiken und Spiegel geachtet. Deren Ausrichtung zum Laser und Detektor wird durch die Verwendung von Streureflectoren mit kreisförmigen Zielpunkten erleichtert. Sie können einfach per Hand in die kreisrunden Öffnungen der Optiken eingesetzt werden.

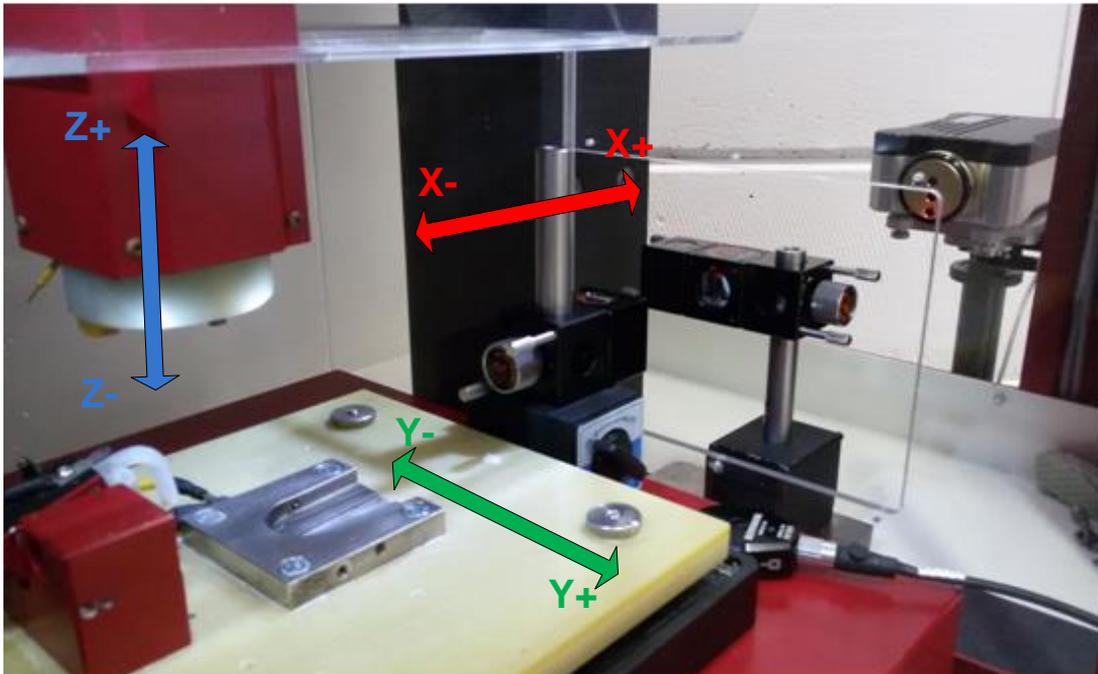


Abbildung 48: Versuchsaufbau der Positionsmessung (X-Achse) und Orientierung der beweglichen Achsen sowie deren Vorzeichen gemäß Maschinensteuerung

Neben der Laserquelle, dem Interferometer und dem Reflektor muss die Umweltkompensationseinheit XC 80 ordnungsgemäß positioniert und angeschlossen werden. Durch Messung von Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchte kann die Wellenlänge des Lasers neu berechnet und so jene Fehler, die aus der Änderung der Umgebungsbedingungen während der Messung entstehen würden, nahezu vollständig eliminiert werden.

6.3.1.2 Durchführung der Positionsmessung

Zur Überprüfung der Positionsgenauigkeit wurde jede Achse in fünf bidirektionalen Durchläufen eine Messstrecke von 90 mm Länge mit einer Schrittweite von 5 mm abgefahren und damit die Abweichungen zwischen den von der Maschinensteuerung angezeigten zu den tatsächlichen Positionen festgestellt. Die Messstrecke von 90 mm ergab sich durch den maximalen Verfahrweg der drei Vorschubachsen von 100 mm und der Berücksichtigung einer Umkehrschleife von 4 mm. Die sich ergebenden 19 Messpunkte wurden ausgehend von einer Startposition jeweils in positiver (+) und negativer (-) Richtung angefahren. Da es sich bei der Bearbeitungsmaschine laut Hersteller um eine Maschine mit Präzisionsantrieben handelt, wurde auch der Fehler bei kleinen Schrittweiten untersucht. Dazu wurde ausgehend von der Mittelposition der jeweils zu vermessenden Achse 1 mm Messstrecke mit 50 μ m Schrittweite und 1 mm Umkehrschleife bidirektional und fünfmalig abgefahren. Bei der Vermessung von X- und Y-Achse wurde sichergestellt, dass sich die orthogonal zur bewegten Achse stehende Achse in Mittelposition befand.

Die Vorzeichenorientierung der Maschinensteuerung ist in Abbildung 48 zu sehen. Bei Vermessung der X-, Y- und Z-Achse über eine Messstrecke von 90 mm wurde jeweils von der positiven Endposition ausgegangen (+ X-, + Y- und + Z-Endposition = Null-Position) und der Kreuztisch in negativer Richtung entlang der jeweiligen Achse bewegt. Bei den 1 mm langen Messstrecken wurde ausgehend von der Achsen-Mittelposition (+ 50 mm von der Null-Position) jeweils in positiver Achsrichtung verfahren.

6.3.1.3 Ergebnisse der Positionsmessung

Abbildung 49 zeigt exemplarisch die Positionsmessung der X-Achse. An der Ordinatenachse ist der Positionsfehler in μm aufgetragen, an der Abszissenachse die Entfernung von der Null-Position. Ein negativer Positionsfehler bedeutet, dass das Positioniersystem beim nach links fahren des Kreuztisches nicht weit genug fährt.

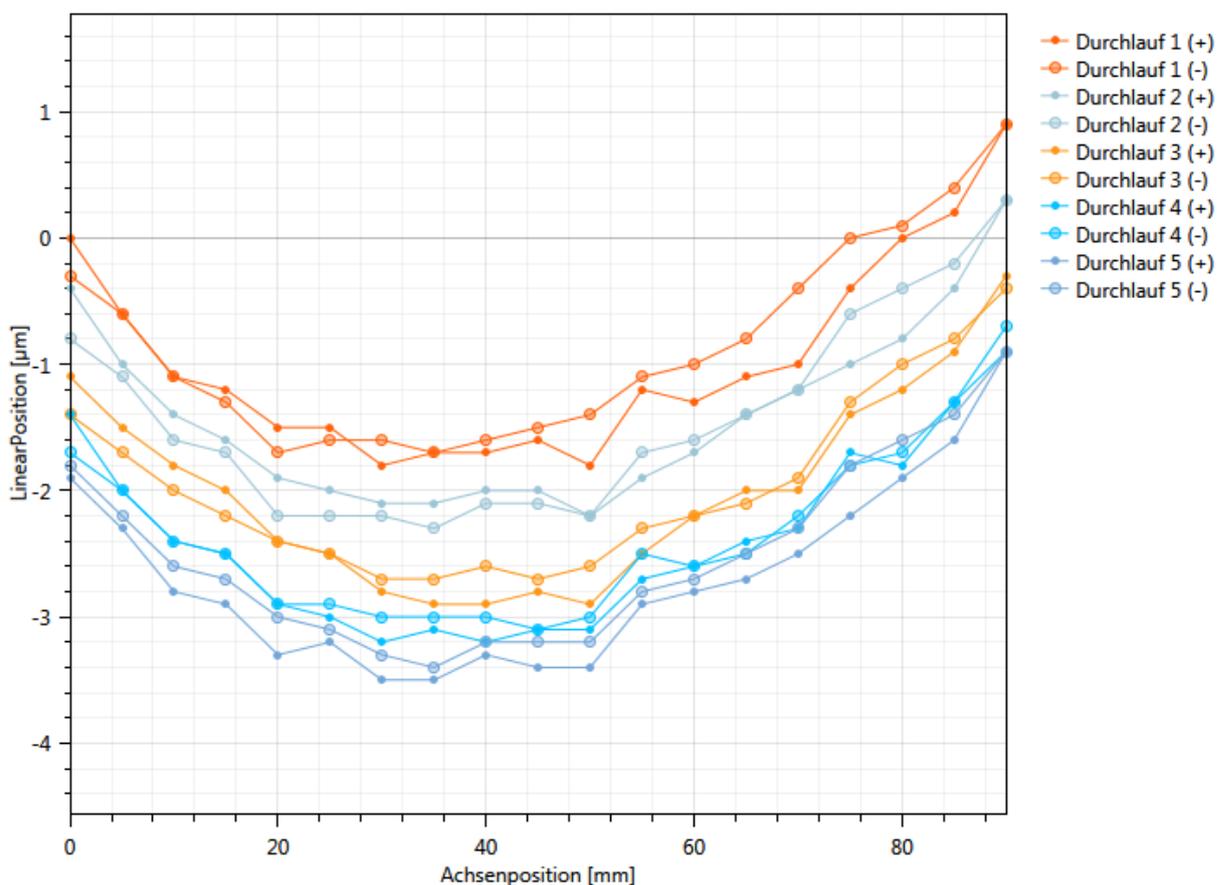


Abbildung 49: Positionsfehler der X-Achse über eine Messlänge von 90 mm und 5 Durchläufe

Eine Auswertung nach ISO 230-2 (2014) zeigt beide Bewegungsrichtungen getrennt voneinander (Abbildung 50, oben und unten), deren separate Mittelwerte, sowie die von den Einzelwerten abgeleiteten Reproduzierbarkeiten der Positionen und den gemeinsamen Mittelwert (Abbildung 50, Mitte).

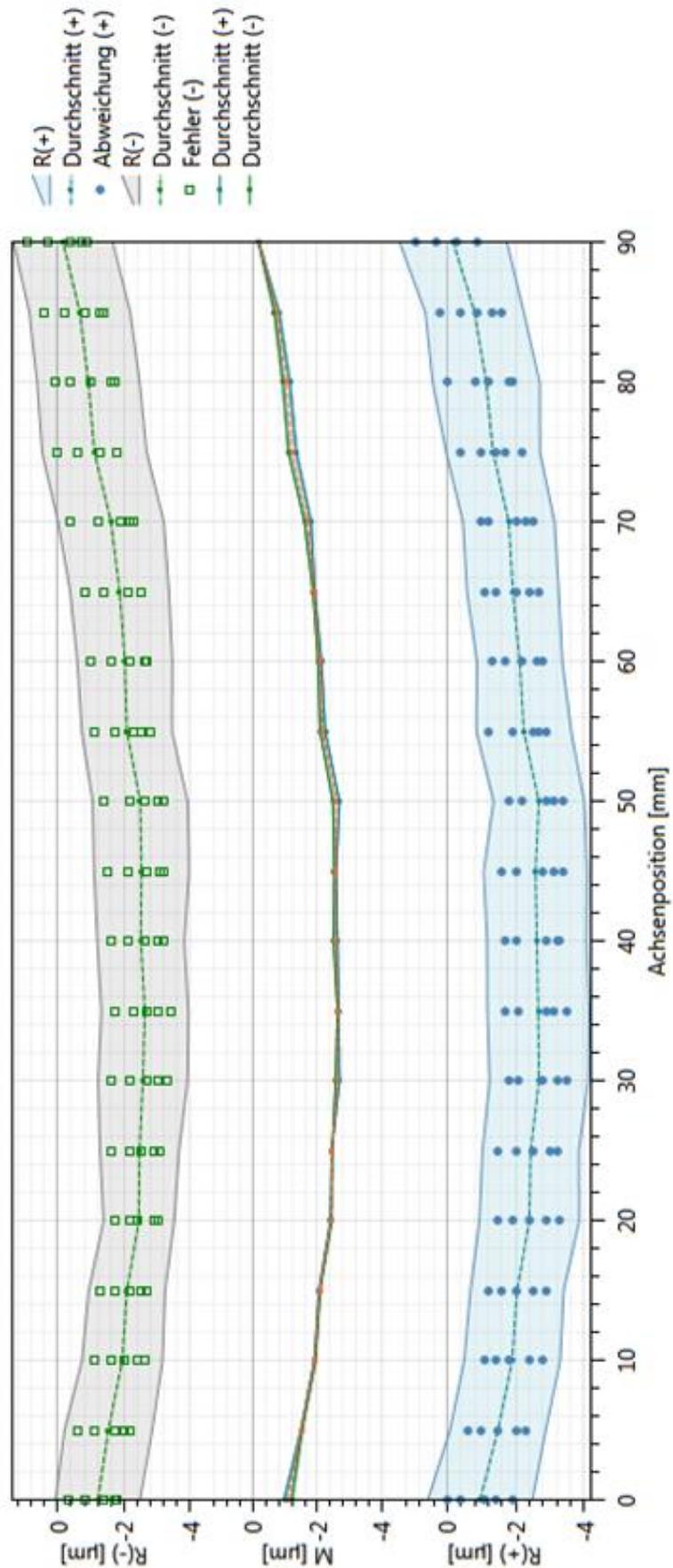


Abbildung 50: Positionierfehler, Reproduzierbarkeit und systematischer Positionierfehler nach ISO 230-2 (2014), X-Achse

Die Ergebnisse der Auswertung aller drei Achsen und unterschiedlichen Messlängen ist in Tabelle 13 zusammengefasst. Zusätzlich zu den beiden schrittweisen Messungen mit 1 und 90 mm Länge wurde eine wechselseitige Messung mit ± 20 mm Schrittweite ausgehend von der Achs-Mittelstellung (45 mm) durchgeführt, um das Umkehrspiel zu untersuchen.

Ergebnisse der Positionsmessung										
Achse		X			Y			Z		
Messbereich [mm]		1	90	± 20	1	90	± 20	1	90	± 20
Positionierungsfehler [μm]	+	0,7	5,5	1,2	1,4	31,4	11,4	0,9	10,6	2,0
	-	0,6	4,3	1,1	1,5	31,6	11,4	0,9	8,8	1,8
	bidirektional	0,7	5,5	1,3	1,5	31,7	11,4	1,0	10,6	2,0
Reproduzierbarkeit der Position [μm]	+	0,7	3,1	0,6	1,3	2,1	1,0	0,9	6,6	1,0
	-	0,5	3,2	0,6	1,1	1,9	1,0	0,9	6,5	0,6
	bidirektional	0,7	3,3	0,7	1,3	2,5	1,0	0,9	7,8	1,6
Systematischer Positionierungsfehler [μm]	+	0,1	2,5	0,7	0,4	30,0	10,7	0,2	4,4	1,3
	-	0,2	2,5	0,6	0,4	30,0	10,7	0,1	3,1	1,3
	bidirektional	0,2	2,5	0,8	0,5	30,3	10,7	0,2	4,4	1,3
Umkehrbewegung [μm]		0,1	0,2	0,2	0,2	0,6	0,1	0,2	1,5	0,7
Mittleres Umkehrspiel [μm]		0,0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	0,0	0,0	1,1	0,2
Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierungsfehlers [μm]		0,1	2,5	0,6	0,4	30,0	10,7	0,1	3,8	1,3

Tabelle 13: Ergebnisse der Positionsmessung, Auswertung nach ISO 230-2 (2014) mit der Software XCal-View (Renishaw)

Die größten Positionsabweichungen der drei Hauptachsen wurden an der Y-Achse festgestellt. Der maximale bidirektionale Positionsfehler beträgt $31,7 \mu\text{m}$ und ist damit weit entfernt von der Positionsgenauigkeit die man den Herstellerangaben entnehmen kann. Keine der drei Achsen weist über die gesamte Messlänge von 90 mm einen kleineren Positionsfehler als $5,5 \mu\text{m}$ auf.

6.3.2 Kippwinkelmessung (Rotation)

Eine der Ursachen für Positionsfehler von Werkzeugmaschinen kann das Kippen der Achsen bei Bewegung sein. Der Abbe'sche Effekt bewirkt eine Zunahme des messbaren Kippwinkel-Fehlers mit zunehmendem Abstand zur Achsführung.

6.3.2.1 Versuchsaufbau Kippwinkelmessung

Abbildung 51 zeigt einen beispielhaften Versuchsaufbau zur Messung des Kippwinkels eines Linearantriebes mittels Lasermesssystem Renishaw XL-80 und XC 80.

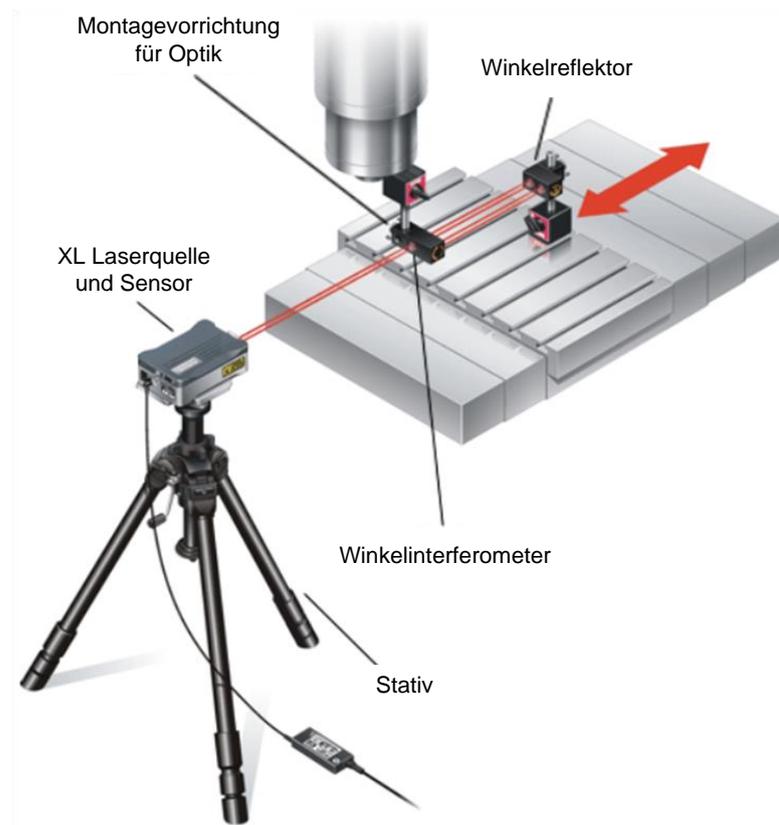


Abbildung 51: Typische Systemkonfiguration mit Renishaw XL-80 zur Messung des Kippwinkels (vgl. [54], angular measurement set-up)

Der tatsächliche Versuchsaufbau war abgesehen von der Verwendung spezieller Kippwinkel-Objektive identisch mit jenem der Positionsmessung. Auf Grund des Doppelspiegels war die Ausrichtung des Winkelinterferometers und des Winkelreflektors deutlich aufwendiger. Abbildung 52 zeigt den Versuchsaufbau zur Messung des Kippwinkels der Y-Achse. Neben der bereits erwähnten Verwendung von Streureflektorkappen als Ausrichthilfe besitzt die Laserquelle an deren Gehäuseoberseite fünf LEDs die bei optimaler Ausrichtung der Optiken zur/zum Laserquelle/Sensor grün leuchten (siehe Abbildung 52). Wird die Ausrichtung bei Bewegung des Achsschlittens schlechter, reduziert sich zuerst die Anzahl der grün leuchtenden LEDs. Anschließend wechselt die Farbe der letzten leuchtenden LED von grün zu orange und rot. Im Falle der hier beschriebenen Messungen wurde das System immer und so lange ausgerichtet, dass über den gesamten Messbereich 5 grüne LEDs sichtbar waren und damit die Ausrichtung als ideal angesehen werden konnte.

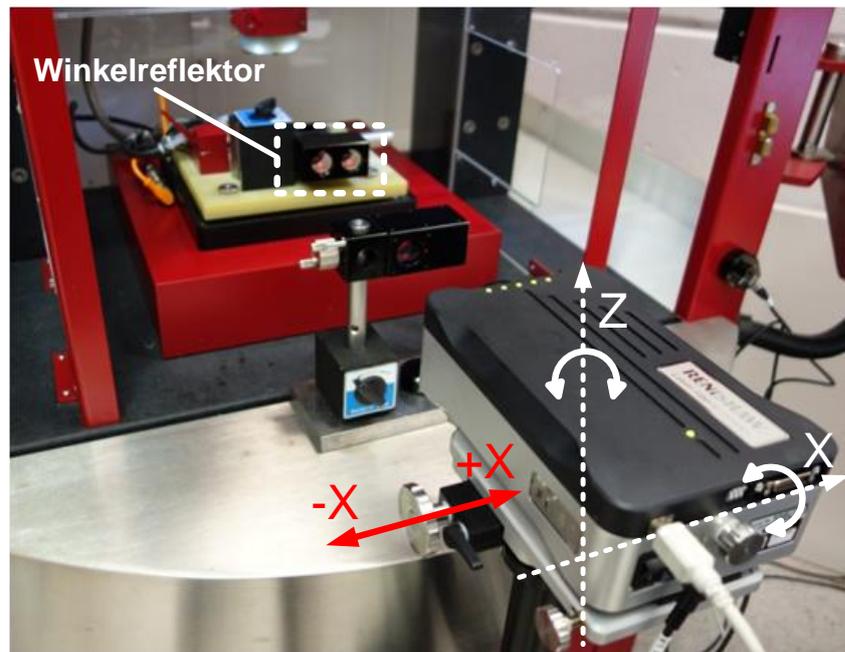


Abbildung 52: Renishaw XL-80, Versuchsaufbau zur Winkelmessung an der Y-Achse (Anordnung: Y/Z-Ebene)

Die Feinausrichtung des Lasers wird durch die darunterliegende justierbare Ausrichtplattform ermöglicht. Sie besitzt drei Rändelschrauben mit denen der Laser bezogen auf den in Abbildung 52 dargestellten Versuchsaufbau, um X- und Z-Achse gedreht (Abbildung 52, weiße Doppelpfeile) und entlang der X-Achse verschoben werden kann (Abbildung 52, roter Doppelpfeil).

6.3.2.2 Durchführung der Kippwinkelmessung

Vor der Datenerfassung musste eine geeignete Vorzeichenkonvention festgelegt werden. Ohne eine solche Konvention ist es bei einer späteren Auswertung nicht mehr möglich, Aussagen über die tatsächliche Richtung der Winkelabweichungen zu treffen. Um die Vorzeichen der Winkeländerungen am Versuchsaufbau zu ermitteln, kann der Winkelreflektor mit dem Finger leicht verdreht werden. Die festgelegte Vorzeichenkonvention dieser Versuchsreihe ist in Tabelle 14 zusammengefasst. Die kreisrunden Öffnungen im Gehäuse des Winkelreflektors sind durch schwarze Balken angedeutet.

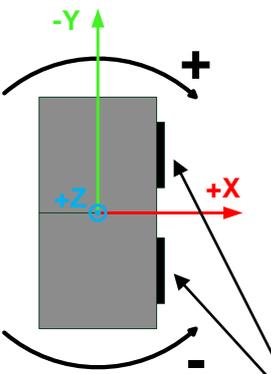
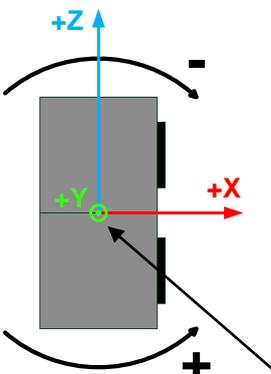
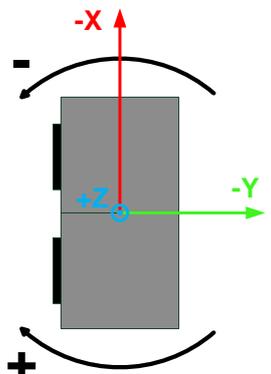
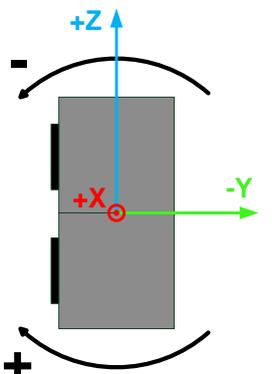
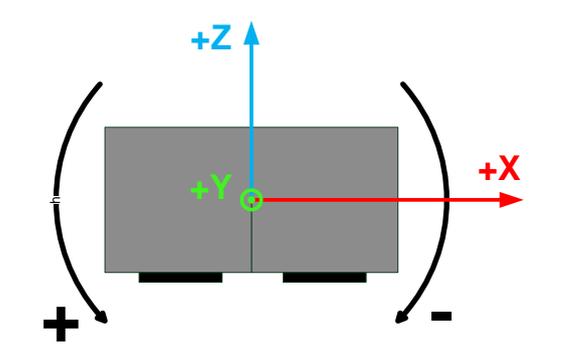
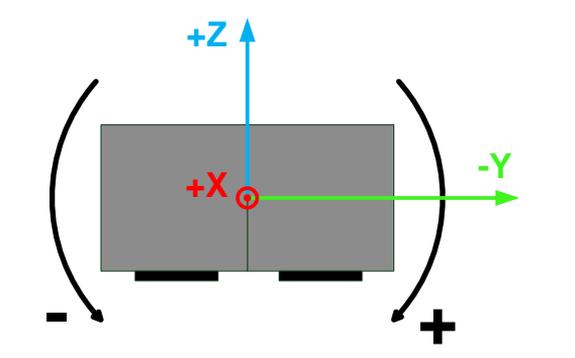
Kippwinkel X-Achse		Kippwinkel Y-Achse	
X/Y-Ebene (horizontal)	X/Z-Ebene (vertikal)	X/Y-Ebene (horizontal)	Y/Z-Ebene (vertikal)
			
	Strahleneintritt und Austritt	Maschinen- koordinatensystem	Drehrichtung und Vorzeichen
Kippwinkel Z-Achse			
X/Z-Ebene		Y/Z-Ebene	
			

Tabelle 14: Vorzeichenkonvention bei der Kippwinkelmessung am Objekt des Winkelreflektors

Wie bereits bei der Positionsmessung wurden jeweils fünf bidirektionale Durchläufe mit Messstrecken von 1 mm / 90 mm und Schrittweiten von 50 μ m / 5 mm durchgeführt. Die Umkehrschleife betrug 1 mm / 4 mm was zu 19 / 21 Messpunkten pro Messstrecke und Bewegungsrichtung führte. Im Gegensatz zur Positionsmessung mussten bei der Kippwinkelmessung pro Achse zwei getrennte Messungen mit verändertem Messaufbau durchgeführt werden. Dies resultiert daraus, dass sich die Gesamtverkipfung um eine betrachtete Achse (z.B. X-Achse) stets aus den Anteilen der Einzel-Verkipfungen um die beiden anderen Achsen (z.B. Y- und Z-Achse) zusammensetzt.

6.3.2.3 Ergebnisse der Kippwinkelmessung

In Abbildung 53 ist exemplarisch das Ergebnis der Kippwinkelmessung der Y-Achse in der Y/Z-Ebene dargestellt. Y/Z-Ebene bedeutet, dass die zwei Reflektoröffnungen

des bewegten Winkelreflektors entlang der Z-Achse ausgerichtet wurden. Der bidirektionale Positionierfehler der Y-Achse beträgt 34,5 arcsecs (= Winkelsekunden) bei einer Messstrecke von 90 mm. Ein Vergleich der drei vermessenen Hauptachsen zeigt, dass die Y-Achse den größten Winkelfehler aufweist. Durch die fünffache und bidirektionale Wiederholung der Einzelmessungen können zufällige einmalig auftretende Störeinflüsse wie z.B. Verschieben einer Optik durch versehentliches Berühren aber auch schleichende Fehler durch beispielsweise locker befestigte Optiken zu einem hohen Grad ausgeschlossen werden.

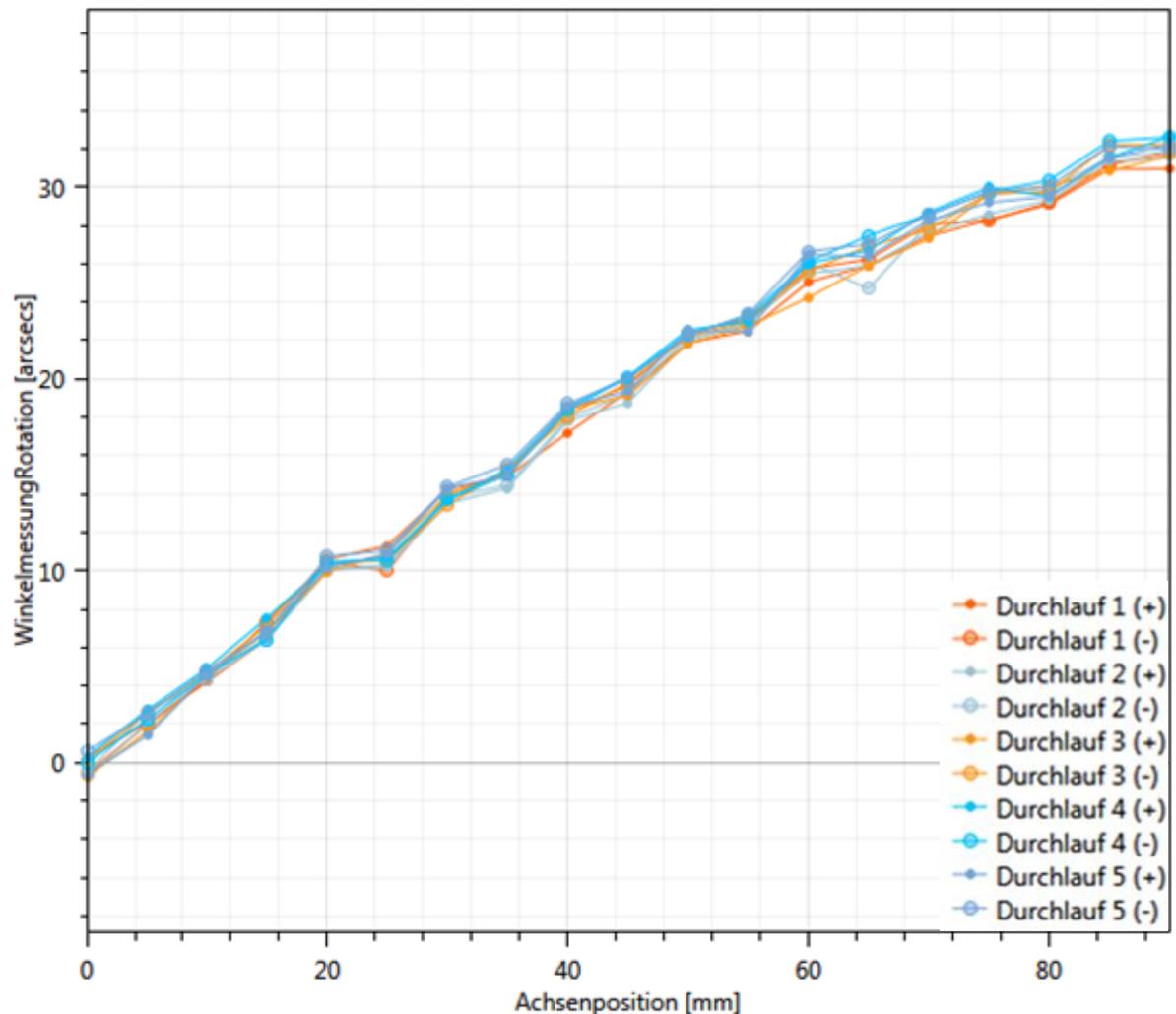


Abbildung 53: Kippwinkelfehler der Y-Achse über eine Messlänge von 90 mm bei fünf Durchläufen (Y/Z-Ebene)

Das Diagramm (Abbildung 53) zeigt eine im Vergleich zum ausgeprägten Kippwinkelfehler geringe Spreizung der Messpunkte. Dies wird in der Ergebnistabelle als mittleres Umkehrspiel beschrieben. Die Ergebnisse der Auswertung aller drei Achsen und unterschiedlichen Messstrecken sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Eine Auswertung nach ISO 230-2 (2014) zeigt beide Bewegungsrichtungen getrennt voneinander (Abbildung 54, oben und unten), deren separate Mittelwerte, sowie die von den Einzelwerten abgeleiteten Reproduzierbarkeiten der Positionen und den gemeinsamen Mittelwert (Abbildung 54, Mitte).

Rotation (Kippwinkel)													
Achse		X				Y				Z			
Ebene		X/Y		X/Z		X/Y		Y/Z		Y/Z		X/Z	
Messbereich [mm]		1	90	1	90	1	90	1	90	1	90	1	90
Positionsfehler [arcsecs]	+	4,5	11,0	3,1	19,1	0,7	5,8	2,4	34,5	3,5	15,2	5,5	13,1
	-	4,1	10,3	3,4	18,1	0,6	5,4	3,3	34,0	3,2	16,9	5,9	10,2
	\pm	4,6	11,0	3,4	19,7	0,8	6,1	3,3	34,5	3,5	16,9	6,5	13,1
Reproduzierbarkeit der Position [arcsecs]	+	4,2	7,1	2,9	4,9	0,5	3,5	2,3	3,5	3,5	2,6	5,4	9,2
	-	4,0	7,2	3,0	4,8	0,6	3,4	3,3	4,3	3,1	2,8	5,4	7,0
	\pm	4,4	7,8	3,2	6,9	0,6	3,8	3,3	4,3	3,5	2,9	5,7	9,9
Systematischer Positionierfehler [arcsecs]	+	0,6	5,4	0,3	15,0	0,3	2,9	0,7	32,1	0,3	13,7	0,6	5,3
	-	0,2	4,5	0,6	15,5	0,2	2,5	0,7	32,2	0,4	14,6	1,1	5,0
	\pm	0,6	5,5	0,6	16,1	0,3	3,1	0,8	32,4	0,6	14,6	1,4	6,3
Umkehrbewegung [arcsecs]		0,5	1,6	0,5	3,0	0,2	0,7	0,4	0,7	0,5	0,9	1,4	2,9
Mittleres Umkehrspiel [arcsecs]		-0,2	1,0	0,2	2,3	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,5	-0,6	-2,4
Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers [arcsecs]		0,3	4,8	0,4	15,2	0,3	2,6	0,4	32,2	0,3	14,1	0,5	4,9

\pm ... bidirektional

Tabelle 15: Ergebnisse der Kippwinkelmessung, Auswertung nach ISO 230-2 (2014) mit der Software XCal-View (Renishaw)

Die größten Kippwinkelfehler der drei Hauptachsen wurden an der Y-Achse festgestellt. Der maximale bidirektionale Kippwinkelfehler beträgt 34,5 arcsecs. Keine der drei Achsen weist über die gesamte Messlänge von 90 mm einen kleineren bidirektionalen Kippwinkelfehler als 6,1 arcsecs auf.

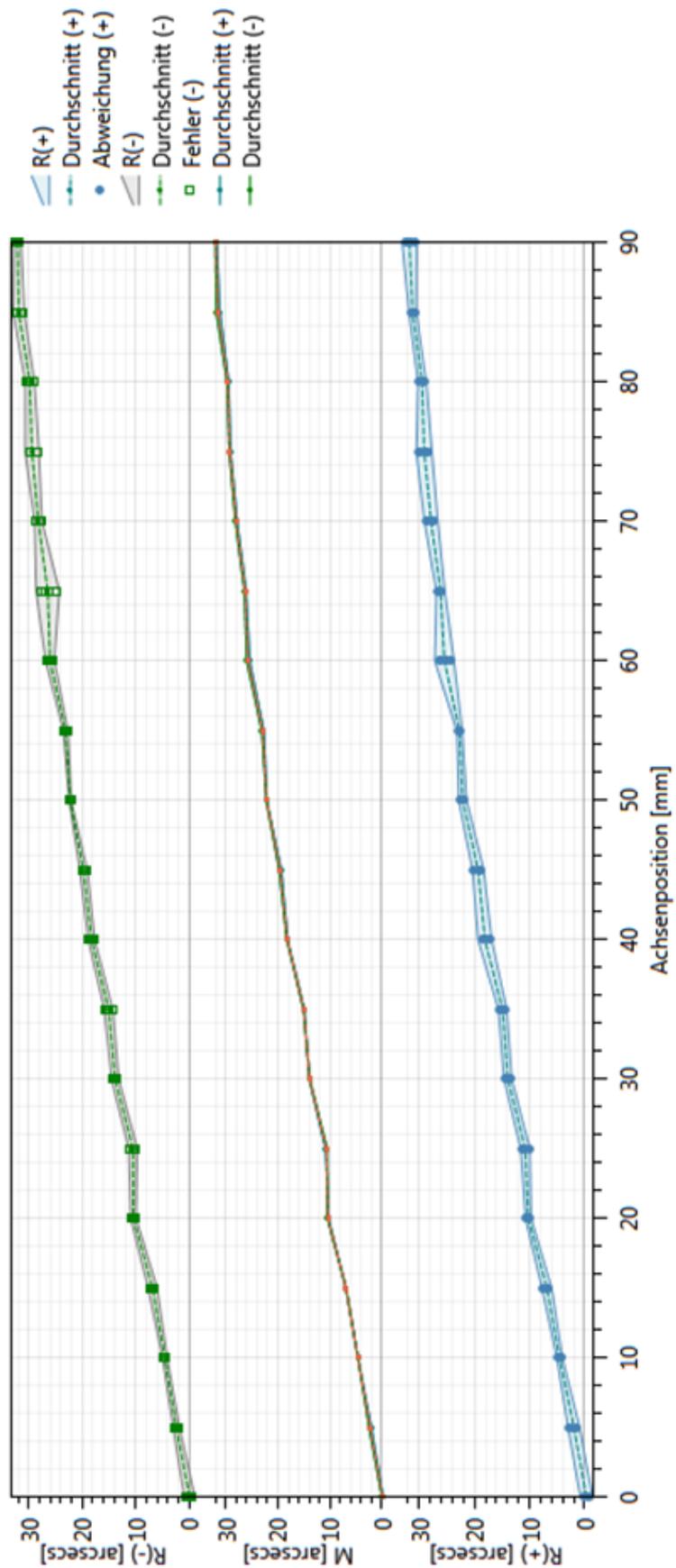


Abbildung 54: Kippwinkelfehler, Reproduzierbarkeit und systematischer Positionierfehler nach ISO 230-2 (2014), Y-Achse (Y/Z-Ebene)

6.3.3 Geradheitsmessung

Unter der Geradheit einer Führung wird deren Positionsabweichung orthogonal zur Bewegungsrichtung verstanden. Geradheitsfehler haben einen direkten Einfluss auf die Positioniergenauigkeit und die Bahngenauigkeit einer Maschine. Im Zuge dieser Untersuchung wurden X- und Y-Achse in jeweils zwei Ebenen vermessen. Die Geradheitsmessung der Z-Achse war aus baulichen Gründen der Maschine nicht möglich.

6.3.3.1 Versuchsaufbau der Geradheitsmessung

Abbildung 55 zeigt einen beispielhaften Versuchsaufbau zur Messung der Geradheit eines Linearantriebes mittels Lasermesssystem Renishaw XL-80 und XC 80. In der Abbildung ist der Geradheitsreflektor horizontal positioniert, wodurch die Geradheit in der X/Y-Ebene gemessen werden kann. Auch hier wurde besonders viel Wert auf die exakte Ausrichtung des Geradheitsreflektors zur Laserquelle gelegt, um Aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

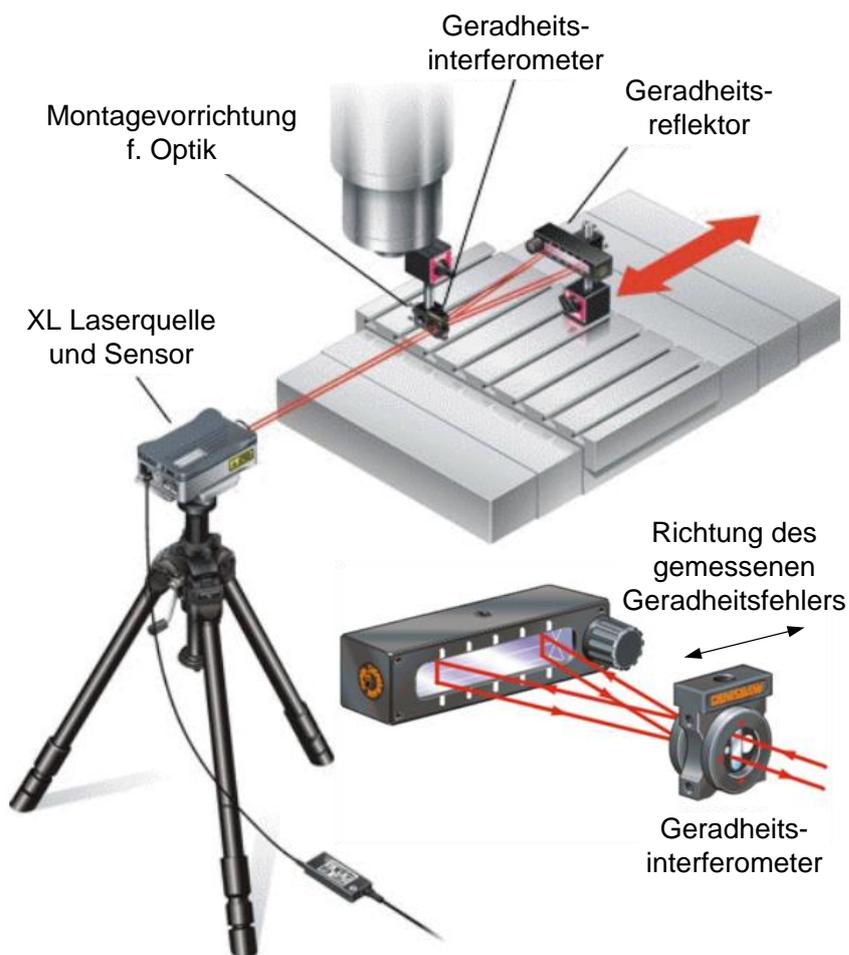


Abbildung 55: Typische Systemkonfiguration mit Renishaw XL-80 zur Messung des Kippwinkels (vgl. [54], straightness measurement set-up)

6.3.3.2 Durchführung der Geradheitsmessung

Wie bereits bei der Kippwinkelmessung beschrieben, musste auch bei der Geradheitsmessung eine geeignete Vorzeichenkonvention festgelegt werden. Um die Vorzeichen der Geradheitsabweichung am Versuchsaufbau zu ermitteln, sollte der Geradheitsreflektor mit dem Finger orthogonal zur Bewegungsrichtung leicht gedrückt werden. Die festgelegte Vorzeichenkonvention dieser Versuchsreihe ist in Tabelle 16 zusammengefasst. Die länglichen Öffnungen im Gehäuse des Geradheitsreflektors sind durch schwarze Balken angedeutet.

Geradheit X-Achse		Geradheit Y-Achse	
X/Y-Ebene (horizontal)	X/Z-Ebene (vertikal)	X/Y-Ebene (horizontal)	Y/Z-Ebene (vertikal)

Tabelle 16: Vorzeichenkonvention bei der Geradheitsmessung am Objekt des Geradheitsreflektors

6.3.3.3 Ergebnisse der Geradheitsmessung

Der Geradheitsfehler einer Achse kann als der Abstand zwischen zwei parallelen Linien angesehen werden, welche alle Messpunkte entlang der Achse einschließen und parallel zur allgemeinen Richtung der Achse liegen. Die Geradheits-Messdaten einer mit dem Laserinterferometer vermessenen Achse sind nicht auf die allgemeine Richtung der Achse bezogen, sondern auf die Achse des Laserstrahls. Bei ungenauer manueller Ausrichtung des Laserstrahls zur vermessenden Achse bildet sich über die Messlänge ein Summenfehler (siehe Abbildung 56).

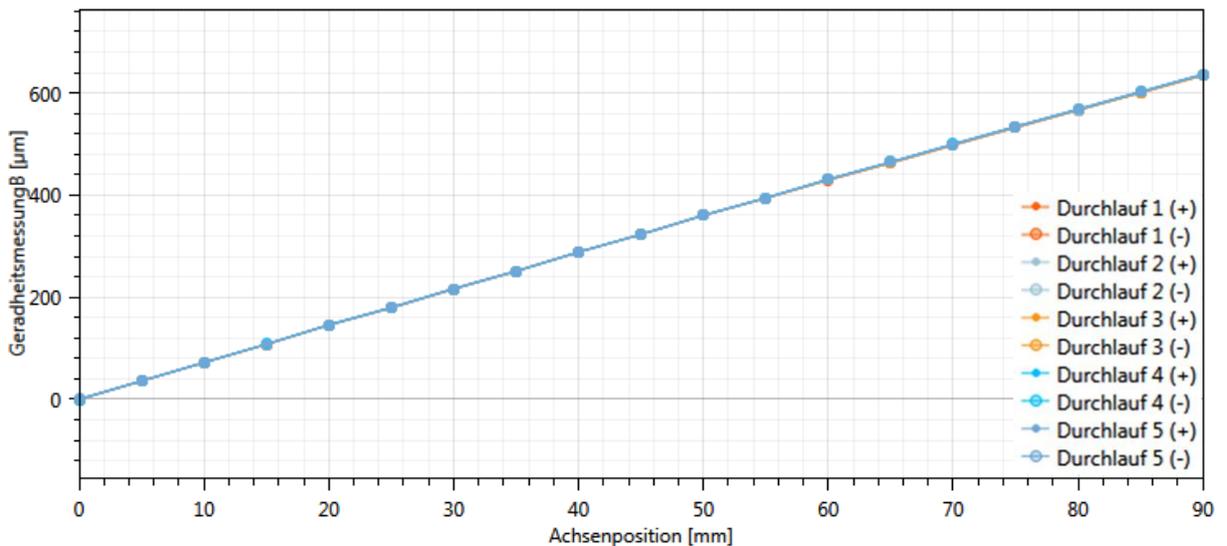


Abbildung 56: Messdaten (Rohdaten) der Geradheitsmessung der Y-Achse (Y/Z-Ebene), Renishaw XCal-View

Die Software Renishaw XCal-View bietet zwei unterschiedliche Auswerteooptionen: Eine „Gerade durch die Endpunkte“ oder die „Methode der kleinsten Quadrate“. Die Endpunkteinpassung verbindet ersten und letzten Messpunkt durch eine Kalibriergerade und weist die Abweichungen der Messpunkte zu dieser Gerade als Geradheitsfehler aus. Die Methode der kleinsten Quadrate liefert eine mathematisch korrektere Auswertung der Geradheitsfehler. Hier wird die Kalibriergerade so eingepasst, dass die Summe der Quadrate der Datenpunktwerte ein Minimum ergibt. Abbildung 57 zeigt das mittels Endpunktgerade fehlerkompensierte Ergebnis der Geradheitsmessung der Y-Achse (Y/Z-Ebene).

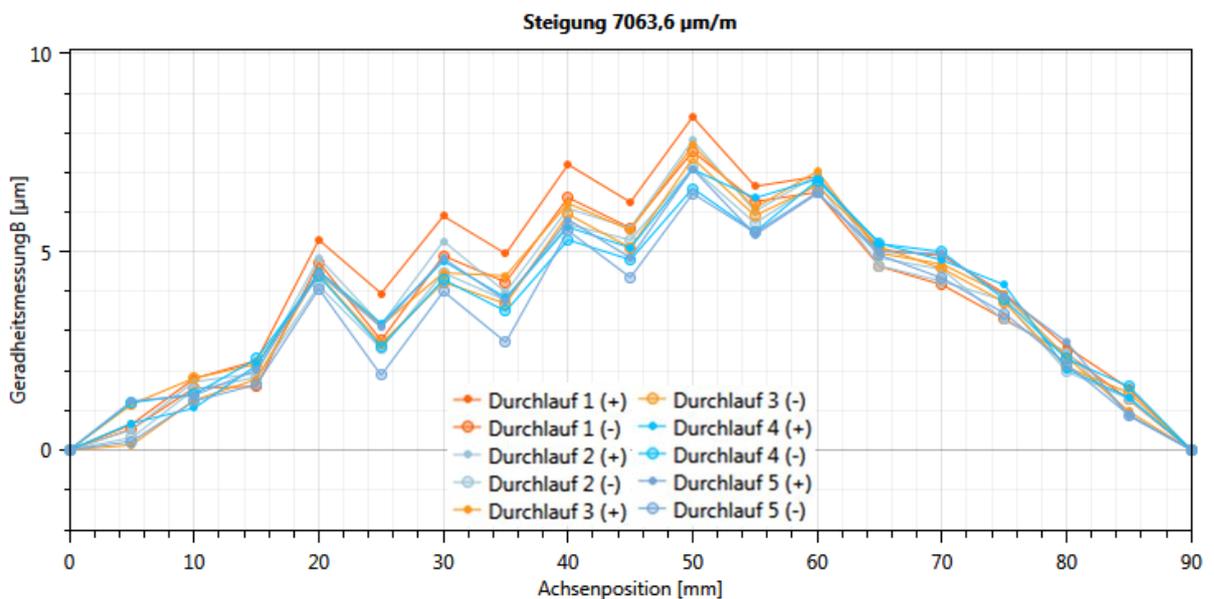


Abbildung 57: Geradheitsauswertung mittels „Gerade durch die Endpunkte“, Y-Achse (Y/Z-Ebene), Renishaw XCal-View

Eine alternative Auswertung der Geradheitsabweichung nach der Methode der kleinsten Quadrate zeigt Abbildung 58.

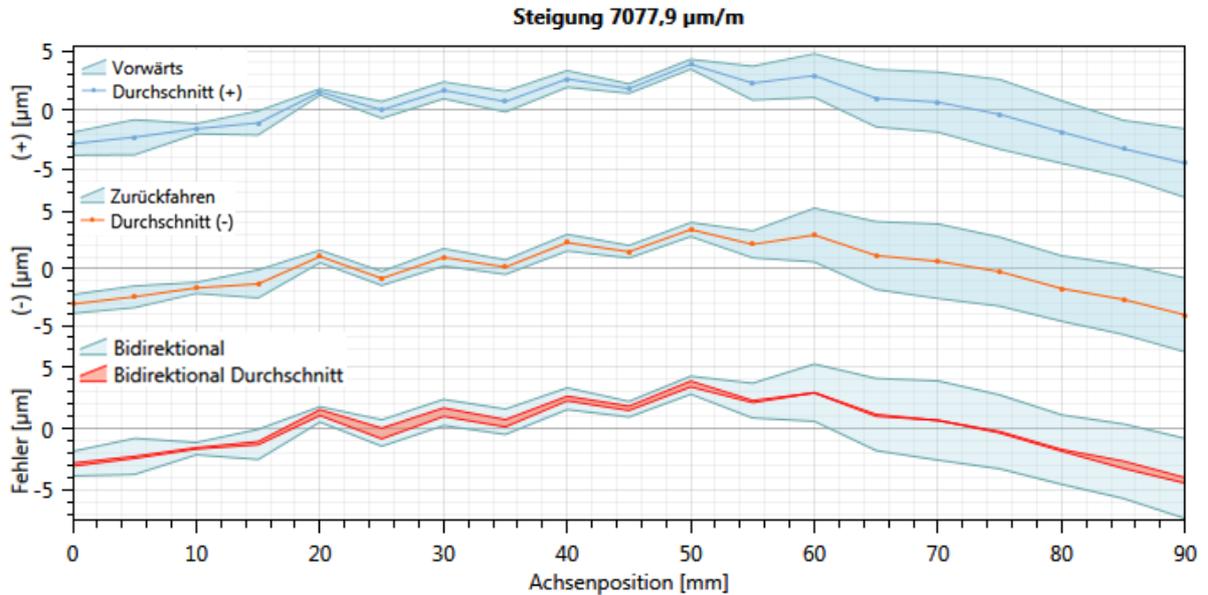


Abbildung 58: Geradheitsauswertung durch Bildung der Summe der kleinsten Fehlerquadrate, Y-Achse (Y/Z-Ebene), Renishaw XCal-View

Zusätzlich wurde eine Auswertung nach VDI 2617 durchgeführt (siehe Abbildung 59).

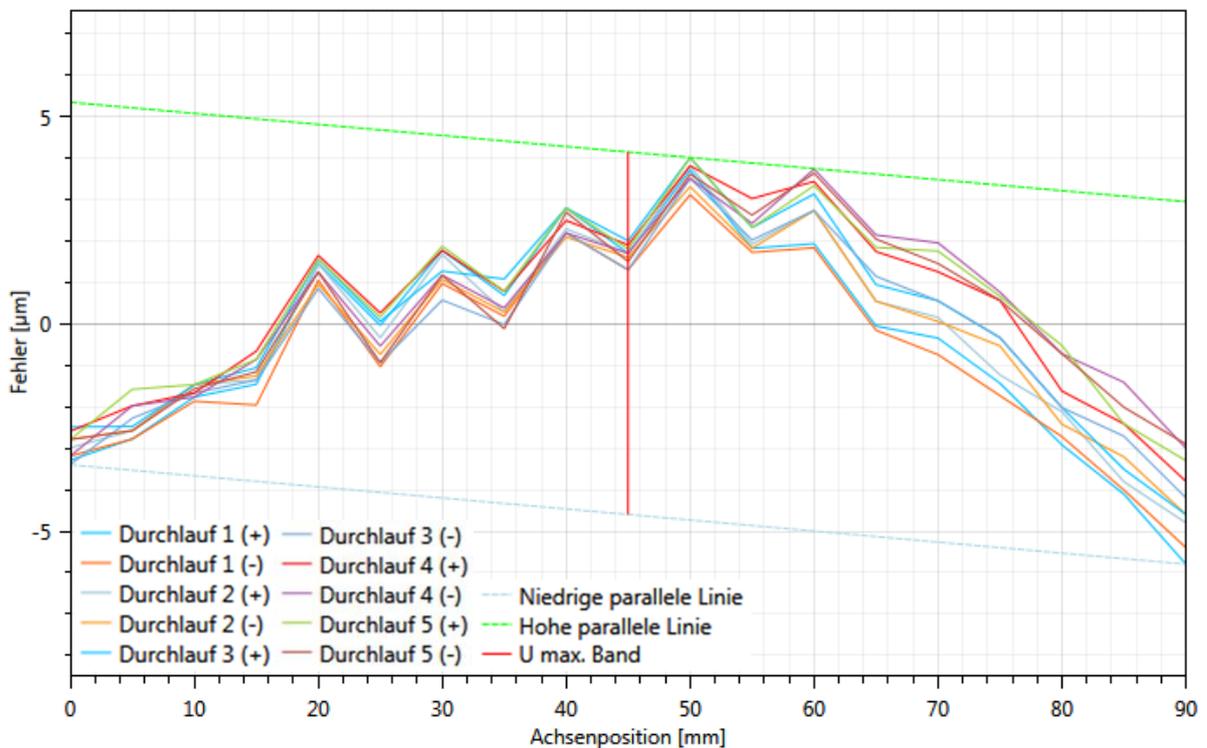


Abbildung 59: Geradheitsauswertung nach VDI 2617, Y-Achse (Y/Z-Ebene), Renishaw XCal-View

Eine ausführliche Zusammenfassung aller ausgewerteten Größen der Geradheitsmessungen zeigt Tabelle 17. Die Ergebnisse der mit den zu Verfügung

stehenden Optionen der Software Renishaw XCal-View (Gerade durch die Endpunkte und die Methode der kleinsten Quadrate) ausgewerteten Messdaten weisen nur geringe Unterschiede auf. Die größte Geradheitsabweichung über eine Messstrecke von 90 mm wurde an der Y-Achse mit vertikalem Versuchsaufbau und einem Ergebnis von 8,3 μm gemessen.

Ergebnisse der Geradheitsmessung									
Achse	Ebene	Messbereich [mm]	VDI 2617 (1989)	Renishaw (2012)					Auswertemethode
			U Max. [μm]	Genauigkeit A [μm]	Wiederholgenauigkeit in eine Richtung [μm]	Bidirektionale Wiederhol- genauigkeit [μm]	Mittleres Umkehrspiel [μm]	Geradheitsabweichung [μm]	
X	X/Y	1	1,8	3,3	3,1	3,1	0	0,5	Gerade durch Endpunkte
				3,3	3,1	3,1	0	0,5	Summe der kleinsten Fehlerquadrate
	90	5,2	6,9	3,5	5,2	1,3	4,0	Gerade durch Endpunkte	
			6,9	3,5	5,2	1,3	3,9	Summe der kleinsten Fehlerquadrate	
	X/Z	1	1,8	3,5	3,4	3,4	0,1	0,6	Gerade durch Endpunkte
				3,5	3,4	3,4	0,1	0,6	Summe der kleinsten Fehlerquadrate
90	6,8	12,1	10,1	10,1	0,6	5,6	Gerade durch Endpunkte		
12,4	10,1	10,1	0,6	5,9	Summe der kleinsten Fehlerquadrate				
Y	X/Y	1	1,4	2,7	2,5	2,5	-0,2	0,7	Gerade durch Endpunkte
				2,6	2,5	2,5	-0,2	0,6	Summe der kleinsten Fehlerquadrate
	90	4,5	6,6	3,9	4,8	0,8	4,3	Gerade durch Endpunkte	
			5,9	3,9	4,8	0,8	3,7	Summe der kleinsten Fehlerquadrate	
	Y/Z	1	2,7	4,7	4,4	4,4	-0,2	1,1	Gerade durch Endpunkte
				4,7	4,4	4,4	-0,2	1,1	Summe der kleinsten Fehlerquadrate
90	8,8	12,2	6,5	6,5	0,2	7,8	Gerade durch Endpunkte		
12,6	6,5	6,5	0,2	8,3	Summe der kleinsten Fehlerquadrate				

Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse der Geradheitsmessung nach VDI 2617 (1989) und Renishaw (2012)

6.4 Funktionale Überprüfung des Pulsgenerators

Der Pulsgenerator dient dazu, die für das μ PECM-Verfahren benötigten ultrakurzen Spannungspulse im Nanosekundenbereich zu erzeugen. Er sitzt direkt auf dem angetriebenen Achsschlitten der Z-Achse und wird gemeinsam mit dem Bearbeitungskopf bewegt. Zur Überprüfung der Form der tatsächlich erzeugten Pulse wurde eine hochfrequente Spannungsmessung durchgeführt.

6.4.1 Versuchsaufbau der Pulsuntersuchung

Der grundlegende Versuchsaufbau ist in Kapitel 4.3 beschrieben. Um die Spannungspulse zwischen Anode und Kathode zu messen, wurde das digitale Oszilloskop NI USB-5133 eingesetzt. Die Messprobe wurde einerseits direkt am Werkzeug und andererseits an der kontaktierten Montageplatte befestigt (siehe Abbildung 60). Die mit einer Abtastrate von 100 MHz erfassten Signale wurden über eine USB-Schnittstelle an einen Auswerterechner übertragen und mit der Software NI LabVIEW ausgewertet.

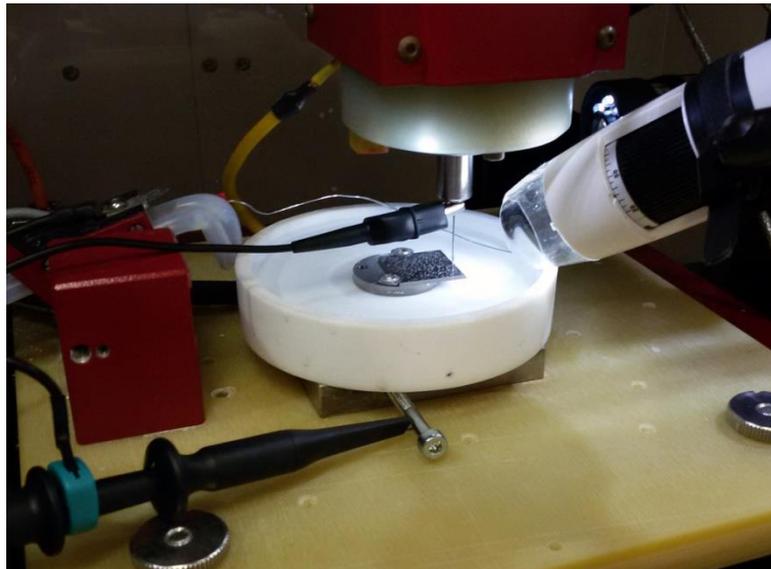


Abbildung 60: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Pulsgenerators

6.4.2 Versuchsablauf der Pulsuntersuchung

Die Spannungssignale wurden parallel zur Bearbeitung des Werkzeuges aufgezeichnet. Während der Aufzeichnung war das Werkzeug kathodisch (+) und das Werkstück anodisch (-) gepolt. Es wurden mehrere Parameter variiert, um deren Auswirkung auf den Pulsverlauf zu ermitteln. Aufgrund der ultrakurzen Pulse von bis zu 100 ns Pulsdauer ($1 \cdot 10^{-7}$ s) wurde als Abtastrate 100 MHz ($1 \cdot 10^8$ Hz = maximale Abtastfrequenz des Messgerätes) gewählt. Im Sinne einer statistischen Auswertung der Ergebnisse wurde ein 2-stufiger, teilfaktorieller Versuchsplan oder auch „DOE“ - Design of Experiment erstellt. Die statistische Versuchsplanung ist ein

unterstützendes Werkzeug bei der Planung von Versuchen und Interpretation der Versuchsergebnisse. Sie dient dem Zweck, einem realen und oftmals komplexen Prozess mit mehreren Einflussfaktoren durch eine mathematisch optimierte Abfolge von praktischen Experimenten darzustellen und deren Einfluss auf die untersuchte Zielgröße sowie Wechselwirkungen zwischen den Einflussfaktoren zu beschreiben. Im Gegensatz zur vollfaktoriellen Versuchsplanung, bei der alle Versuchsmöglichkeiten ausgeschöpft werden, wird bei der teilfaktoriellen Versuchsplanung versucht, einen Kompromiss zwischen der Einhaltung einer repräsentativen Ergebnisauflösung und der Reduktion der Versuchsdauer zu erreichen. Dabei wird die Anzahl der Experimente um ein Vielfaches von 2 reduziert. Bei einem Prozess mit 8 Faktoren und 2 Stufen pro Faktor erhält man bei einer halbfaktoriellen Versuchsplanung $2^{(8-1)} = 2^7 = 128$ Experimente, anstelle von 256 Experimenten einer vollfaktoriellen Versuchsplanung. Die Reduktion der Experimente geschieht dabei ohne Auswirkung auf die statistischen Eigenschaften der Ausgewogenheit und Orthogonalität. „Orthogonal ist ein Versuchsplan dann, wenn keine Kombination aus jeweils zwei Spalten miteinander korreliert. Ausgewogen ist ein Versuchsplan dann, wenn für die Faktorstufen jedes beliebigen Faktors die Einstellungen der anderen Faktoren gleichmäßig aufgeteilt sind“ (vgl. [55], S.7). Um dies zu erreichen, muss die Auswertung aller Wechselwirkungen höherer Ordnung gestrichen werden (z.B. die Wechselwirkung zwischen drei unabhängigen Einflussfaktoren). Die Schätzung der einfachen Wechselwirkungen zwischen Einflussfaktoren und Zielgröße sowie zwischen jeweils zwei Einflussfaktoren ist jedoch möglich.

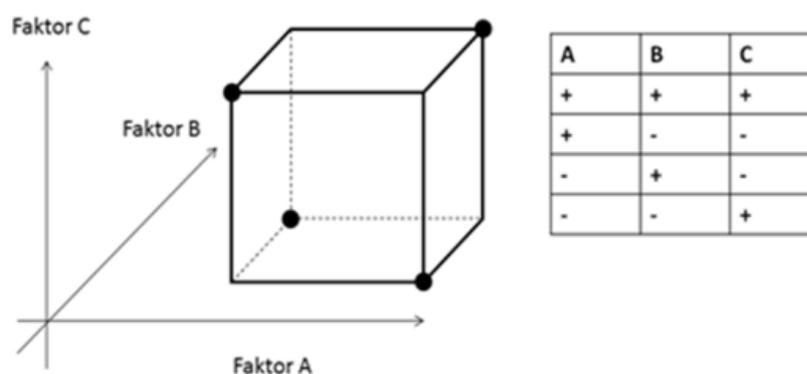


Abbildung 61: Teilfaktorielle Versuchsplanung

Abbildung 61 beschreibt die teilfaktorielle Versuchsplanung anhand einer grafischen Darstellung der reduzierten Auswahl an Faktorkombinationen. Die Ecken des Würfels repräsentieren den vollfaktoriellen Versuchsplan, sprich alle möglichen Kombinationsmöglichkeiten. Die kleine Tabelle in Abbildung 61 zeigt die Faktorkombinationen pro Experiment, hier in jeweils zwei Stufen (+ und -) und in geordneter Reihenfolge.

Die bei der Untersuchung des Pulsgenerators berücksichtigten Parameter sowie deren beidseitigen Grenzwerte sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Parameter	Pulsamplitude A	Toolspannung T	Pulsdauer P	Puls-Pause-Verhältnis ppr	Strom durch die Gegenelektrode I	NaOH Konzentration c	Elektrodenabstand zum Werkstück
Einheit	[mV]	[mV]	[ns]	-	[mA]	[M]	[mm]
Obere/untere Grenze	2000 / 6000	-300 / -100	100 / 400	6 / 12	100 / 1500	1 / 3	0 / 2

Tabelle 18: Parameterbereiche bei der Überprüfung des Pulsgenerators

Daraus ergab sich ein Versuchsplan mit 128 Parametersätzen, womit folgende Pulseigenschaften untersucht wurden:

- Überprüfung der Pulsweite und des Pulse-Pause-Verhältnisses
- Auswirkung des Stromes durch die Gegenelektrode auf den Pulsverlauf
- Auswirkung des Abstandes zwischen Anode und Kathode auf den Pulsverlauf
- Leistungsgrenzen bei geringer Pulsweite – erreichbare Spannungsamplituden
- Auswirkung der Elektrolyt-Konzentration auf den Pulsverlauf
- Die sich ergebenden Zeitkonstanten des elektrochemischen RC-Systems
- Die vom Spannungspuls übertragene, elektrische Energie

Um diese Eigenschaften untersuchen zu können, wurden ausreichend lange Spannungssignale aufgezeichnet (mehrere Sekunden), anschließend auf die zu untersuchende Länge von zwei Spannungspulsen gekürzt und ausgewertet.

6.4.3 Ergebnisse der Pulsuntersuchung

Wie in Kapitel 3.4 detailliert beschrieben wurde, kann das System zwischen den beiden Elektroden als elektrisches Ersatzmodell bestehend aus zwei Kondensatoren und einem Widerstand beschrieben werden. In diesem Modell werden die an den Grenzflächen zwischen Elektrolyten und Elektrode entstehenden elektrochemischen Doppelschichten durch Kondensatoren (C) und der Elektrolyt dazwischen durch einen elektrischen Widerstand (R) ersetzt. Die Ladungskurve eines solchen RC-Gliedes kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$u_{(t)} = U_{max} * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (12)$$

Durch die Auswertung der vom Generator erzeugten Spannungspulse konnte gezeigt werden, dass der Generator bei kurzer Pulsdauer nicht mehr in der Lage ist, die gewünschte Spannungsamplitude zu erzeugen. Abbildung 62 zeigt einen Pulsverlauf, bei dem die Amplitude von 6 V annähernd erreicht werden konnte. Die Pulsdauer lag hier bei ca. 400 ns bei einem Puls-Pause-Verhältnis von 6.

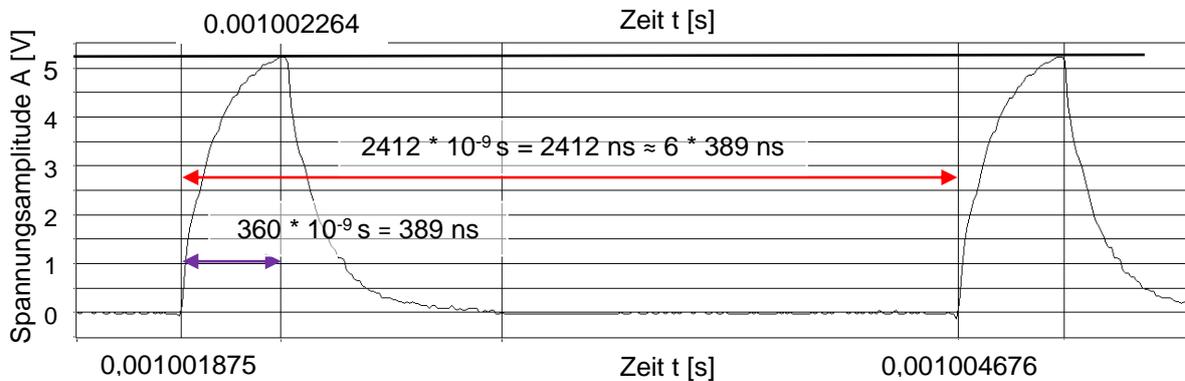


Abbildung 62: Spannungssignal des Pulsgenerators

Die Zeitkonstante τ ist ein Maß für die Steigung der Sprungantwort und damit, bei konstantem Strom, für die investierte Energie. Die Zeitkonstante kann durch Umformen von Formel (12) berechnet werden:

$$\tau = -\frac{t}{\log\left(1 - \frac{u(t)}{U_{max}}\right)} \quad (13)$$

Die Pulsenergie kann über die elektrische Leistung und die Pulsweite (PW) berechnet werden. Da keine externe Möglichkeit zur Messung des Stroms vorhanden war und die Stromregelung des Systems auf einer galvanostatischen Messung basiert, wurde er als konstant angenommen. Daraus ergibt sich folgende Formel für die Pulsenergie:

$$E_p = i * \int_0^{PW} U_{(t)} * dt \quad (14)$$

Die Auswertung der Parametervariation (DOE) wurde mit der Statistiksoftware Minitab durchgeführt. Durch deren integrierten Softwaremodule ist es möglich, die Effekte und Wechselwirkungen der Prozessparameter auf definierte Zielparameter zu berechnen. Als Zielgrößen wurden einerseits die Zeitkonstante τ der Ladekurve des Ersatzkondensators und das Verhältnis aus realer und idealer Pulsenergie untersucht (im Weiteren als Pulsenergieverhältnis bezeichnet, siehe Formel 15), wobei im Sinne eines guten Ansprechverhaltens des Pulsgenerators die Zeitkonstante minimiert und das Pulsenergieverhältnis maximiert werden sollen.

$$PEV = \frac{E_{p_real}}{E_{p_ideal}} \quad (15)$$

Bei einem Elektrodenabstand von 2 mm betrug die Zeitkonstante im Durchschnitt 302 ns, beim Arbeitsabstand $< 0,05$ mm hingegen 641 ns. Nun steigt üblicherweise der elektrische Widerstand und damit die Zeitkonstante proportional zum Abstand zwischen den Elektroden an, in diesem Fall ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei einem Abstand von 2 mm kein elektrochemischer Abtrag stattfindet und damit keine Prozessenergie eingebracht wird.

Über alle 128 Parametersätze wurde eine maximale Zeitkonstante von 995 ns und eine minimale von 93 ns gemessen. Das Pulsenergieverhältnis bei einem Elektrodenabstand von 2 mm betrug im Durchschnitt 48,3%, bei einem Bearbeitungsabstand $< 0,05$ mm hingegen 32,5 %. Das maximale Pulsenergieverhältnis über alle Messungen betrug 88,7 %, das minimale Verhältnis 9,6 %. Da sich bei der Bearbeitung ein sehr geringer, von der Pulsdauer abhängiger Abstand im Mikrometerbereich einstellt, wurde nur der geringere Bearbeitungsabstand zur weiteren Untersuchung herangezogen. Abbildung 63 zeigt die Effekte und Wechselwirkungseffekte der Prozessparameter auf die Zeitkonstante nach dem Ausschließen von nicht signifikanten Effekten. Die rote Linie signalisiert die Signifikanzgrenze; jene Werte deren Balken nach rechts darüber hinausragen gelten als signifikant. Das Ausschließen der Effekte erfolgt durch das Anwenden folgender Regeln (vgl. [56], S. 277):

- Jede nicht-signifikante Zweifach-Wechselwirkung ausschließen
- Jeden nicht-signifikanten Haupteffekt ausschließen, der nicht in einer signifikanten Zweifach-Wechselwirkung enthalten ist

Größten Effekt übt demnach die Elektrolytkonzentration auf die Zeitkonstante aus, gefolgt von der Pulsamplitude und der Pulsdauer.

Abbildung 64 zeigt die Effekte und Wechselwirkungseffekte der Prozessparameter auf das Pulsenergieverhältnis nach Ausschluss der nicht signifikanten Effekte. Dabei hat die Pulsdauer den mit Abstand stärksten Effekt auf das Pulsenergieverhältnis und bestätigt damit, dass der Pulsgenerator bei längeren Pulsdauern besser in der Lage ist, die vorgegebene Pulsamplitude zu erreichen.

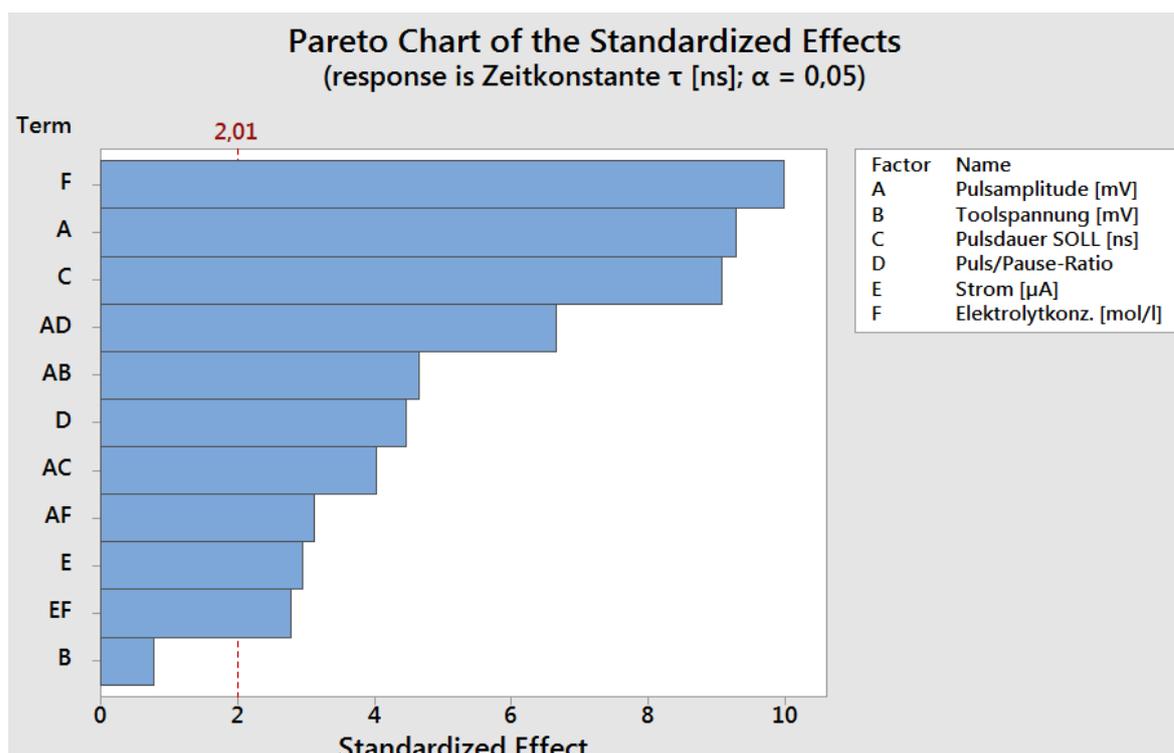


Abbildung 63: Standardisierte Effekte der ausgewählten Einflussgrößen auf die Zeitkonstante τ des generierten Spannungs-Pulses (Pareto-Diagramm)

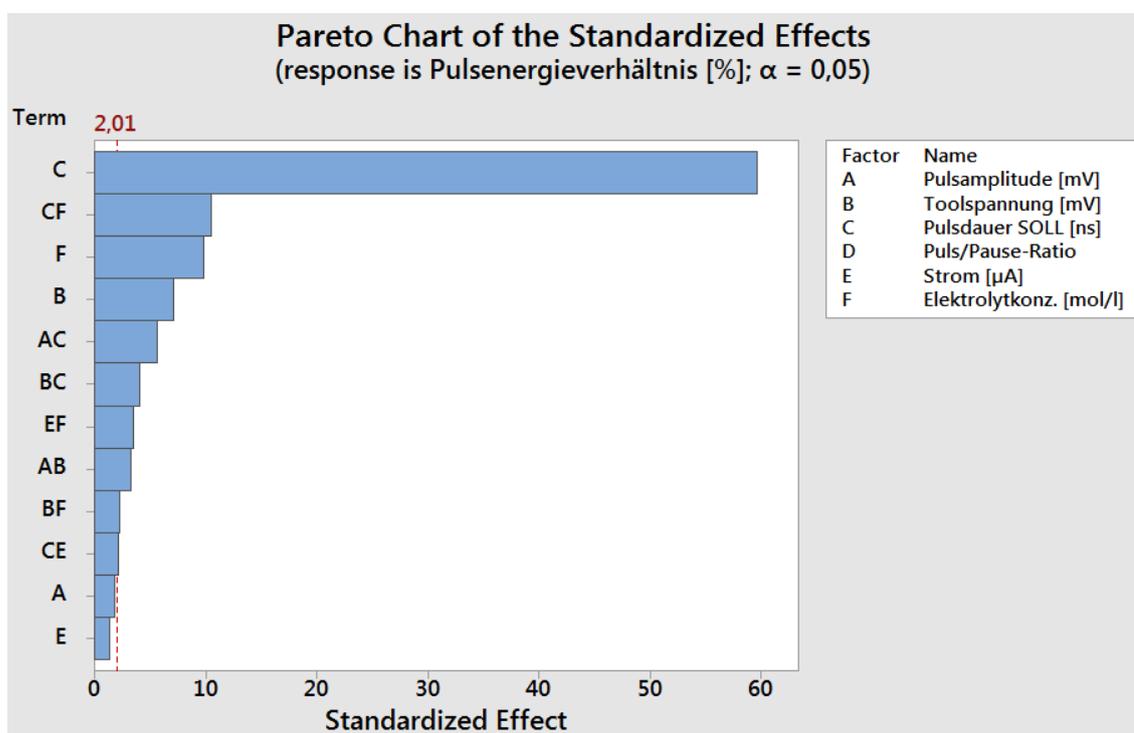


Abbildung 64: Standardisierte Effekte der ausgewählten Einflussgrößen auf das Pulsenergieverhältnis des generierten Spannungs-Pulses (Pareto-Diagramm)

Im nächsten Schritt wurden die Haupteffekte und deren Einflüsse auf die beiden Zielgrößen genauer untersucht (siehe Abbildung 65). Wie bereits im Pareto-Diagramm (Abbildung 63) gezeigt, haben die Pulsamplitude, die Pulsdauer und die

Elektrolytkonzentration den größten Einfluss auf die Größe der Zeitkonstante. Die Auswertung der Haupteffekte beschreibt aber auch die Richtung, in welche die Parameter verändert werden sollten, um eine möglichst kleine Zeitkonstante zu erreichen. Beispielsweise kann Abbildung 65 so interpretiert werden, dass eine Reduktion der Pulsamplitude und Elektrolytkonzentration bei gleichzeitiger Erhöhung der Pulsdauer zu einer kleinen Zeitkonstante führen.

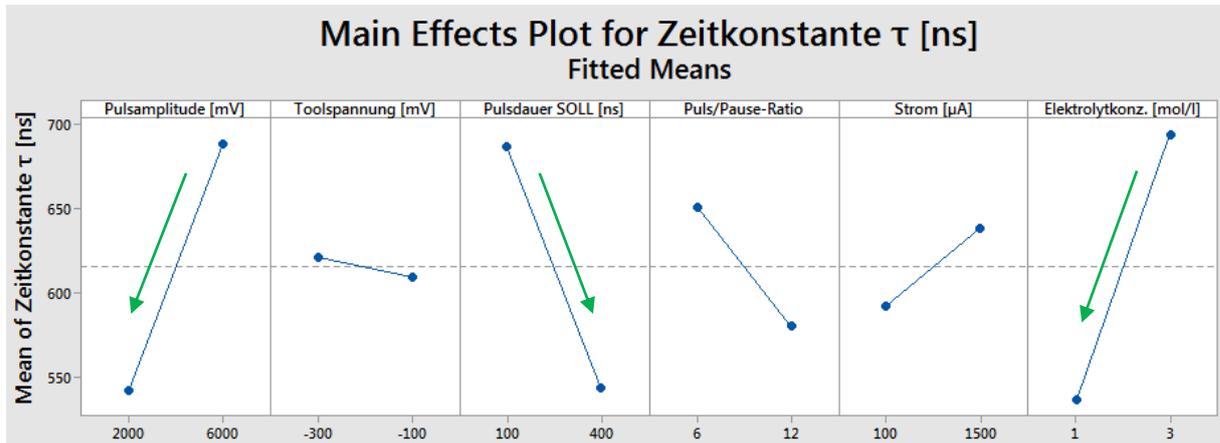


Abbildung 65: Haupteffekte der Prozessparameter auf die Zeitkonstante τ

Abbildung 66 zeigt die gleiche Auswertung für das Pulsenergieverhältnis. Hier ist zu sehen, dass die Pulsdauer erhöht werden sollte um ein möglichst großes Pulsenergieverhältnis zu erhalten. Flache Geraden in der Auswertung der Haupteffekte deuten darauf hin, dass eine Änderung der betroffenen Parameter keine große Auswirkung auf die Zielgröße (hier: das Pulsenergieverhältnis) hat.

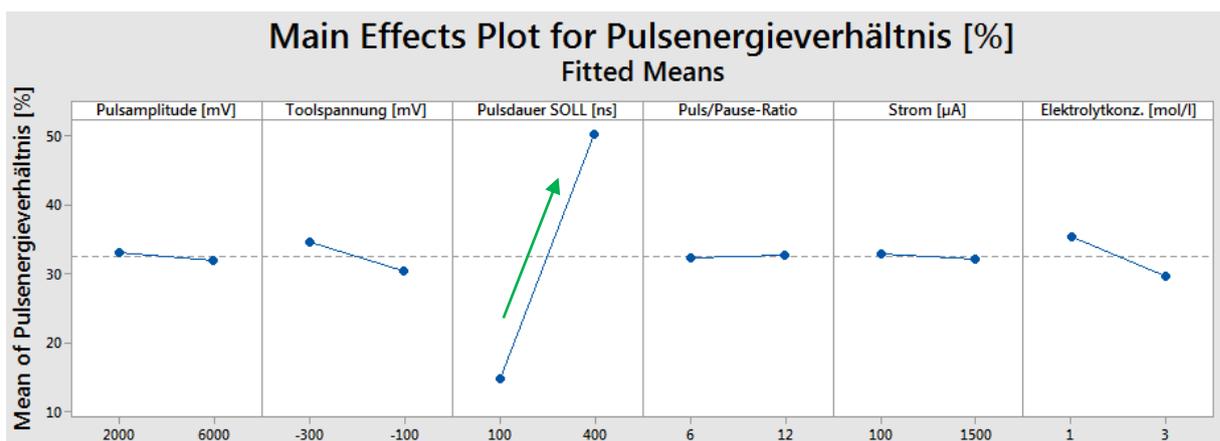
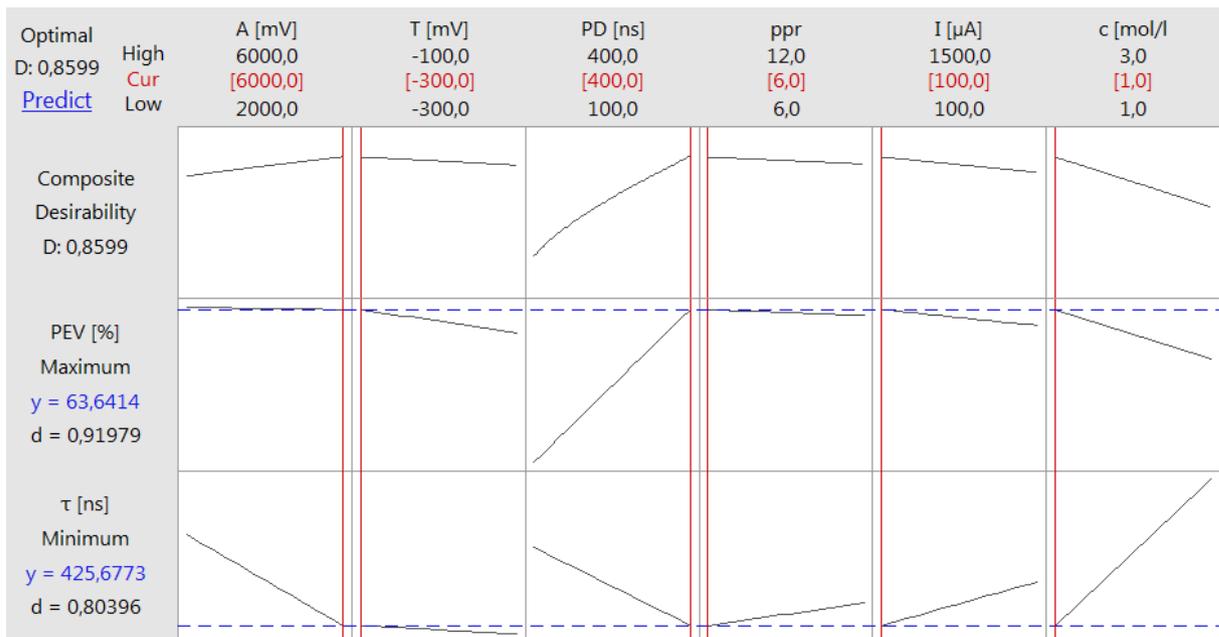


Abbildung 66: Haupteffekte der Prozessparameter auf das Pulsenergieverhältnis

Mit Unterstützung der Software Minitab ist es möglich, eine Optimierung der Parameter unter Vorgabe der gewünschten Zielgrößen durchzuführen. In diesem Fall wurde eine Minimierung der Zeitkonstante bei gleichzeitiger Maximierung des Pulsenergieverhältnisses als Ziel gewählt. Abbildung 67 zeigt das Ergebnis der Auswertung – die erste Zeile zeigt die kombinierte Optimierung, die zweite Zeile jene

des Pulsenergieverhältnisses PEV und die dritte Zeile die Optimierung der Zeitkonstante τ . Die Spaltenüberschriften beinhalten die Abkürzung des Parameters, die beiden Grenzwerte (High und Low) sowie den aktuell eingestellten Wert (Cur). Die drei Grafiken jeder Spalte zeigen die Auswirkung der Änderung des jeweiligen Parameters auf die drei Optimierungsvarianten, dargestellt durch die Steigung der schwarzen Linien in den einzelnen Feldern. Rote Balken zeigen die Auswirkung jener Werte an, die zu einer kombinierten Optimierung führen. Die Zahlenwerte zu den roten Balken sind in der Spaltenüberschrift ebenfalls in rot angegeben (Cur).



A...Pulsamplitude, T...Toolspannung, PD...Pulsdauer, ppr...Pulse/Pause-Verhältnis, I...Strom, c...Stoffmengenkonzentration

Abbildung 67: Optimierungsfunktion für das Pulsenergieverhältnis (PEV) und die Zeitkonstante τ

Um einen optimalen Puls mit großem Pulsenergieverhältnis PEV und kleiner Zeitkonstante τ in dem untersuchten Parameterbereich zu erhalten, sollten der Auswertung entsprechend die Parameter aus Tabelle 19 gewählt werden.

Optimierung	A [mV]	T [mV]	PD [ns]	ppr	I [μ A]	c [mol/l]
Kombinierte Optimierung von PEV und τ	6000	-300	400	6	100	1

Tabelle 19: Parameter gemäß kombinierter Optimierungsfunktion für das Pulsenergieverhältnis PEV und die Zeitkonstante τ

Das prognostizierte Ergebnis des Spannungspulses mit den Parametersatz aus Tabelle 19 wird mit einem Pulsenergieverhältnis von 63,6 % und einer Zeitkonstante von 426 ns angegeben.

Da die Fertigung von sehr kleinen und exakten Konturen in direktem Zusammenhang mit der Pulsdauer steht, kann in der Optimierungsfunktion von Minitab die Pulsdauer auf 100 ns festgehalten werden. Folgende Änderungen der Parameter ergeben sich dadurch:

Optimierung	A [mV]	T [mV]	PD [ns]	ppr	I [μ A]	c [mol/l]
Kombinierte Optimierung von PEV und τ	6000	-300	100 (fest)	6	100	1

Tabelle 20: Parameter gemäß kombinierter Optimierungsfunktion für das Pulsenergieverhältnis PEV und die Zeitkonstante τ bei fester Pulsdauer PD

Das prognostizierte Ergebnis des Pulses mit diesen Parametern wird mit einem Pulsenergieverhältnis von 19,9 % und einer Zeitkonstante von 470 ns angegeben. Daran ist zu erkennen, dass die einzelnen Parameter entgegen gerichtete Effekte auf den Abtragprozess haben können.

Die Überprüfung der Genauigkeit des Puls/Pause-Verhältnisses ergab ein überraschendes Ergebnis: Das maximale ppr beträgt 1:6 bei einer Ist-/Soll-Abweichung von 0,2 %. Bei der Untersuchung der Pulsdauer wurde eine durchschnittliche Abweichung der tatsächlichen zur eingestellten Pulsdauer von -14 % festgestellt.

Zusammenfassend konnte bei den Versuchen festgestellt werden, dass die vom Hersteller angegebenen Leistungsspezifikationen bei Einsatz eines NaOH-Elektrolyten mit einer Konzentration von 1 – 3 mol/l bei kurzen Spannungspulsen im Bereich von 100 ns nicht erreicht werden.

7 Zielsetzung der praktischen Experimente

Um die ständig steigenden Anforderungen an Industrie- und Konsumgüter an ihren jeweiligen Anwendungsbereich zu erfüllen, ist das Funktionalisieren von Material- und Bauteiloberflächen Ziel aktueller Forschung. Das bedeutet, dass optische, physikalische oder chemische Oberflächeneigenschaften entsprechend verändert werden müssen ohne die geometrische Form und die ursprüngliche Funktion des Bauteils negativ zu beeinflussen. Dies kann dazu führen, dass nachträgliche Verarbeitungsschritte wie Lackieren oder Beschichten nicht mehr notwendig sind und dadurch Kosten und Ressourcen gespart werden können. Eine dieser physikalischen Oberflächeneigenschaften ist die Hydrophobie, also der Grad der Wasseraufnahme bzw. Wasserabstoßung einer Oberfläche. In diesem Kapitel wird diese Eigenschaft sowie deren Messmethoden näher beschrieben und auf aktuelle Forschungsergebnisse zur Erzeugung von wasserabweisenden Oberflächenstrukturen eingegangen. Abschließend werden Zielgeometrien festgelegt, deren praktische Umsetzung in den nachfolgenden Kapiteln geschildert wird.

7.1 Hydrophobie

Eine hydrophobe Struktur/Textur besitzt die Eigenschaft Wasser abzuweisen („hydro“ altgr. für „Wasser“, „phobos“ altgr. für „Furcht“). In der Natur gibt es zahlreiche Beispiele für die Ausbildung von hydrophoben Oberflächen, das Bekannteste ist bestimmt das Lotusblatt. Wie in vielen anderen Fällen versucht der Mensch diese von der Natur stark spezialisierte Eigenschaft zu kopieren, um sie in technischen Anwendungen für die Optimierung bestehender oder die Entwicklung neuer Systeme einzusetzen. Die Anwendungsbereiche dafür sind vielfältig, z.B. regenabweisende Kleidung, Anti-Schnee-Oberflächen oder Antihaft-Negativformen für Spritzgussbauteile aus Kunststoff (vgl. [57], S. 1). Um die Ausprägung der hydrophoben Eigenschaft unterscheiden zu können, wurde von Young ein optisches Verfahren entwickelt, welches den sog. Wasserkontaktwinkel als Qualitätsmerkmal vorschlägt (vgl. [58]). Die Messung des tatsächlichen Wasserkontaktwinkels ist bei rauen Oberflächen in der Praxis oft schwierig. Daher wird mit optischen Verfahren meist nur der sogenannte scheinbare Kontaktwinkel zwischen ideal glatter Oberfläche und der ersten Wassertropfentangente gemessen (vgl. [59], S.6). Ist der Wasserkontaktwinkel größer als 90° , spricht man von einer hydrophoben Oberfläche (vgl. [60], S. 1). Als superhydrophob bezeichnet man Oberflächen, die einen Wasserkontaktwinkel von über 150° und einen Wasserkippwinkel von unter 10° aufweisen (vgl. [61], S. 1). Unter dem Wasserkippwinkel versteht man den Winkel der hydrophoben Oberfläche zur Horizontalen zum Zeitpunkt des Abgleitens eines Wassertropfens auf dieser Oberfläche (vgl. [61], S. 3).

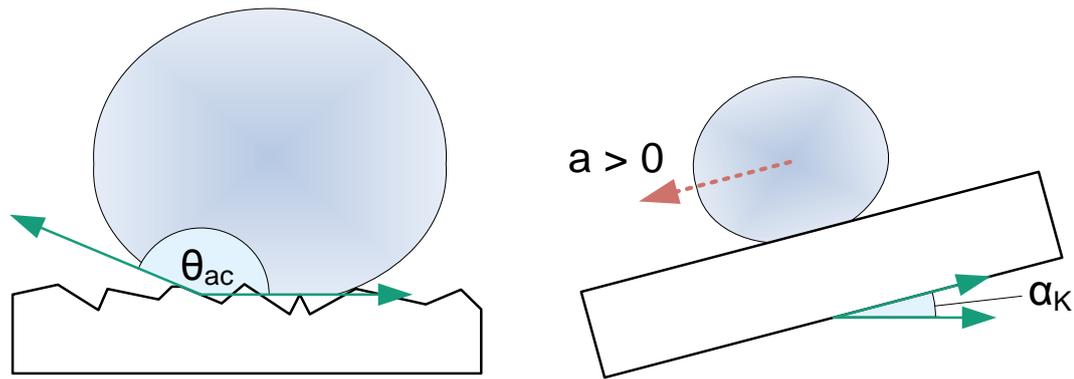


Abbildung 68: Wasserkontaktwinkel θ_{ac} (links) und Beschleunigung $a > 0$ des Wassertropfens nach Erreichen des Wasserkippwinkels α_K (rechts)

7.2 Strategie / Herstellungsverfahren

Die Anforderungen an die Fertigung hydrophober Texturen sind auf Grund der dazu notwendigen Mikrobearbeitung vielfältig. Die Verfahren unterscheiden sich übergeordnet darin, ob damit geometrisch bestimmte oder unbestimmte Texturen erzeugt werden. Erstere können beispielsweise spanend oder auch elektrochemisch erzeugt werden und besitzen den Vorteil, dass ihre Fertigung besser steuer- und reproduzierbar ist. Außerdem können damit einzelne Bereiche eines Werkstückes gezielt und definiert bearbeitet werden. Geometrisch unbestimmte Texturen können entweder durch chemisches Abtragen (z.B. Ätzen), durch elektrochemisches Abscheiden, durch das Sol-Gel-Verfahren, durch Beschichtungs- oder durch lithografische Verfahren hergestellt werden (vgl. [2], S. 1).

Chen et al. erreicht durch elektrolytisches Abscheiden aus einer Nickelchlorid-Myristinsäure-Lösung auf einer Kupferelektrode einen Wasserkontaktwinkel von bis zu 164° und Wasserkippwinkel von unter 2° (vgl. [57]). Dabei werden Blumenkohl ähnliche Nickelkristallstrukturen mit Durchmessern von ca. $10\ \mu\text{m}$ erzeugt. Huang et al. erreicht durch elektrolytisches Abscheiden von Kupferstearaten auf einem Kupfersubstrat Wasserkontaktwinkel von bis zu 155° durch Ausbildung blumenartiger Mikrostrukturen mit einem Durchmesser von 50 bis $100\ \mu\text{m}$ (vgl. [2]). Larmour et al. erreichte sehr große Wasserkontaktwinkel von 173° und Wasserkippwinkel von $0,64^\circ$ durch ein relativ einfaches Verfahren auf Grundlage der galvanischen Abscheidung (vgl. [62]). Dabei wird ein Zink- oder Kupfersubstrat zuerst versilbert bzw. vergoldet und anschließend in einer Lösung eines Oberflächenverbesserers geschwenkt. Die gesamte Prozedur ist stromfrei, woraus sich ein großer Vorteil gegenüber anderen elektrolytischen Verfahren ergibt.

Zhang et al. beschreibt die Herstellung von superhydrophoben Strukturen auf reinem Kupfersubstrat durch Sandstrahlen, anschließende Oxidation in Kaliumperoxodisulfat und Kaliumhydroxid, sowie einer chemischen Nachbehandlung mit Fluoralkylsilan

FAS (vgl. [63]). Dadurch kann ein Wasserkontaktwinkel von 161° bei einem Wasserkippwinkel von 1° erreicht werden.

Durch den Einsatz von spanenden Fertigungsverfahren zur Mikrostrukturierung von Oberflächen stößt man rasch an deren Grenzen. Durch sinkende Werkzeugdurchmesser steigen die erforderlichen Drehzahlen und damit verbunden die mechanischen Anforderungen an die Werkzeugmaschine. Übliche Mikrowerkzeuge erreichen Durchmesser von 50 bis 300 μm und benötigen Bearbeitungsdrehzahlen von über 50.000 min^{-1} (vgl. [64], S. 2). Mit den durch spanende Mikrobearbeitung auf Metall erzeugten Texturen in der Größenordnung von 100 μm können Wasserkontaktwinkel von bis zu 129° erreicht werden (vgl. [65]).

Durch elektrochemisches Abtragen konnten bereits hydrophobe Strukturen im Mikrometerbereich erzeugt werden (vgl. [18]). Xu et al. beschreibt die elektrochemische Fertigung einer superhydrophoben Oberfläche auf einer Aluminiumanode unter Verwendung von NaNO_3 als Elektrolyten und einer Kupferplatte als Kathode (vgl. [60]). Unter besonderer Betrachtung der Prozesszeit und des Prozessstromes konnte ein Wasserkontaktwinkel von 166° bei einem Kippwinkel von $1,5^\circ$ erzielt werden. Kwon et al. erkannte, dass die Oberflächenrauheit des grundsätzlich hydrophilen Materials wie Stahl eine wesentliche Rolle bei der Ausbildung superhydrophoben Eigenschaften spielt (vgl. [2]). Um diese Eigenschaften zu erreichen, erzeugte er zuerst durch Laserabtrag ein säulenartiges Mikromuster unter Variation des Gitterabstandes, welches anschließend mit isolierendem Material aufgefüllt und poliert wurde. Durch optimiertes elektrophoretisches Abscheiden von Kupfer auf der so erzeugten glatten Oberfläche und Auswaschen der Isolationsschicht konnten Wasserkontaktwinkel von 153° erzielt werden.

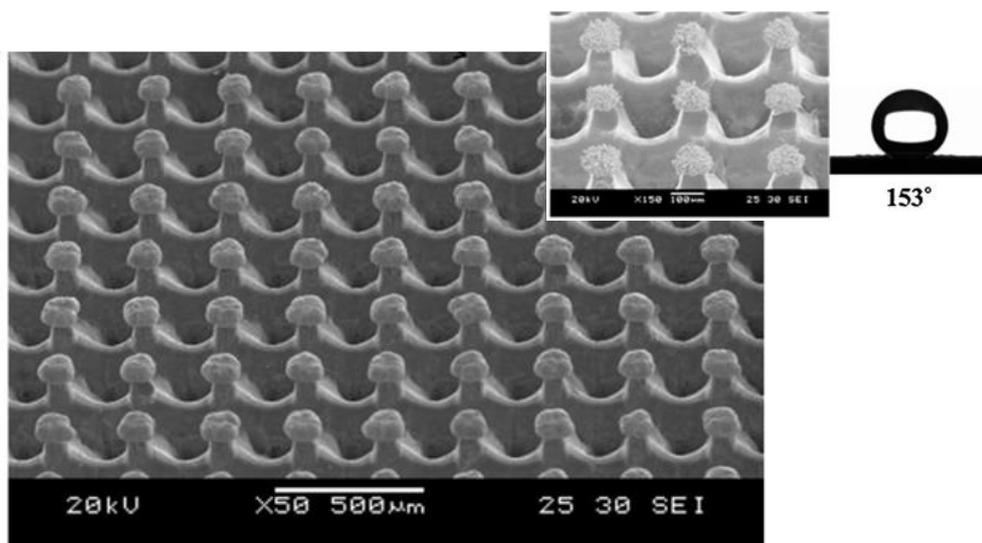


Abbildung 69: Durch Laserabtrag und anschließende elektrochemische Abscheidung von Kupfer erzeugtes Mikropolsterfeld (vgl. [2], S. 4ff.)

8 Werkzeugformen (Tooling)

Nach der Auswahl der Zielgeometrien folgte die praktische Umsetzung unter Einsatz des maschineninternen, umgepolten μ PECM-Verfahrens. Die Software bietet zwei vordefinierte Werkzeugbearbeitungsbefehle an, G500 (= „Tooling A“) zur Verwendung in Kombination mit dem Toolingbecken (Abbildung 70) und G501 (= „Tooling B“) zum Werkzeugabtrag an einem quaderförmigen Werkstück.

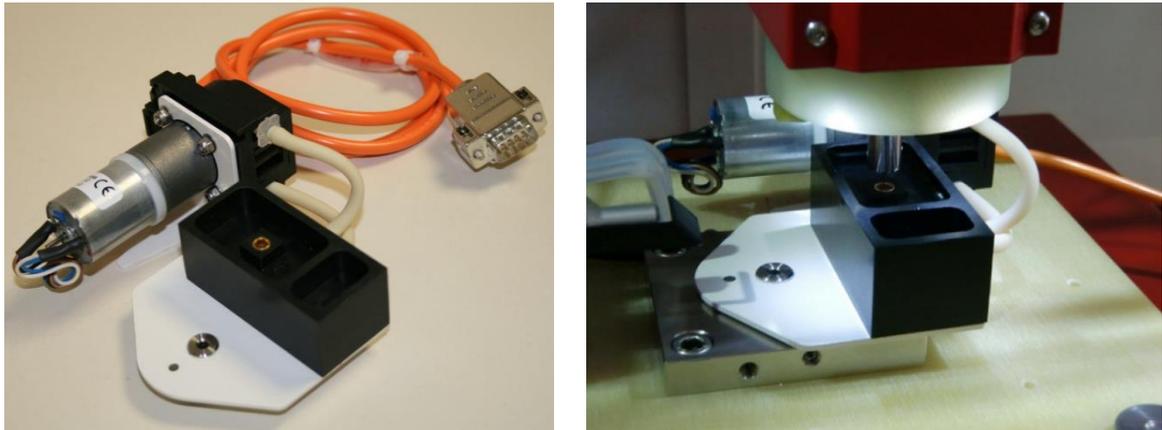


Abbildung 70: Das Toolingbecken zur Herstellung von zylindrischen Werkzeugen

Da die Implementierung dieser vordefinierten Befehle in den Unterlagen nicht ausreichend beschrieben wurde und es bei der Ausführung zu unerklärlichen Werkzeugbewegungen und damit zu erhöhter Kollisionsgefahr kam wurden die Versuche mit dem Toolingbecken abgebrochen. Aus diesem Grund wurde ein zylindrisches Bearbeitungsbecken aus PTFE verwendet. In dem Becken wurde eine kontaktierte quaderförmige Abrichtplatte aus Wolfram eingesetzt, um an deren Kanten die Werkzeugelektrode zu formen (vgl. Abbildung 26).

Die im Text erwähnten Versuchsnummern und die damit verknüpften Parametersätze finden sich in Anhang I (Seite 140ff.).

8.1 Versuchsaufbau

Als Werkzeugelektrode, welche im Fall des Werkzeugherstellens zur positiven Anode wird, wurden zylindrische Wolframdrähte (Reinheit: 99,95%) mit 0,5 mm oder 1 mm Durchmesser gewählt. Da das benötigte Elektrodenmaterial üblicherweise nur in größeren Längen als Draht erhältlich ist, musste es vor dem Einspannen auf ca. 40 mm abgelängt werden. Wird dazu ein Seitenschneider benutzt, entstehen meist Risse (sog. Spliss) entlang der Drahtachse, sowie ein gequetschtes Ende. Ein Drahtseilschneider lieferte deutlich bessere Ergebnisse. Nach dem Ablängen wurden die Elektroden in die Spannzange eingelegt und über die Zugschraube festgeklemmt. Als Gegenelektrode diente ein Edelstahldraht, welcher an einem Ende mit dem

Potentiostaten verbunden und am anderen Ende in das zylindrische Bearbeitungsbecken getaucht wurde.

Als kathodisches Werkstück, der sog. Abrichtplatte, kam ein geschliffenes Wolframplättchen (Reinheit: 99,95%) mit den Maßen 20 x 20 x 3 mm zum Einsatz. Dieses wurde über zwei Schrauben mit Linsenkopf auf die Kontaktplatte im Bearbeitungsbecken geklemmt. Im Falle der Versuche zur Zylindererzeugung wurde ein quaderförmiges Plättchen gewählt, im Falle der Kegel- und Pyramidenerzeugung ein winkelig angeschliffenes Plättchen. Der Winkel ergab sich aus forschungsbezogenen Anforderungen an die mit dem Werkzeug später zu erzeugenden hydrophoben Strukturen. Für die ersten Versuche wurde ein Winkel von 15° gewählt, welcher einem Durchmesser-/Höhenverhältnis von 1:1 und einem Kegel- oder Pyramiden-Öffnungswinkel von 30° entspricht (siehe Abbildung 71).

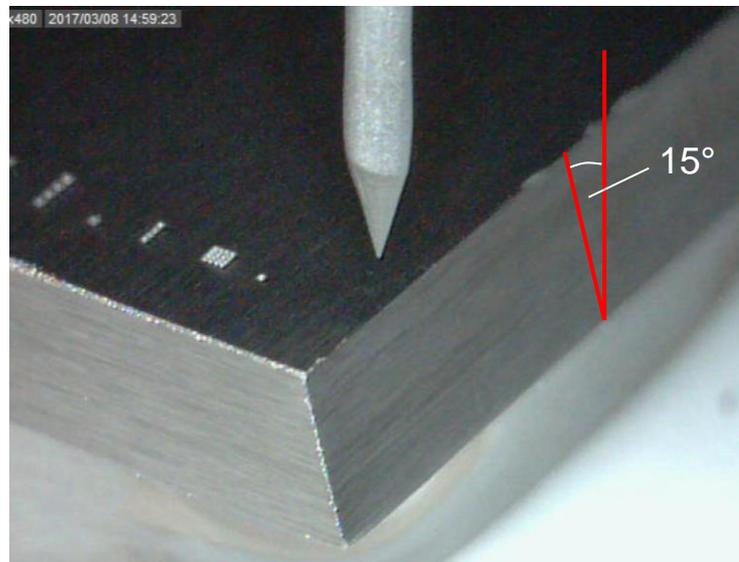


Abbildung 71: Kegelherstellung mit 30° Öffnungswinkel an der abgewinkelten Abrichtplatte aus Wolfram

Als Elektrolyt wurden wässrige Natriumhydroxid-Lösungen mit Konzentrationen von 1 bis 3 Mol pro Liter (3 M) verwendet. Dieser Elektrolyt eignet sich sehr gut zur Bearbeitung der Materialkombination Wolfram/Wolfram und birgt ein geringeres Sicherheitsrisiko für Mensch und Umwelt als vergleichsweise Salzsäure oder Flusssäure. Eine Anleitung zur Herstellung von Elektrolytlösungen ist Anhang II (Seite 142ff.) zu entnehmen.

8.2 Versuchsdurchführung

Die durchgeführten Experimente dienten einerseits der Erzeugung zylindrischer Werkzeugelektroden mit stark reduziertem Durchmesser, andererseits der Erzeugung von Mikro-Werkzeugen mit großem Aspektverhältnis. Das Aspektverhältnis ist definiert als das Verhältnis von Länge zu Durchmesser und ist

bei herkömmlichen spanenden Werkzeugen, wie z.B. Bohrern, üblicherweise < 3 . Oft werden für kleine, jedoch tiefe Bohrungen (z.B. Kühlbohrungen) größere Aspektverhältnisse benötigt.

Bei der Durchführung der Versuche wurde ersichtlich, dass formgenaue Ergebnisse nur unter optimaler Wahl der zahlreichen Parameter zu erreichen sind. Neben der Optimierung der Prozessparameter stellt die geometrische Anordnung des Werkstückes zum Werkzeug ein weiteres wichtiges Kriterium zur Reproduzierbarkeit dar. Um die gewünschte zylindrische Werkzeugform zu erzeugen, wurde die anodische Werkzeugelektrode in Rotation versetzt. Bei rotatorischer Bearbeitung muss sichergestellt werden, dass die Werkstückkante möglichst glattgeschliffen und parallel zur Drehachse des Werkzeuges positioniert wird. Eine leichte Verkippung kann zu Kerben im bearbeiteten Bereich des Werkzeuges führen, die dann in weiterer Folge zu einer immer tieferen Verjüngung und zur Abtrennung von Teilen der Werkzeugspitze führen können. Neben der Präparation des Werkstückes muss auch auf die möglichst rotationssymmetrische Einspannung des Werkzeuges geachtet werden. Da das Werkzeug stets einen Einspannfehler besitzt und daher am unteren Ende elliptische Bewegungen vollzieht (einen sog. Wobbel), muss der Durchmesser der Elektrode stets um mindestens diese Abweichung reduziert werden, um eine Zylinderform zu erhalten. Dies erfordert eine visuelle Kontrolle mittels Mikroskopkamera im eingespannten Zustand bei rotierender Spindel.

Nach mehreren Versuchsreihen wurde ersichtlich, dass die Einspannung ein wesentlicher Erfolgs-Faktor der Durchmesserreduktion ist. Eine koaxiale Einspannung wird durch eine gereinigte Spannzange und eine leichte Drehbewegung der Elektrode beim Festziehen der Spannschraube begünstigt. Wird die Spannschraube zu festgezogen, bewirkt dies eine einseitige Klemmung und führt zu einer ungewollten Winkelstellung der Elektrode.

Bei den Versuchen zur Durchmesserreduktion wurde darauf geachtet, dass während der Bearbeitung möglichst wenige elektrische Kontakte zwischen Anode und Kathode auftraten, da diese die Abtraggeschwindigkeit und eine exakte Formgebung negativ beeinflussten. Um eine große Bandbreite an Parametersätzen testen zu können, wurde der Vorschub über das Schrittkrement so variiert, dass kaum Kontaktschlüsse auftraten.

Auch die Fertigung von Werkzeugen mit Kegelspitze setzt eine rotierende Spindel voraus. Im Unterschied zum Versuchsaufbau bei der Durchmesserreduktion werden bei der Herstellung von Kegelspitzen keine quaderförmigen Gegenstücke, sondern winkelig geschliffene Abrichtplättchen verwendet. Die ersten Experimente wurden unter einem Winkel von 15° durchgeführt, was einem Kegelöffnungswinkel von 30° entspricht.

Um pyramidenförmige Elektrodenspitzen zu erzeugen wird ebenfalls ein winkelig geschliffenes Abrichtwerkstück benötigt. Hier rotiert das Werkzeug jedoch nicht, sondern wird in 90°-Winkelschritten geradlinig gegen das Abrichtplättchen geführt und dabei abgetragen. Eine besondere Schwierigkeit beim Zuspitzen der Pyramide stellt die Bearbeitung der vierten Seitenfläche dar. Eine zu geringe oder zu weite Zustellung führt unweigerlich zu einer Keilform.

Zum groben und raschen Abtragen größerer Materialvolumina wurde ein Parametersatz mit langer Pulsdauer und großer Spannungsamplitude verwendet. Um daraus anschließend feine und scharfkantige Werkzeuge zu erzeugen, wurden Pulsdauer und Spannungsamplitude deutlich reduziert. Eine solche Reduktion führt dazu, dass nur noch geringe Vorschübe möglich sind. Um bei der Feinbearbeitung Zeit zu sparen, sollten die gewünschten Werkzeugformen bereits beim groben Abtragen ausreichend vorgeformt werden.

Neben den drei bereits genannten Werkzeuggeometrien, die eine Positivform auf einem Werkzeug erzeugen, welche anschließend als Negativform am Werkstück abgebildet werden kann, wurde auch die Herstellung von negativen Werkzeugformen untersucht. Darunter wird ein Werkzeug verstanden, welches nach einem Senkprozess in ein Werkstück, direkt eine funktionalisierte Oberfläche hinterlässt. Hierzu zählt beispielsweise die Werkzeugform des Keils, die nach zweifachem Senkprozess in gekreuzter Anordnung (0° und 90°) ein Feld von Pyramidenstrukturen mit potentiell hydrophoben Eigenschaften hinterlässt.

Vorteil eines keilförmigen Werkzeuges ist, dass lange Bahnen in einem Senkvorgang gefertigt werden können. Dieses Vorgehen beschleunigt die Strukturierung von größeren Oberflächen maßgeblich.

8.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird auf die Ergebnisse der Werkzeuggenerierung von Zylinder-, Kegel-, Pyramiden- und Keilform eingegangen. Die erzeugten Werkzeuggeometrien wurden am Digitalmikroskop Keyence VW-9000 untersucht und fototechnisch dokumentiert. Daneben wurden aus den präzisen Aufnahmen des 3D-Oberflächenmessgerätes Alicona InfiniteFocus 3D-Modelle generiert. Diese Modelle wurden schichtweise auf deren Formtreue, z.B. durch Messung des Spitzenwinkels oder der Kantenverrundung, untersucht.

8.3.1 Zylinderherstellung

Im Zuge der ersten Experimente zur Durchmesserreduktion der Zylinderelektrode konnten Werkzeugdurchmesser von ca. 20 µm bei einer Länge von ca. 600 µm erreicht werden. Ausgangsmaterial der Werkzeugherzeugung war ein Draht aus

reinem Wolfram mit 0,5 mm Durchmesser. Abbildung 72 zeigt erzeugte Elektrodenform die mit den Prozessparametern des Versuchs Nummer 65 hergestellt wurde. Erkennbar ist darauf eine geringe Exzentrizität auf Grund von Ungenauigkeiten im Spannsystem. Die Aufnahme entstand am Digitalmikroskop Keyence VW-9000 bei 200-facher Vergrößerung.

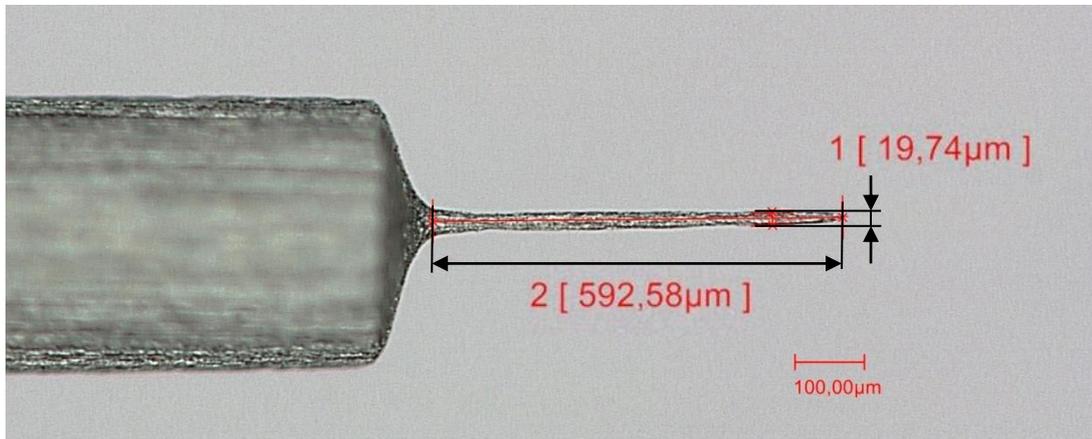


Abbildung 72: Ergebnis der Durchmesserreduktion (Versuch Nr. 65)

Es stellte sich heraus, dass mit sinkendem Werkzeugdurchmesser auch die Spannungsamplitude und die Pulsdauer reduziert werden mussten, um das gänzliche Auflösen der Werkzeugelektrode zu verhindern. Grund für die Formabweichungen der im Durchmesser reduzierten Mikro-Elektrode war die beim Schleifen der Seitenflächen des Abrichtplättchens erzeugte, gewellte und geriefte Oberfläche. Daher wurden die Plättchen im Zuge weiterer Experimente an den relevanten Seitenflächen zuerst geläppt und anschließend poliert.

Das Ergebnis der Versuche zur Erzeugung zylindrischer Elektroden mit großem Aspektverhältnis zeigt Abbildung 73. Es gelang eine Elektrode mit 2000 µm Länge und 100 µm Durchmesser herzustellen. Dies entspricht einem Aspektverhältnis von 20.

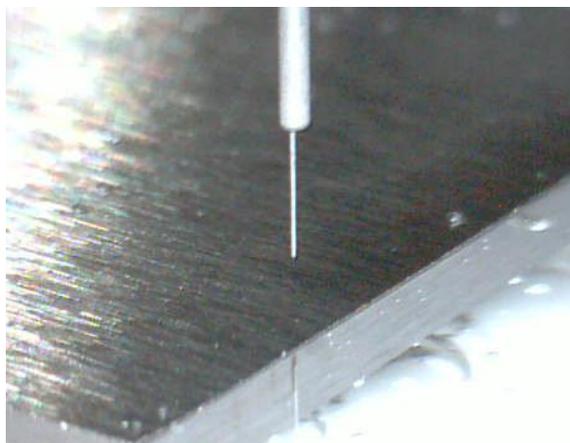


Abbildung 73: Ergebnis der Erzeugung eines Werkzeuges mit großem Aspektverhältnis (Versuch Nr. 70)

8.3.2 Kegelherstellung

Die bereits in Kapitel 6.2 untersuchte geringe Genauigkeit des rotierenden Systems erwies sich als großes Problem bei der Herstellung von kegeligen Werkzeugen. Aus diesem Grund war eine verhältnismäßig große Spitzenverrundung an der Werkzeugelektrode nicht zu verhindern. Ein Spitzenradius von ca. $17\ \mu\text{m}$ konnte nicht unterschritten werden (siehe Abbildung 74).

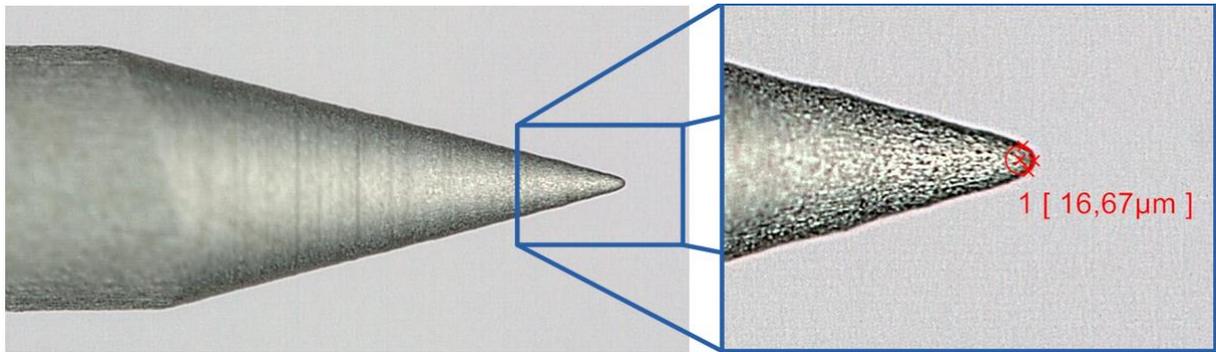


Abbildung 74: Kegelspitze mit einem Radius von $17\ \mu\text{m}$ (Versuch Nr. 111)

8.3.3 Pyramidenherstellung

Die Herangehensweise bei der Erzeugung einer Pyramidenform unterschied sich von jener der Kegelform vor allem dadurch, dass während des Abtragprozesses die Spindel und damit das Werkzeug nicht rotierten. Um die Fehlerquellen zu reduzieren, wurde die spätere Werkzeugelektrode über eine einachsige Kreuztischbewegung kontinuierlich zur Abrichtplatte geführt. Die Ergebnisse der Bearbeitung unterschieden sich durch ihre höhere Präzision deutlich von jenen bei rotierender Spindel. Die mit dem Parametersatz aus Versuch Nr. 93 erzeugte Pyramidenspitze (siehe Abbildung 75) besitzt einen Spitzenradius von lediglich $4\ \mu\text{m}$. Deutlich zu erkennen sind auch hier jene Riefen, die der Schleifprozess an der Abrichtplatte hinterlassen hat und welche beim elektrochemischen Abtragen als Negativform auf das Werkzeug übertragen wurden.

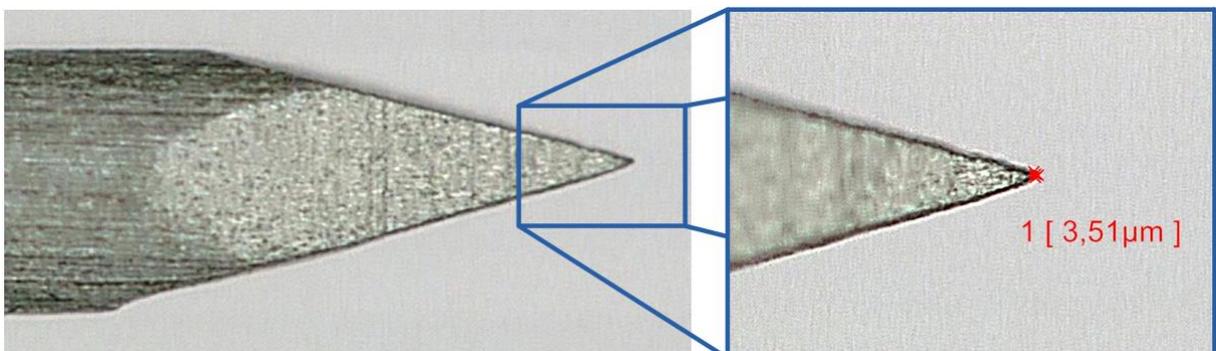


Abbildung 75: Ergebnis der Versuche zur Herstellung einer Pyramidenspitze (Versuch Nr. 93)

8.3.4 Keilherstellung

Die Erzeugung einer Keilgeometrie an der Werkzeugelektrode ergab mit einem durchschnittlichen Kantenradius von $< 2 \mu\text{m}$ die besten Ergebnisse der Versuchsreihe zur Erzeugung von scharfen Kanten. Dies konnte unter anderem dadurch erreicht werden, dass das Werkzeug bei der Herstellung lediglich einmal um 180° gedreht werden musste und der Einfluss des Werkzeugtaumelns dadurch geringer war als bei der Zylinder- oder Pyramidenform. Zusätzlich wirkte die größere Bearbeitungsfläche an der langen Kante der Werkzeugelektrode stabilisierend auf den Abtragprozess. Das sich anfangs einstellende Kufenprofil entlang der Keilkante, konnte durch gezielte Parameteroptimierung auf ein geringes Maß reduziert werden. Der Öffnungswinkel des Keils, welcher in den Versuchen Nr. 117 bis 134 stets 30° betrug, konnte reproduzierbar abgeformt werden (siehe Abbildung 76). Deutlich erkennbar sind die vom Werkstück auf das Werkzeug übertragenen Querriefen, welche wiederum vom Schleifprozess der spanabtragenden Vorbereitung der Plättchen stammen.

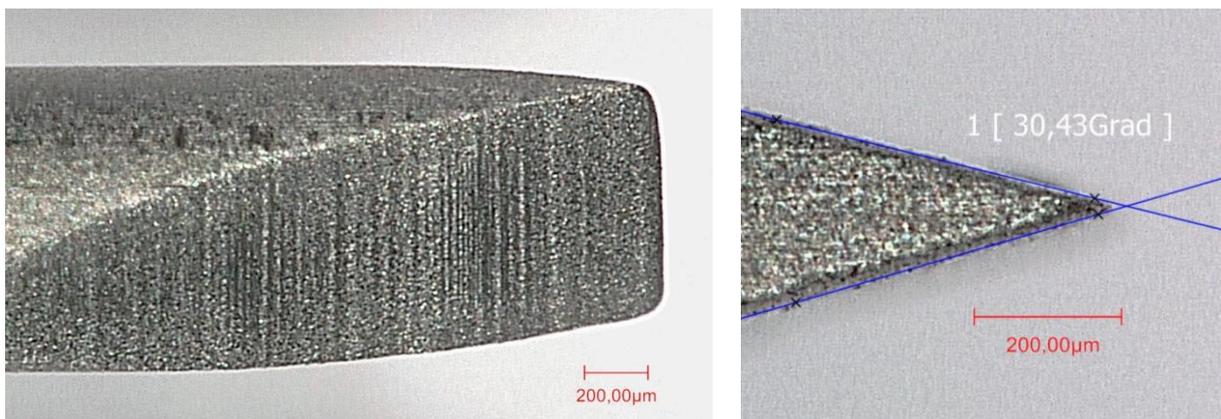


Abbildung 76: Ergebnis der Herstellung eines Werkzeugkeils mit guter Winkelabbildung (Versuch Nr. 133)

Durch eine Nachbearbeitung der geschliffenen Werkstückelektrode mittels Läppen und anschließendes Polieren konnte die Oberflächenrauheit S_a an der ebenen Werkstückoberfläche und der Abrichtkante von 457 nm auf 114 nm reduziert werden (siehe Tabelle 21).

Messgröße	Wolframprobe geschliffen	Wolframprobe geläppt und poliert	Beschreibung
S_a	457,44 nm	114,00 nm	Arithmetischer Mittelwert der Höhen der ausgewählten Fläche
S_q	599,34 nm	143,93 nm	Quadratischer Mittelwert der Höhen der ausgewählten Fläche
S_z	13,23 μm	7,17 μm	Maximale Höhe der ausgewählten Fläche
λ_c	800 μm	800 μm	Grenzwellenlänge

Tabelle 21: Ergebnisse der Rauheitsmessung an geläppten Wolframproben

Die glattere Oberfläche wirkte sich positiv auf die abgeformte Werkzeugoberfläche aus (siehe Abbildung 77 im Vergleich zu Abbildung 76).

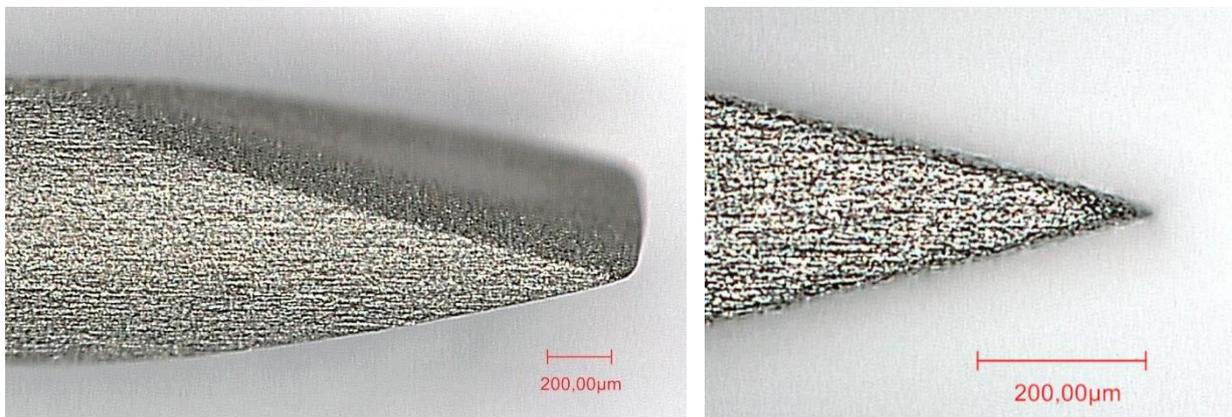


Abbildung 77: Ergebnis der Herstellung eines Werkzeugkeils mit verbesserter Oberflächenrauheit (Versuch Nr. 149)

Zusätzlich zur Bewertung der Qualität des erzeugten Keilwerkzeuges über den erzielten Schneidkantenradius wurde eine Messmethode zur Bewertung anderer, für die Mikrostrukturierung wichtiger Merkmale eingeführt. Die beim Abtragen entstehende Kufenform der Werkzeugschneide trägt entscheidend zur Qualität der damit abgeformten Keilbahnen bei. Da die zu erzeugenden Strukturen eine Eindringtiefe von ca. 20 μm hatten, wurde jener Bereich der Kufe vermessen, der bei dieser Eindringtiefe auf das Werkstück übertragen wird (Abbildung 78, Maß Nr. 3). Zusätzlich dazu ist die Kufenverrundung an beiden Enden des Werkzeugkeils ein Indikator für das Zusammenspiel der gewählten Prozessparameter. Da die Kufenverrundung in den Eckbereichen selten einem Kreisbogen entspricht und der Radius daher nicht bestimmbar ist, wurde sie nicht direkt, sondern über den Abstand zwischen Werkzeugspitze und dem Ende der Verrundung gemessen (Abbildung 78, Maß Nr. 1). Je kleiner diese beiden Werte sind, umso geringer ist die Kufenform der Werkzeugelektrode.

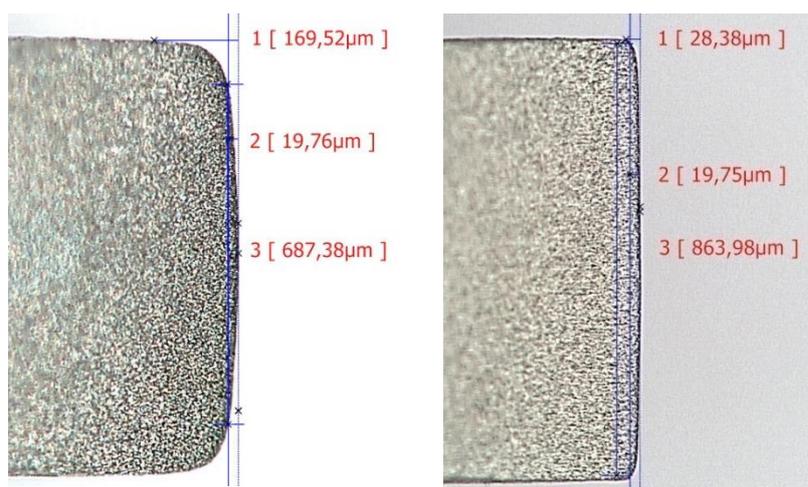


Abbildung 78: Messmethode zur Bewertung der Keilform an der Werkzeugelektrode (links Versuch Nr. 149, rechts Versuch Nr. 161)

Abbildung 78 zeigt zwei unterschiedliche Bearbeitungsergebnisse. Links sind starke Verrundungen zu erkennen, die die praktisch nutzbare Keillänge, welche Kernzone genannt wird, auf einen kleinen Bereich im Zentrum reduziert. Rechts ist eine formtreue Keilkante mit planer Keillinie und großer Kernzone zu erkennen, die durch Optimierung der Bearbeitungsstrategie erzeugt werden konnte. Diese Optimierung bestand darin, die Kontaktfläche beim Abtragen durch Reduktion der Eintauchtiefe (Z-Zustellung) und damit die Überdeckung von Werkzeugelektrode und Abrichtplatte zu reduzieren. Eine Z-Zustellung von 300 - 400 µm bezogen auf die horizontale Oberfläche der Abrichtplatte erwies sich als zielführend.

Versuch Nr.	Verrundungsmaß [µm]	Kernzone [µm]	Kantenverrundung [µm]
149 (links)	169,52	687,38	4,5 µm
161 (rechts)	28,38	863,98	2 µm

Tabelle 22: Spezifische Kennwerte zur Bewertung der Keilqualität

Ein gutes Ergebnis zeichnet sich durch ein möglichst kleines Verrundungsmaß, eine möglichst große Kernzone und einer möglichst kleinen Kantenverrundung aus.

Gerade bei der Erzeugung von Mikrostrukturen ist die Qualität des Werkzeuges ein wesentlicher Faktor, weshalb im Zuge der weiteren Experimente besonderes Augenmerk auf dieses Thema gelegt wurde.

9 Elektrochemische Mikrostrukturierung von Wolframproben

Der Werkstoff Wolfram besitzt sehr gute mechanische und physikalische Eigenschaften, welche ihn für den Einsatz bei der elektrochemischen Bearbeitung prädestinieren. So ist Wolfram besonders widerstandsfähig gegen eine Vielzahl von Chemikalien, die beim ECM-Verfahren Anwendung finden. Zusätzlich zeichnet sich das Material durch seine gute elektrische Leitfähigkeit aus.

In Falle der ersten Bearbeitungsversuche war es von Vorteil, dass das Material von Werkzeug- und Werkstückelektrode identisch war. Dadurch war lediglich eine Umpolung der beiden Elektroden und geringe Anpassung der Prozessparameter notwendig, um einen Abtrag am Werkstück, welches zuvor Abrichtplatte genannt wurde, zu erzeugen. Auch der eingesetzte Elektrolyt konnte, sofern nicht stark verunreinigt, weiterhin verwendet werden.

Bei der Wahl des Elektrolyten sollte auf mögliche (elektro-)chemische Reaktionen in Kombination mit den eingesetzten Elektrodenwerkstoffen geachtet werden. Es könnte zur chemischen Lösung einzelner Elemente und anschließender Bindung an Bestandteile des Elektrolyten kommen oder sich eine Passivschicht ausbilden. Zur elektrochemischen Bearbeitung von Wolfram eignet sich Natriumhydroxid NaOH in wässriger Lösung (= Natronlauge) besonders gut, da es reines Wolfram nicht angreift.

9.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau glich jenem des Tooling-Prozesses (siehe Abbildung 26), da lediglich die elektrische Polarisierung von Werkzeug und Werkstückelektrode gewechselt werden musste. Als Bearbeitungsfläche diente die anfangs nur geschliffene, später geläppte und polierte horizontale Oberfläche des Wolframplättchens mit den Maßen von 20 x 20 x 3 mm (L x B x H).

9.2 Versuchsdurchführung

Eine Herausforderung bei der Versuchsdurchführung war es, die Formen der erzeugten Werkzeuge als Negativform auf das Werkstück zu übertragen bzw. detailgetreu abzuformen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Abbildung der Spitzen und Kanten gelegt und gleichzeitig versucht den Werkzeugverschleiß möglichst gering zu halten. Letzterer tritt vor allem bei großen Stromdichten bzw. langer Pulsdauer auf und kann zu einem raschen Abstumpfen des Werkzeuges führen. Daher wurde anfänglich mit geringen Strömen und kurzer Pulsdauer

abgetragen, was den Prozess deutlich verlangsamte. Die Abtragversuche am Werkstück beschränkten sich in einem ersten Schritt auf den vertikalen Abtragprozess (Z-Richtung) und wurden auf Grund ihres Taumelverhaltens bei statischer A-Achse durchgeführt.

Um den Werkzeugverschleiß zu untersuchen, wurden Werkstück und Werkzeug nach jedem Abtragversuch entnommen und auf deren Formtreue hin untersucht. Hier kamen das Digitalmikroskop Keyence VW-9000 und das 3D-Oberflächenmesssystem Alicona InfiniteFocus zum Einsatz. Wie bereits bei der Werkzeugauswertung wurde auch hier die Möglichkeit genutzt 3D-Schichtmodelle zu erzeugen und zu vermessen. Dadurch konnten die Form des Abtrages sowie die Größenordnung des Verschleißes gemessen und die Prozessparameter dementsprechend angepasst werden.

9.3 Ergebnisse

Die Bearbeitungsergebnisse werden in jene des vertikalen und jene des horizontalen Abtrags unterteilt. Unter vertikaler Bearbeitung wird eine Bearbeitung mittels Bewegung der Z-Achse verstanden, die vergleichbar mit Bohr- und Senkprozessen bei der spanenden Fertigung ist. Bei der horizontalen Bearbeitung wird das Werkstück oder Werkzeug zusätzlich in der XY-Ebene bewegt und damit längliche Geometrien erzeugt.

9.3.1 Vertikales Abtragen mit zylindrischem Werkzeug

Die mit dem in Kapitel 8.3.1 beschriebenen, zylindrischen Werkzeug gefertigten Bohrungen wiesen unterschiedliche Durchmesser von ca. 30 μm und 50 μm auf obwohl identische Bearbeitungsparameter gewählt wurden (siehe Abbildung 79). Die Wiederholung des Versuches zeigte ein ähnliches Ergebnis, jedoch mit zufälliger Verteilung der unterschiedlich großen Bohrungen. Es stellte sich heraus, dass die Software eigenständig zwischen einem vordefinierten Bohrprozess und einer Geradeninterpolation wechselte, deren einziger Unterschied die Vorschubgeschwindigkeit war. Durch die bei der Geradeninterpolation bedingte längere Verweilzeit des Werkzeuges in der Bohrung, wurden größere Durchmesser erzeugt.

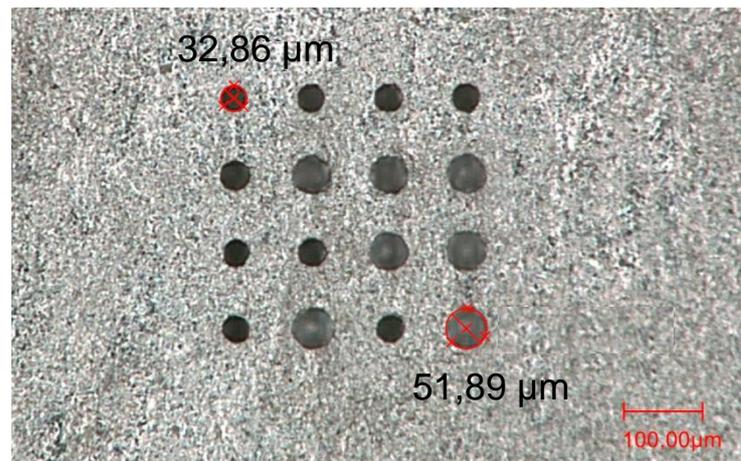


Abbildung 79: Lochmuster 10 (Versuch Nr. 66)

Die Umgehung dieses Softwarefehlers konnte dadurch erreicht werden, dass neben der NC-Zielkoordinate in Z-Richtung zusätzlich eine sehr kleine Koordinatenänderung von beispielsweise 10 nm in X- oder Y-Richtung vorgegeben wurde. Dadurch interpolierte die Steuerung stets eine Gerade zwischen Start- und Endpunkt und wechselte nicht mehr in den Bohrzyklus. Der Werkzeugdurchmesser reduzierte sich nach den 16 Bohrungen (Lochmuster 10) auf Grund des Verschleißes von 20 µm auf ca. 10 µm (siehe Abbildung 80).

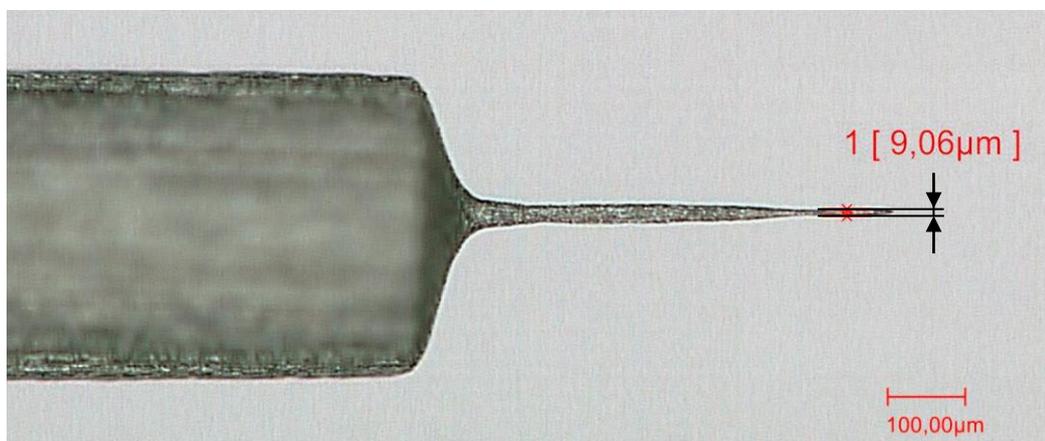


Abbildung 80: Werkzeug mit starkem Verschleiß (nach Versuch Nr. 66)

9.3.2 Horizontales Abtragen mit kegelförmigem Werkzeug

Das horizontale Abtragen mit kegelförmiger Werkzeugspitze bietet den Vorteil, dass dadurch direkt eine positiv strukturierte Oberfläche erzeugt werden kann. Nach Eintauchen in das Werkstück entlang der vertikalen Z-Achse in der gewünschten Strukturtiefe und anschließendes ein- oder mehrachsiges Bewegen entlang der X- und/oder Y-Achse lassen sich Nuten mit winkligen Seitenflächen erzeugen. Werden diese Nuten schachbrettartig angeordnet entsteht zwischen ihnen ein Feld von Pyramidenstrukturen.

Die Versuche zum horizontalen Abtragen ergaben keine positiven Ergebnisse. Die Vorschubgeschwindigkeit entlang der ebenen Achsen war auf Grund zahlreicher elektrischer Kontakte stark limitiert. Zwar konnte die Anzahl der Kontakte durch Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit auf $0,0032 \mu\text{m/s}$ verringert werden, jedoch führte dies zu einer sehr langen Bearbeitungszeit von ca. 86 Stunden für eine 1 mm lange Nut. Auf Grund der Unwirtschaftlichkeit dieser Bearbeitungsstrategie, wurden die Versuche abgebrochen.

9.3.3 Vertikales Abtragen mit pyramidenförmigem Werkzeug

Das Übertragen der Pyramidenform vom Werkzeug auf das Werkstück stellt besonders hohe Anforderungen an den elektrochemischen Prozess, da alle vier Seitenkanten möglichst scharfkantig abgebildet werden müssen. Zur Bewertung der Ergebnisse wurden mit dem optischen Oberflächenmessgerät Alicona InfiniteFocus 3D-Schnitte erstellt und die Verrundung der vier Pyramidenkanten in Abhängigkeit der Zustelltiefe untersucht. Abbildung 81 zeigt anhand eines Beispiels die Verrundung der Kanten bis hin zum Kreisquerschnitt an der tiefsten Stelle. Mit den Parametern aus Versuch Nr. 85 konnten bei einer Eindringtiefe von $200 \mu\text{m}$ die besten Ergebnisse erzielt werden.

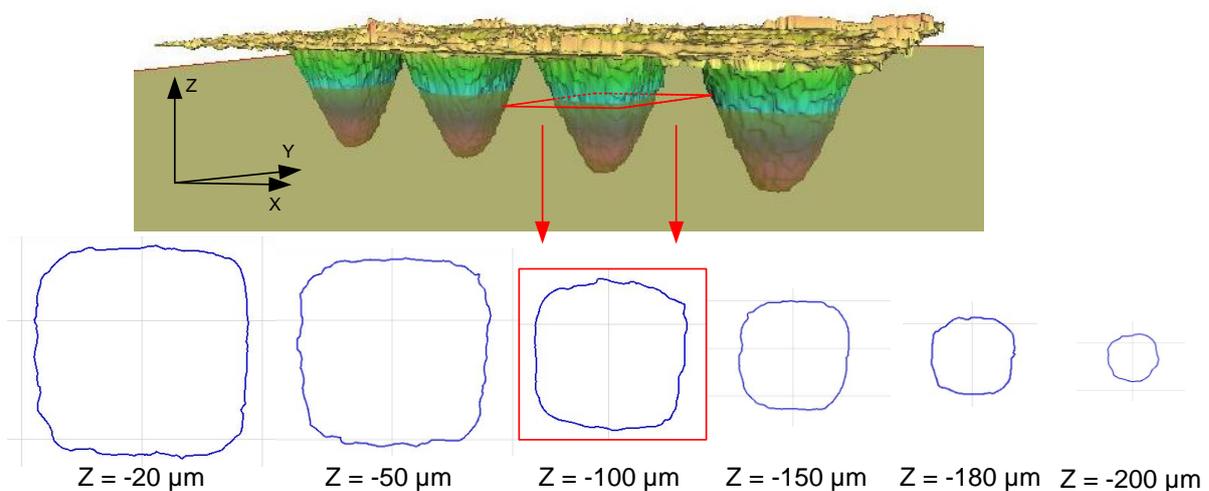


Abbildung 81: Lochmuster Pyramidenform, Schichtdarstellung (Versuch Nr. 85)

9.3.4 Vertikales Abtragen mit keilförmigem Werkzeug

Ziel der Versuche war es, durch Abformen eines keilförmigen Werkzeuges an einem ebenen Werkstück großflächige Pyramidenstrukturen als Positivform zu erzeugen. Die ersten Versuche dienten der empirischen Ermittlung von Prozessparametern, die eine gute Abbildung der 1 mm langen Keilschneide ermöglichten. Zum Erhalt der Stromdichte im Arbeitsspalt, musste der Strom proportional zur Elektrodenfläche in der Kontaktzone erhöht werden. Auf Grund der Anpassung der Prozessparameter

mussten auch die geometrischen Strukturbedingungen der dadurch veränderten Breite des Arbeitsspalt es angepasst werden. Dazu gehörten einerseits die Zustelltiefe h und andererseits der Bahnabstand a . Durch geeignete Wahl dieser beiden Parameter war es möglich, bei schrittweiser einachsiger Vorwärtsbewegung regelmäßige Bahnstrukturen zu erzeugen. Abbildung 82 zeigt Querschnitte durch das Werkstück nach Bearbeitung mittels keilförmigen Werkzeuges und unterschiedlichen Bahnabständen. Die Bearbeitungsstrategie sah vor, dass zuerst die gewünschte Strukturtiefe h eingestellt und anschließend der Bahnabstand a zu a' angepasst wurde, sodass am Ende eine gezackte Bahnstruktur entstand.

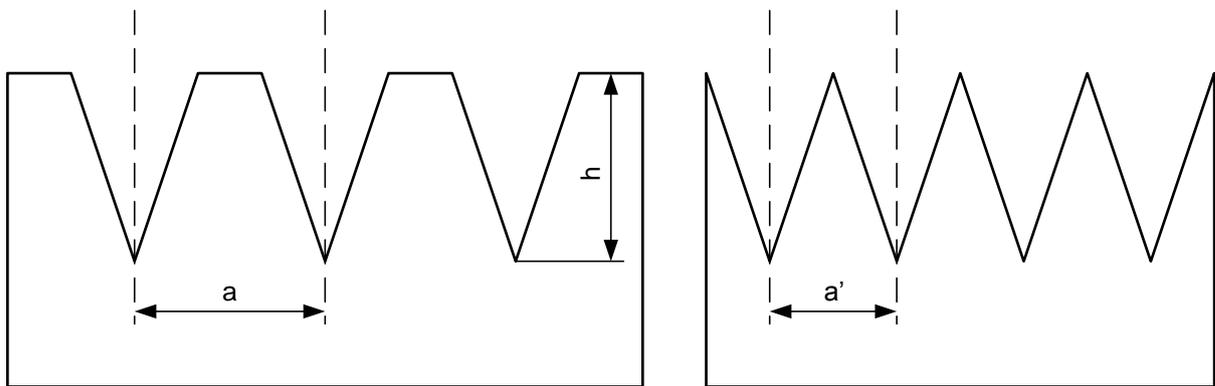


Abbildung 82: Erzeugtes Muster in Abhängigkeit des Bahnabstandes a

Ziel war es durch anschließende Drehung des Werkzeuges um 90° und überlappende Wiederholung des Vorganges, ein großflächiges Pyramidenmuster zu erzeugen. Eine erste Versuchsreihe erzielte gute Ergebnisse bei Vorschubbewegung in einer Achsrichtung (vgl. Versuch Nr. 154). Die Strukturtiefe betrug $10\ \mu\text{m}$ bei einem Bahnabstand von $22\ \mu\text{m}$ (siehe Abbildung 83). Am Falschfarbenbild ist deutlich zu erkennen, dass die Tiefe des Abtrages der erzeugten Keilnuten nicht gleichmäßig verläuft. Bei einer Untersuchung möglicher Gründe konnte festgestellt werden, dass das Werkstück nicht entsprechend ausgerichtet war.

Durch drei an der Grundplatte angebrachte Schrauben und Druckfedern konnte eine Justierung vorgenommen werden. Dazu wurde zuerst das Werkzeug an der abgeschrägten Tooling-Kante keilförmig abgeflacht, anschließend die vier Eckbereiche des Werkstückplättchens mit dem Werkzeug über elektrischen Kontaktschluss angetastet und die Verkippung über die Stellschrauben ausgeglichen. Die Differenz aus den Z-Koordinaten des niedersten und höchsten Eckpunktes des Werkstückplättchens, die sog. Verkippung, wurde ab diesem Zeitpunkt stets vor jeder Bearbeitung kontrolliert und dokumentiert. Sie darf einen von der Tiefe der abzubildenden Geometrie und den Qualitätsanforderungen abhängigen Betrag nicht überschreiten. Da in den hier beschriebenen Versuchen Geometrien mit ca. $20\ \mu\text{m}$ Tiefe und $1 \times 1\ \text{mm}$ Fläche erzeugt werden sollen, wurde die maximale Verkippung auf $20\ \mu\text{m}$ festgelegt. Eine Verkippung der Eckpunkte des

20 x 20 mm (L x B) großen Werkstück-Plättchens um 20 μm ergibt im Arbeitsbereich von 1 x 1 mm (L x B) eine Verkippung von 1 μm und entspricht damit 1/20 der zu erzeugenden Geometrietiefe. Nach einer solchen Justierung der Werkstückoberfläche muss der Keil erneut an der schrägen Kante abgetragen und der Justiervorgang wiederholt werden, um eine zur Oberfläche plane Keillinie zu erhalten.

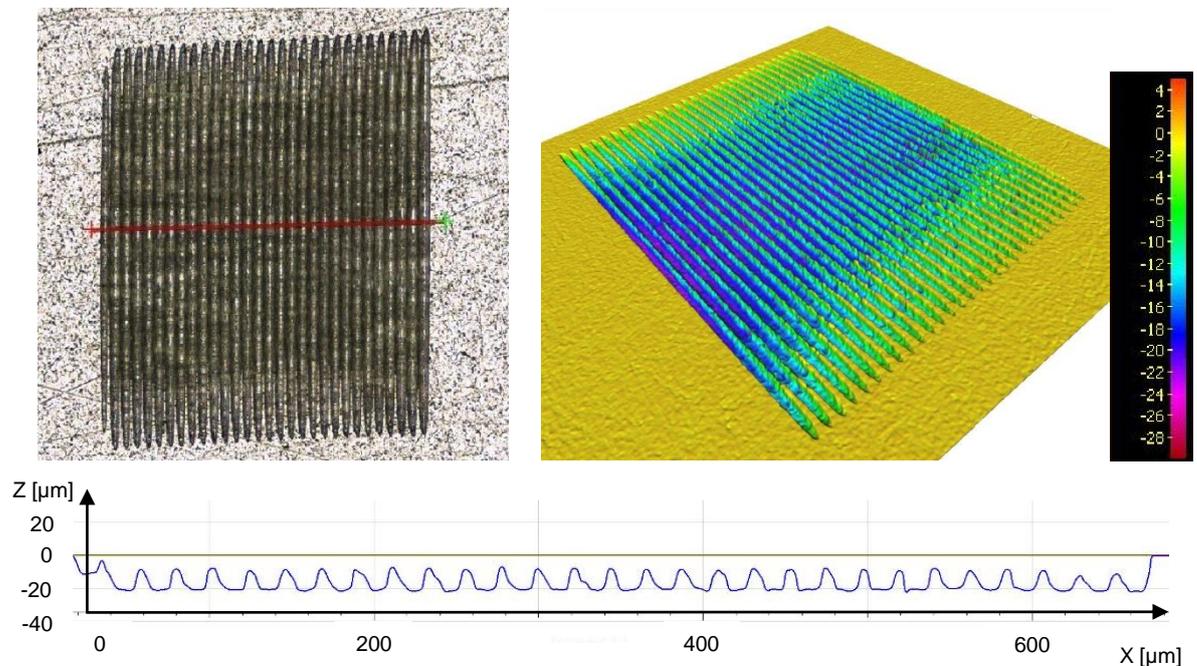


Abbildung 83: Bahnmuster in Wolfram (Versuch Nr. 154)

Wie alle anderen erzeugten Werkzeuggeometrien unterlag auch der Keil einem kontinuierlichen Verschleiß bei der Bearbeitung der Wolframprobe. Es zeigte sich ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen dem Verschleiß an der Keilkante und der Höhe der Bearbeitungsgeschwindigkeit. Durch gleichzeitige Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit, der Pulsamplitude und des Stromes konnte ein besseres Bearbeitungsergebnis erzielt werden, jedoch bei deutlich längerer Bearbeitungszeit.

Um viele positive Pyramiden an der Werkstückoberfläche zu erhalten wurde das keilförmige Werkzeug um 90° gedreht und der Vorgang des vertikalen Bahnabtrags wiederholt. Der Bahnabstand wurde dabei auf 25 μm vergrößert. Die sich ergebenden Strukturen zeigten eine Höhe von 10 μm auf einer Fläche von 525 x 325 μm (siehe Abbildung 84).

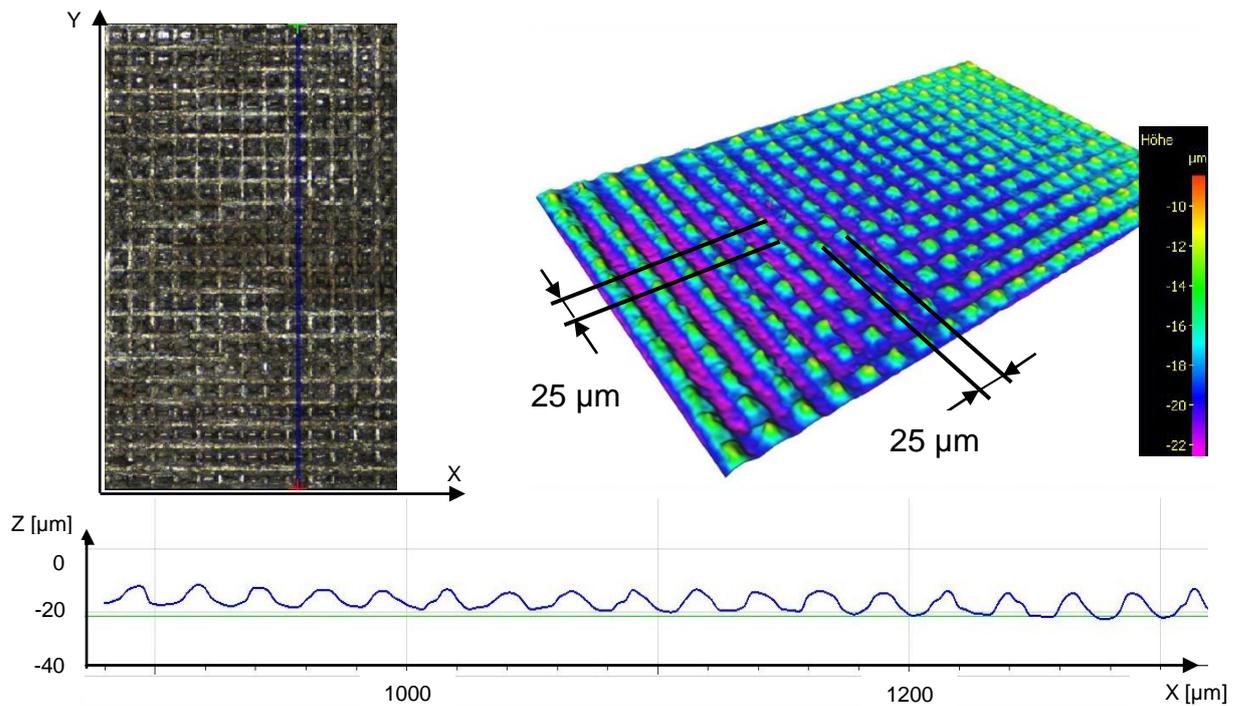


Abbildung 84: Gekreuzte Struktur in Wolfram (Versuch Nr. 159)

Das dabei eingesetzte keilförmige Werkzeug wurde mit den Parametern aus Versuch Nr. 149 hergestellt. Die Werkzeugqualität ist in Tabelle 22 (Seite 98) quantifiziert.

Um die erzeugte Struktur mit den in Kapitel 6 beschriebenen Methoden auf deren hydrophoben Eigenschaften untersuchen zu können, wird eine ausreichend große strukturierte Fläche benötigt. Die in Versuch Nr. 159 gefertigte Struktur mit einer Ausdehnung von ca. 0,5 x 0,3 mm (L x B) ist zu klein, um darauf einen Wassertropfen vollständig aufzusetzen.

Zusammenfassend konnte in den Versuchsreihen zum vertikalen Abtragen von Wolframproben mit keilförmigen Werkzeugen aus Wolfram gezeigt werden, dass die Qualität des Bearbeitungsergebnisses von den in Tabelle 23 beschriebenen Faktoren abhängt.

Einflussfaktor	Maßnahmen	Messbare Parameter
Qualität des Werkzeuges	Hohe Qualität des Gegenstückes beim Abrichten, geringe Vorschübe, niedrige Pulsweite	Kantenradius Verrundungsmaß Größe der Kernzone Winkeltreue
Ebenheit und Oberflächengüte der Werkstückoberfläche	Schleifen, läppen und polieren	Oberflächenrauheit
Ausrichtung / Verkippung der Werkstückoberfläche	Justieren	Z-Abstand zur Werkzeugelektrode
Elektrolyt	Auswahl eines wenig korrosiven Elektrolyten	Oberflächenbeschaffenheit des Werkstücks vor und nach Bearbeitung
Prozessparameter	Parameterversuche	Schärfe der erzeugten Kanten, Werkzeugverschleiß, mögliche Bearbeitungsgeschwindigkeit

Tabelle 23: Einflussfaktoren auf die Bearbeitungsqualität beim elektrochemischen Abtragen mit keilförmigem Werkzeug

10 Elektrochemische Mikrostrukturierung von Edelstahlproben aus 1.2343

Beim Warmarbeitsstahl mit der Bezeichnung 1.2343 oder X37CrMoV5-1 handelt es sich um einen Stahl mit besonders hohem Verschleißwiderstand. Er ist resistent gegen Warmrissbildung, besitzt eine sehr gute Anlassbeständigkeit und beste Zähigkeit. „Auf Grund der vielseitigen Einsetzbarkeit ist 1.2343 der weltweit meistverwendete Warmarbeitsstahl“ (vgl. [66]). Die Werkstoffzusammensetzung und ein Auszug der mechanischen Eigenschaften dieses Stahls sind in Tabelle 24 zusammengefasst.

Bezeichnung	Kohlenstoff C [%]	Silizium Si [%]	Chrom Cr [%]	Molybdän Mo [%]	Vanadium V [%]	Dichte [g/cm ³]	Härte HRC
X37CrMoV5-1	0,37	1,0	5,3	1,3	0,4	7,85	40 - 54

Tabelle 24: Werkstoffzusammensetzung X37CrMoV5-1 (vgl. [66] sowie Anhang IV)

Er wird unter anderem für Druckgußformen, Schmiedegesenke und Zylinder bzw. Schnecken für die Kunststoffverarbeitung verwendet (vgl. Anhang IV). In diesem konkreten Fall soll der Werkstoff als Form einer Spritzgussanlage zur Fertigung von Kunststoffteilen eingesetzt werden.

Der erste Schritt bei der Bearbeitung eines (aus elektrochemischer Sicht) unbekanntes Materials dient der Findung eines geeigneten Elektrolyten. Eine ausführliche Literaturrecherche ergab neben den in Tabelle 2 (Seite 19) genannten, folgende zur elektrochemischen Bearbeitung von Stahlproben unterschiedlicher Zusammensetzung geeignete Elektrolyten:

Elektrolyt (chem. Summenformel)	Elektrolyt (Name)	Bearbeitetes Material	Quelle
3 M NaNO ₃	Natriumnitrat	ASN-N004 – Edelstahl mit einem Chromanteil von ca. 15%	[67], S. 5
0,2 M H ₂ SO ₄	Schwefelsäure	1.4301 (304) – Edelstahl mit einem Chromanteil von ca. 19%	[68], S. 2
3 M HCl + 6 M HF	Salzsäure mit Flusssäure	1.4301 (304)	[69], S. 2
3 M HCl + :7 M HF	Salzsäure mit Flusssäure	allg. Edelstahl	[17], S. 12
1 M NaNO ₃ + 0,01 M Na ₃ Cit	Natriumnitrat mit Natriumcitrat	1.4301 (304)	[70], S. 1
20 wt.% NaCl + 40 wt.% NaNO ₃	Natriumchlorid mit Natriumnitrat	100Cr6	[71], S. 30
0,3 M C ₆ H ₈ O ₇	Citronensäure	1.4301 (304)	[72], S. 2

Tabelle 25: Elektrolyte zur Bearbeitung von Stahl

Eine Literaturquelle, welche explizit die elektrochemische Bearbeitung von 1.2343 beschreibt, konnte nicht gefunden werden. Auf Grund eingeschränkter technischer Schutzeinrichtungen war das Arbeiten mit konzentrierter Salzsäure und Flusssäure (> 20%) im Zeitraum der Erstellung dieser Arbeit nicht möglich (vgl. Kapitel 3.7.7).

10.1 Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Experimente dienten quaderförmige Metallplättchen aus 1.2343 mit den Maßen 20 x 20 x 5 mm (L x B x H). Die eingesetzten Plättchen wurden an der Werkstückoberfläche sowie der gegenüberliegenden Seite plan geschliffen und mittels Linsenkopfschrauben im Bearbeitungsbecken befestigt. Als Werkzeug diente eine 35 mm lange zylindrische Elektrode mit einem Durchmesser von 1 mm aus reinem Wolfram mit einem keilförmig geformten Elektrodenende. Zur Findung eines passenden Elektrolyten wurde zunächst auf das Tooling verzichtet und eine unbearbeitete Wolframelektrode als Werkzeug benutzt. Erst bei nachfolgenden Experimenten wurde mit der in Kapitel 8.3.4 beschriebenen Keilgeometrie am Ende einer Wolframelektrode gearbeitet.

10.2 Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel werden die im Zuge dieser Arbeit realisierten Experimente unter Einsatz unterschiedlicher Elektrolytlösungen beschrieben. Tabelle xx zeigt einen Überblick über die durchgeführten Versuche.

Kapitel	Elektrolyt	Ergebnis
9.2.1.	Natriumnitrat NaNO_3	Kein Abtrag; Korrosion – rötliche Färbung des Elektrolyten
9.2.2.	Schwefelsäure H_2SO_4	Abtrag und geringe Korrosion – schwarze Färbung des Werkstücks, blaue Färbung des Elektrolyten
9.2.3.	Natriumchlorid NaCl	Kein Abtrag; Korrosion – gelbe Färbung des Elektrolyten
9.2.4.	Natriumhydroxid NaOH	Kein Abtrag; Korrosion - rötliche Färbung des Elektrolyten
9.2.5.	Natriumnitrat NaNO_3 + Natriumcitrat $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$	Kein Abtrag
9.2.6.	Chlorwasserstoff HCl	Abtrag und geringe Korrosion – gelbe Färbung des Elektrolyten

*Tabelle 26: Elektrochemische Bearbeitung von Stahlproben (1.2343),
Versuchsübersicht*

10.2.1 Versuche mit Natriumnitrat NaNO_3

Der obigen Reihung folgend, wurde zuerst mit einer wässrigen Elektrolytlösung aus 2 M NaNO_3 experimentiert. Van Damme et al. beschreibt ein numerisches Modell, mit welchem die Effizienz des elektrochemischen Abtragprozesses bestimmt werden kann. Bei dem untersuchten Verfahren handelt es sich um ein Hochgeschwindigkeits-ECM-Verfahren mit hohen Stromdichten von bis zu 1 A/mm² (vgl. [67]). Ausgangsmaterial ist der Stahl ASN-N004 mit einem Chromanteil von 14%. Es kamen Rechteckpulse mit einer Pulsweite von 1 bis 10 ms und einem Puls/Pauseverhältnis von 10 bis 100 zum Einsatz.

Da der Pulsgenerator der zur Verfügung stehenden μ PECM Maschine einen maximalen Strom von 5 mA erzeugt, ist die Stromdichte limitiert. Bei den Vorversuchen zur Findung geeigneter Prozessparameter kam eine zylindrische Elektrode mit einem Durchmesser von 1 mm ohne spezieller Endbearbeitung zum Einsatz. Die maximale Stromdichte ergab sich daher zu 6,2 mA/mm².

Bei den Versuchen zeigte sich eine starke Korrosion des Werkstückes durch welche sich rötlicher, rostähnlicher Niederschlag bildete und im gesamten Bearbeitungsbecken am Boden absetzte (siehe Abbildung 85). Abtrag konnte nach mehrfacher Variation der Prozessparameter keiner gemessen werden. Einer der Gründe dafür scheint die maximal realisierbare Stromdichte zu sein, welche bei diesem Versuchsaufbau deutlich geringer ist als jene in der Literatur beschriebene. Wegen der schlechten Bearbeitungsergebnisse und der starken Verunreinigung des Elektrolyten, welche bereits nach kurzer Bearbeitungszeit einsetzte, wurden die Experimente abgebrochen und ein anderer Elektrolyt getestet.



Abbildung 85: Bearbeitung von 1.2343 in 2 M NaNO_3 (Versuch Nr. 140)

10.2.2 Versuche mit Schwefelsäure H_2SO_4

Als Grundlage für die verwendete Elektrolytkonzentration diente eine Publikation von Chen et al., in der die elektrochemische Bearbeitung des Edelstahl mit der Bezeichnung 1.4301 (304) beschrieben wird (vgl. [68]). Bei dem eingesetzten

Verfahren wurde die Werkzeugelektrode aus Wolfram und einem Durchmesser von 80 μm während der Bearbeitung mit 1000 U/min rotiert. Die Pulsweite betrug dabei 75 bis 125 ns bei einer Pulsamplitude von 6 bis 9 V.

Bei den an der μPECM -Maschine durchgeführten Versuchen unter Einsatz von 0,2 M H_2SO_4 als wässrige Elektrolytlösung, konnten erste Bearbeitungsergebnisse erzielt werden. Bei längerer Kontaktzeit zwischen Werkstück und Elektrolyt bildete sich an der Stahloberfläche eine dunkle Passivschicht aus (Abbildung 86, links). Auch das Werkzeug erfuhr eine Verfärbung (Abbildung 86, rechts), obwohl Wolfram gegen kalte Schwefelsäure resistent ist (vgl. [73]). Es wird angenommen, dass es sich um eine Redoxreaktion zwischen der Schwefelsäure und dem Eisen des Stahls handelt, bei der sich Wasserstoff H_2 und grünblaues Eisen(II)-Sulfat FeSO_4 bildet.

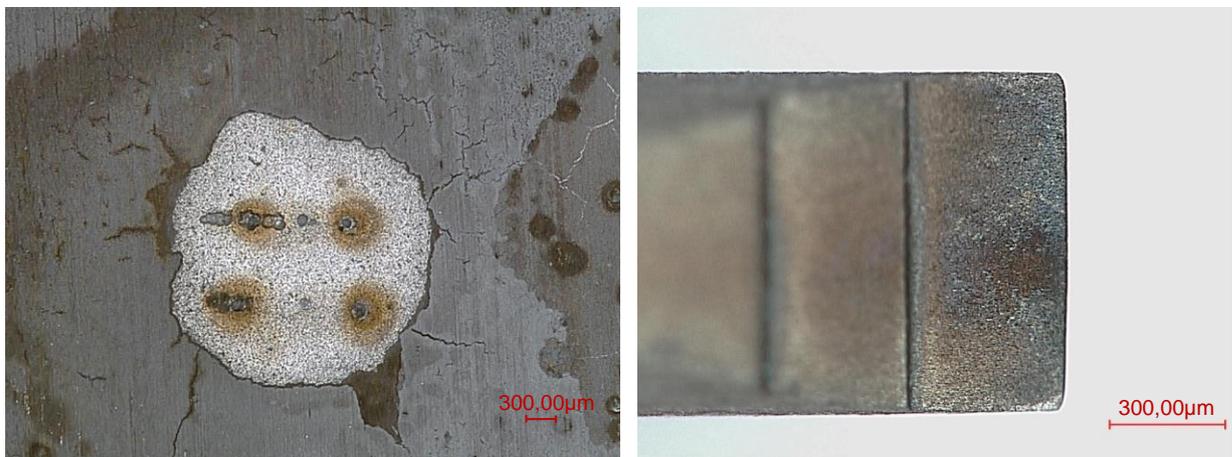


Abbildung 86: Oberflächenveränderung an Werkstück (1.2343) links und Werkzeug (W) rechts, Elektrolyt: 0,2 M H_2SO_4 (Versuch Nr. 164)

Der Elektrolyt verfärbte sich während der Bearbeitung und einer Zeitspanne von 24 Stunden bläulich-schwarz. Die abgelagerte Schicht konnte nach Entleeren des Beckens und noch im feuchten Zustand leicht mit einem Tuch entfernt werden. Neben Bildung der schwarzen Schicht kam es auch zu lokaler Rostbildung an einigen Stellen, vor allem an den Kontaktzonen zwischen Werkstück und Befestigungsschrauben.

10.2.3 Versuche mit Natriumchlorid NaCl

Der Einsatz eines Natriumchlorid-Elektrolyten bietet im Vergleich zu den bereits beschriebenen Elektrolytlösungen den Vorteil, dass der Umgang mit Salz und Lösung auf Grund geringerer Sicherheitsrisiken einfacher ist. Als Elektrolytkonzentration wurde 4 Mol pro Liter (4 M) gewählt. Im Zuge der Vorversuche zur Findung geeigneter Prozessparameter zeigte sich eine starke Korrosion am Werkstück. Der Elektrolyt im Bearbeitungsbecken färbte sich während der Bearbeitung innerhalb weniger Minuten gelblich. Daneben bildete sich starke

Korrosion an der Werkstückoberfläche. Auf Grund der erfolglosen Abtragversuche unter Einsatz verschiedener Parametersätze sowie der starken Verunreinigung des Elektrolyten wurden die Experimente abgebrochen und ein weiterer Elektrolyt getestet.

10.2.4 Versuche mit Natriumhydroxid NaOH

Im Zuge der Elektrolytfindung wurde Natriumhydroxid in wässriger Lösung untersucht. Die Konzentration betrug 2 und 3 Mol pro Liter. Trotz der Anhebung aller wesentlichen Prozessparameter wie Pulslänge, Pulsamplitude und Strom konnte kein zufriedenstellender Materialabtrag erzielt werden. Auch hier kam es zu einem Lösen der Materialbestandteile des Werkstücks im Elektrolyten und damit zu einer starken Verunreinigung innerhalb einer kurzen Bearbeitungsdauer. Auf Grund des geringen Arbeitsspaltes beim μ PECM-Verfahren, führt eine solche Verunreinigung zu zahlreichen Kontaktschlüssen und damit zu schlechten Ergebnissen. Daher wurden auch diese Versuche abgebrochen und ein weiterer Elektrolyt getestet.

10.2.5 Versuche mit Natriumnitrat NaNO_3 + Natriumcitrat $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$

Neben Natriumchlorid werden in der Literatur auch andere ökologische Elektrolyte für die Bearbeitung von Stahl beschrieben. Beispielsweise untersuchte Guodong et al. verschiedene Elektrolytlösungen für die Bearbeitung von Stahl 1.4301. Beste Ergebnisse erreichte er mit einer wässrigen Elektrolytlösung aus 1 M Natriumnitrat und 0,01 M Natriumcitrat bei einer Pulsspannung von 8 V, einer Pulsweite von 5 μs und einem Puls/Pause-Verhältnis von 1.

Die an der μ PECM-Anlage durchgeführten Experimente mit 1 M NaNO_3 mit 0,01 M $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$ als wässrige Elektrolytlösung ergaben keinen messbaren Abtrag am Werkstück. Dabei wurde stets versucht, die Pulsamplitude die Pulsweite niedrig zu halten (in einem Bereich von 100 bis 250 ns), um eine geringe Verrundung an den erzeugten Strukturkanten zu erhalten. Die Pulsamplitude wurde im Bereich von 4 bis 8 V variiert, der Strom im Bereich von 500 bis 2000 μA . Elektrochemische Reaktionen, wie sie üblicherweise durch Gasbildung an der Anode sichtbar werden, waren bei den Versuchen nicht feststellbar.

10.2.6 Versuche mit Chlorwasserstoff HCl

In den Experimenten mit 1 M HCl als wässrige Elektrolytlösung konnte ein reproduzierbarer Abtrag an der Werkstückelektrode erzielt werden. In den durchgeführten Versuchen wurden unterschiedliche Prozessparametersätze und deren Auswirkung auf die maximale Abtraggeschwindigkeit getestet. Zusätzlich

wurde das Werkzeug auf Verschleiß und Korrosion untersucht. Die Ergebnisse der Versuche sind im folgenden Kapitel zu finden.

10.3 Ergebnisse der Abtragversuche an Stahl 1.2343

Die in diesem Kapitel beschriebenen Versuchsergebnisse an dem Warmarbeitsstahl 1.2343 beinhalten ausschließlich jene Experimente, bei welchen ein definierter Abtrag und Übertrag der geometrischen Form des Werkzeuges auf das Werkstück möglich war.

10.3.1 Ergebnisse mit Schwefelsäure H_2SO_4

Unter Verwendung von 0,2 M H_2SO_4 als wässrige Elektrolytlösung und den Parametern aus Versuch Nr. 147 konnte anfänglich ein zufriedenstellender Abtrag erreicht werden (siehe Abbildung 87). Im Gegensatz zur Bearbeitung mit Natriumnitrat als Elektrolyt, war bei diesen Versuchen keine rasche Verfärbung des Flüssigkeitsreservoirs oder der Werkstückoberfläche zu erkennen. Ein Werkzeugverschleiß, wie er bei der Bearbeitung von Wolfram auftrat, konnte hier nicht gemessen werden, die mögliche Vorschubgeschwindigkeit war jedoch geringer.

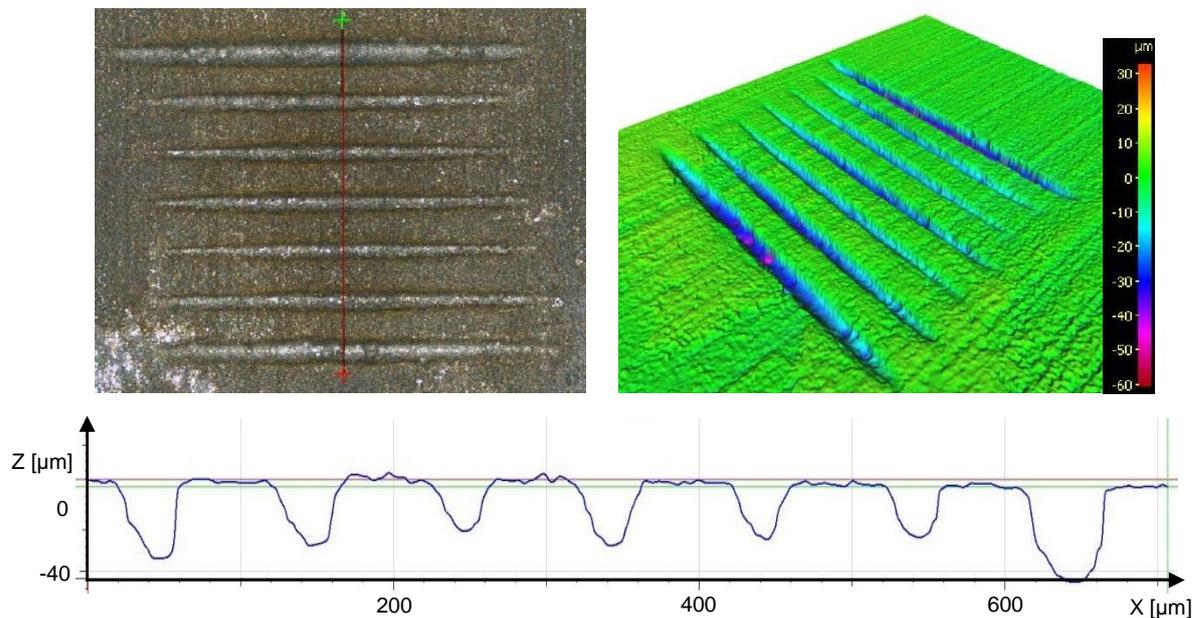


Abbildung 87: Bearbeitungsergebnisse in 1.2343 mit 0,2 M H_2SO_4 -Elektrolytlösung (Versuch Nr. 147)

In den darauffolgenden Versuchen war es nicht möglich diese Ergebnisse auch nur ansatzweise zu reproduzieren. Ein elektrochemischer Abtrag stellte sich nur unter Verwendung großer Spannungsamplituden (> 7 V) und langer Pulsdauern (1000 ns) ein. Dies erzeugte jedoch lediglich punktuellen tiefen, oder großflächigen muldenförmigen Abtrag ohne geometrischen Bezug zum Werkzeug. Selbst nach zahlreichen Experimenten konnten die Ergebnisse nicht reproduziert werden. Auch

die Variation der Elektrolytkonzentration von 0,2 M auf 0,5 M und 1 M brachte keine Verbesserung.

10.3.2 Ergebnisse mit Chlorwasserstoff HCl

Bereits nach den ersten Versuchen mit 1 M HCl als wässrige Elektrolytlösung war ein deutlicher, geometrisch zur Werkzeugelektrode passender, elektrochemischer Abtrag sichtbar. Reproduktionsversuche zeigten gute Ergebnisse in mehreren Versuchsreihen. Als kritisch stellte sich dabei die zufällig verteilte Anhaftung der Abtragprodukte an der Werkzeugelektrode heraus. Die Aggregation störte den Bearbeitungsprozess, führte zu Kontakten zwischen Anode und Kathode und daraus resultierend zu verringerter Abtraggeschwindigkeit und ungenauerer Konturabbildung. Durch regelmäßiges Reinigen der Werkzeugelektrode mittels in Ethanol getränktem Wattestäbchen konnte eine deutliche Verbesserung der Reproduzierbarkeit erzielt werden. Beste Abtragergebnisse konnten mit den Parametern aus Versuch Nr. 213 erzielt werden (siehe Abbildung 88). Die Eindringtiefe laut NC-Programm betrug jeweils 20 μm . Eine Ausrichtung des Werkstückes durch Verkippen der Plattform wurde auf Grund des Vorversuchscharakters nicht durchgeführt. Daraus resultieren die unterschiedlichen Abtragtiefen trotz gleicher Zustellung in Z-Richtung.

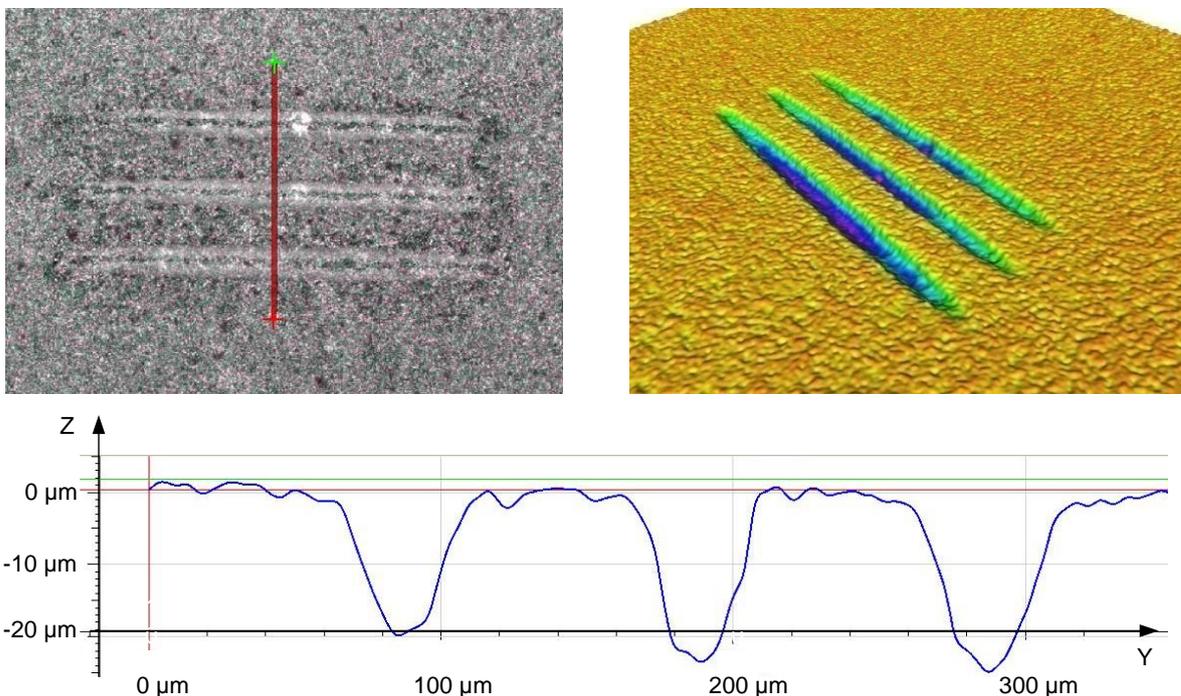


Abbildung 88: Bearbeitungsergebnisse in 1.2343 mit 1 M HCl-Elektrolytlösung (Versuch Nr. 217)

Abschließend wurde versucht, eine gekreuzte Struktur im Warmarbeitsstahl 1.2343 zu erzeugen. Dies erfolgte mit den Parametern aus Versuch Nr. 231 und einer auf

ca. 600 μm verjüngten Werkzeugelektrode aus Wolfram mit keilförmigem Werkzeugende. Die Ergebnisse sind in Abbildung 89 zu sehen.

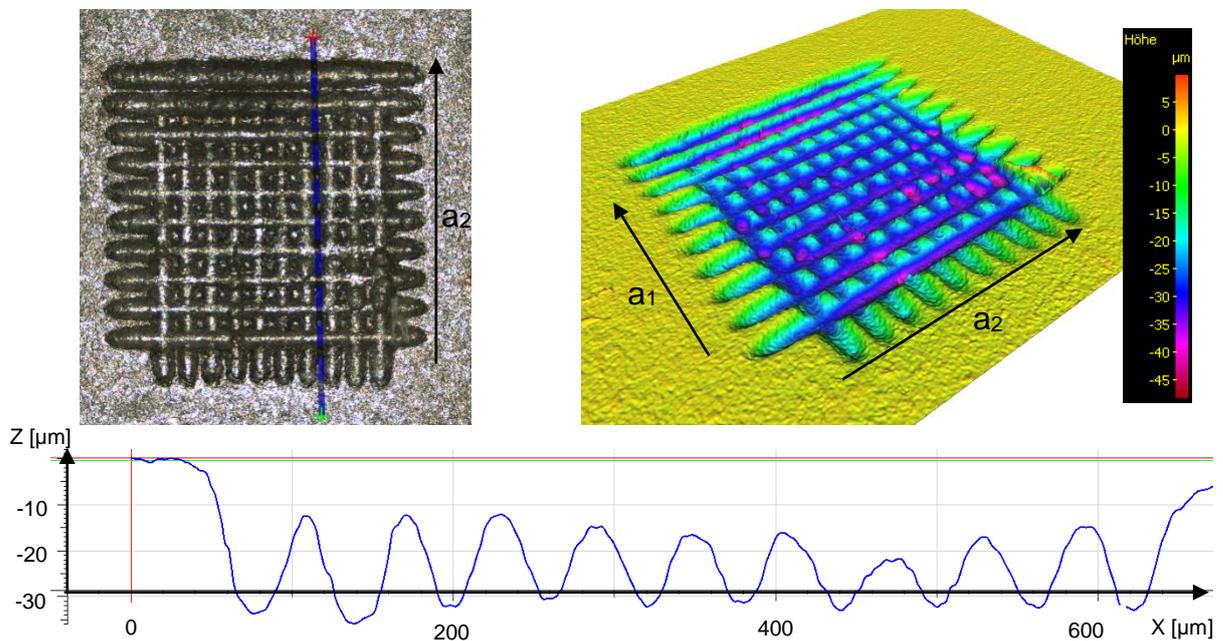


Abbildung 89: Gekreuzte Struktur in 1.2343 mit Schnittebene und Falschfarbenbild (Versuch Nr. 231)

Es konnte eine Strukturtiefe von ca. 20 μm bei einem Bahnabstand $a_1 = 50 \mu\text{m}$ und $a_2 = 60 \mu\text{m}$ erreicht werden. Die Abtraggeschwindigkeit entsprach 26 nm/s oder 0,0016 mm/min. Die Dauer der Bearbeitung lag bei etwa 5 Stunden.

Auffällig war der geringe Werkzeugverschleiß bei der gewählten Werkstoff/Elektrolyt-Kombination, welcher trotz (relativ) hoher Anzahl an Keilbahnen nicht messbar war. Dennoch zeigte sich eine Korrosion am Werkstück, besonders im Bereich der elektrischen Kontaktzonen (Abbildung 90).



Abbildung 90: Korrosion am Werkstück (1.2343) nach elektrochemischer Bearbeitung mit HCl als Elektrolyt

11 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die im ersten Teil dieser Arbeit durchgeführte Maschinengenauigkeitsuntersuchung konnten die Schwachstellen der Versuchsanlage quantifiziert werden. Die ermittelten Ergebnisse zeigten deutliche, negative Abweichungen zu den Herstellerspezifikationen der Bearbeitungsmaschine.

Dennoch konnten bei den folgenden praktischen Experimenten, beispielsweise bei der maschineninternen Fertigung von Wolframwerkzeugen mit geometrisch definierten Formen sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Auch das Übertragen der erzeugten Werkzeuggeometrien auf Werkstücke aus den Materialien Wolfram und Warmarbeitsstahl 1.2343 gelang nach anfänglichen Schwierigkeiten. Es zeigte sich, dass Wolfram mit einer wässrigen Natriumhydroxid-Elektrolytlösung gut zu bearbeiten ist, der Warmarbeitsstahl 1.2343 hingegen mit Salzsäure.

In weiterführenden Experimenten kann der Einsatz von großflächigen Werkzeugelektroden getestet werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde eine zylindrische Elektrode mit mehreren parallelen Keilgeometrien gefertigt, um eine höhere Flächenleistung pro Senkvorgang zu erzielen (Abbildung 91). Die durch Funkenerosion erzeugte Elektrode besitzt einen Durchmesser von 11,5 mm auf welchen 11 Keile regelmäßig verteilt sind. Der durchschnittliche Keilkantenradius beträgt $16,5 \mu\text{m}$.

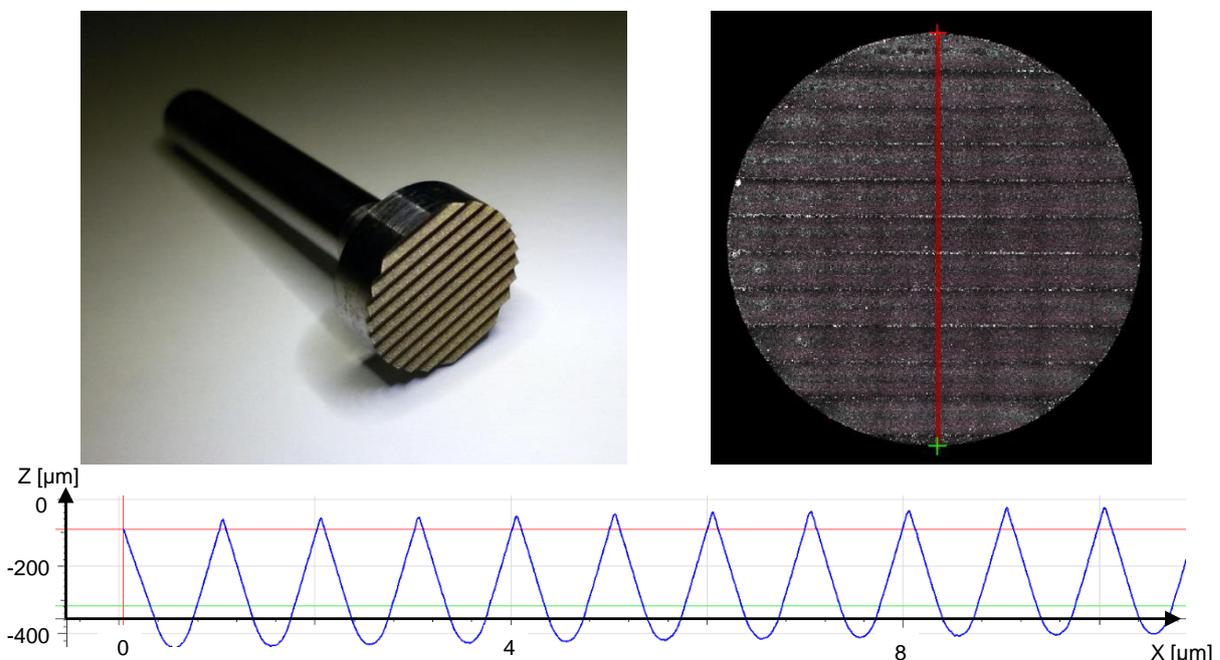


Abbildung 91: Stempielektrode für die ECM-Bearbeitung mit höherer Flächenleistung

Dabei gilt es zu prüfen, ob der Pulsgenerator genügend Leistung besitzt, um die für den elektrochemischen Abtrag notwendige Stromdichte zu erzeugen. Zusätzlich ist

die Ausrichtung des flächigen Werkzeuges zum quaderförmigen Werkstück deutlich aufwendiger als bei einreihigen Werkzeugen (Abbildung 92).

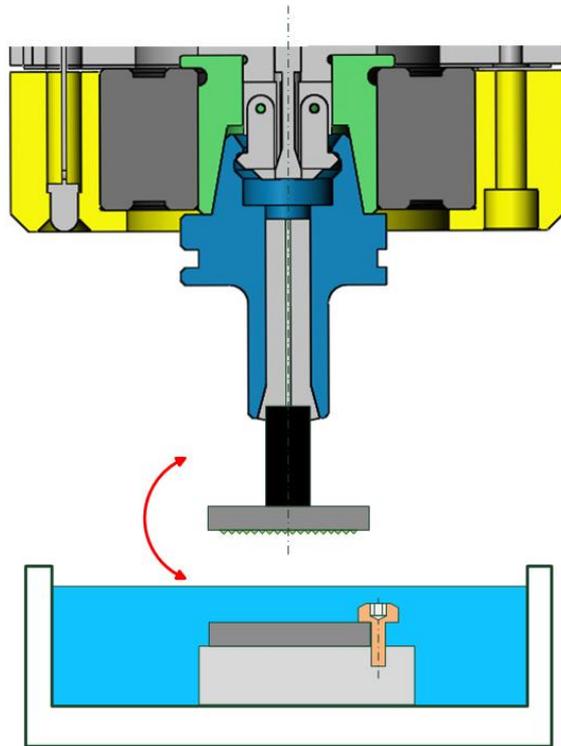


Abbildung 92: Ausrichtung eines flächigen Werkzeuges zum Werkstück

Im Zuge von weiteren Experimenten zur Mikrostrukturierung von Bauteiloberflächen mit hoher Flächenleistung kann versucht werden, einen mittels μ PCEM-Verfahren strukturierten Prägestempel aus Wolframkarbid zu fertigen (Abbildung 93). Die darauf aufgebrachte Struktur kann anschließend durch Oberflächenschlagverdichten (MHP – Machine Hammer Peening) auf eine Werkstückoberfläche übertragen werden. Vorteil dieser Technologie wäre es, die darauf aufgebrachte Struktur sehr rasch, großflächig und mehrschichtig auf einem Bauteil abzubilden.

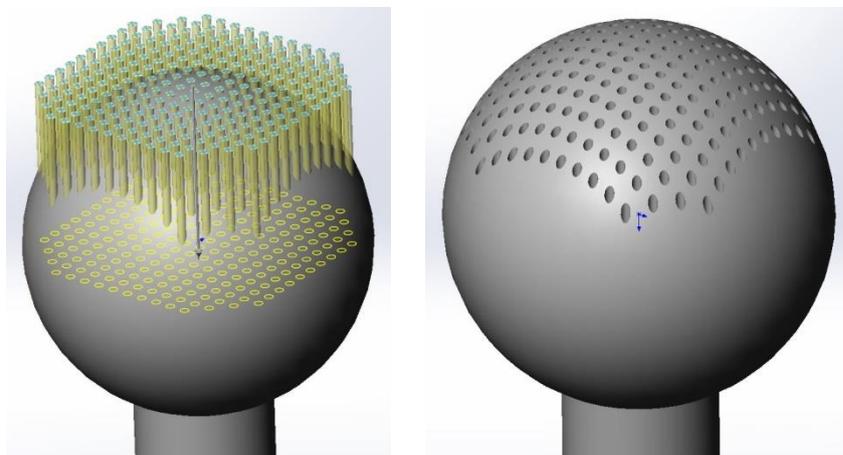


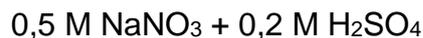
Abbildung 93: Beispiel eines möglichen Prägestempels für den Einsatz im MHP-Verfahren

Auch bei der Bearbeitung von WC spielt die Wahl eines geeigneten Elektrolyten eine wesentliche Rolle. Choi et al. hat sich mit den zur EC-Bearbeitung von Wolframkarbid mit Kobaltmatrix geeigneten Elektrolytlösungen intensiv auseinandergesetzt. Für die Bearbeitung des Hartmetalls K20, welches aktuell beim Prägestempel eingesetzt wird, kann versucht werden, Chois Ergebnisse mit den von ihm vorgeschlagenen Einstellungen experimentell zu validieren (vgl. [23]). Die relevanten Materialien unterscheiden sich nur gering in den Massenkonzentrationen der Legierungsbestandteile (siehe Tabelle 27).

Bezeichnung / Stoffanteile	Kohlenstoff C [m%]	Kobalt Co [m%]	Wolfram W [m%]	Spezifisches Gewicht [g/cm ³]
Hartmetall HM K20 (Durchschnittswerte)	6,1	6	87,9	14,95
WC-Co, Choi	5,5	10	84,5	14,5

Tabelle 27: Chemisch-physikalische Eigenschaften ausgewählter Hartmetalle

Die von Choi erarbeitete, optimale Elektrolytkonzentration lautet:



Um die Ausrichtung des Werkstückes zu den Vorschubachsen zu erleichtern, könnten mechanische Änderungen an der μ PECM-Maschine vorgenommen werden. Durch Ergänzung einer am Kreuztisch befestigten, flach bauenden Dreheinheit mit horizontalen Achsen würden Kippmöglichkeiten des Werkstückes um X- und Y-Achse geschaffen werden, die eine Ausrichtung der ebenen Werkstückoberfläche zur Z-Achse deutlich erleichtern. Diese Ausrichtmöglichkeiten wären zur Verbesserung der Regelmäßigkeit der erzielten Bearbeitungsergebnisse und damit für eine großflächige Mikrobearbeitung mit definierten Strukturen praktikabel.

Eine Verbesserung der Rundheit bzw. des Rundlaufs der Rotationsachse könnte durch Austausch des in der Spindel verbauten Kugellagers erzielt werden (siehe Abbildung 37, S.50, Nummer 6). Dabei handelt es sich um ein zweireihiges Schrägkugellager der Fa. INA mit der Bezeichnung 3005-B-2RS-TVH. Zwar konnte bei der dynamischen Rundheitsmessung kein Lagerschaden festgestellt werden, jedoch lag dies an der geringen maximalen Drehzahl von ca. 1,1 U/s.

Um den Elektrolyteintrag in den Arbeitsspalt und damit den Abtragprozess zu verbessern, könnte entlang der Z-Achse ein Oszillator angebracht werden, der das Werkzeug in kontrollierte Schwingung versetzt. Eine Variation von Oszillationsfrequenz und Amplitude würden die Einstellmöglichkeiten des Prozesses, um zwei wichtige Parameter ergänzen.

Da das Spülen des Bearbeitungsspalt es einen verbesserten Abtransport der gelösten Hydroxide ermöglicht, wurde ein entsprechendes Bearbeitungsbecken mit Spülkanal entwickelt. Die Konstruktion musste folgende Anforderungen erfüllen:

- Zu- und Abflussmöglichkeit für die Elektrolytlösung
- Hohe chemische Beständigkeit
- Elektrischer Kontakt zum Werkstück
- Dichtheit, vor allem im Bereich der elektrischen Kontaktbrücke
- Werkstückspannvorrichtung
- Montagemöglichkeit im bestehenden Bearbeitungsraum
- Optimierte Strömung des Elektrolyten

Die Anforderungen an die chemische Beständigkeit der mit dem Elektrolyten in Kontakt tretenden Bauteile, Leitungen und Behältnisse sind beim elektrochemischen Bearbeiten auf Grund der Vielzahl an möglichen Elektrolytlösungen besonders groß. Um etwaige Reaktionen zwischen den eingesetzten Elektrolyten und Teilen des Spülsystems zu vermeiden, mussten diese eine adäquate Beständigkeit aufweisen. Tabelle 28 enthält die für den Einsatz als Spülbecken oder für Laborgefäße geeignete Materialien sowie ihre chemische Beständigkeit gegen ausgewählte Elektrolyte.

Bezeichnung	Konzentration	Chem. Summenformel	HDPE	LDPE	PP	PTFE	FPM
Flusssäure	4 %	HF	1/1	1/2	1/2	1/1	1/3
Natriumhydroxid	1 %	NaOH	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1
	30 %		1/1	1/1	1/1	1/1	2/3
Natriumnitrat	wässrig	NaNO ₃	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1
Salzsäure	1 – 5 %	HCl	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1
	20 %		1/1	1/1	1/1	1/1	1/1
Schwefelsäure	1 – 6 %	H ₂ SO ₄	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1
Legende:							
1 - sehr gut beständig, 2 - gut beständig, 3 - eingeschränkt beständig, 4 - nicht beständig							

Tabelle 28: Chemische Beständigkeit ausgewählter Kunststoffe bei zwei Temperaturen 20 °C / 50 °C (vgl. [74])

Unter Berücksichtigung der Bewertung in Tabelle 28 wurde als Material des Spülbeckens und der Schlauchtüllen PTFE gewählt. Als elektrische Kontaktbrücke dient eine von unten in das Spülbecken eingepresste Plattform aus nicht rostendem Edelstahl 1.4301, die Kontaktplatte genannt wurde. Über vier Befestigungsschrauben

und den Gewindehülsen der Kontaktplatte wird das Werkstück gespannt und ein elektrischer Kontakt zwischen Grundplatte und Werkstück ermöglicht. Durch das Einpressen der Kontaktplatte in das PTFE-Spülbecken wird das System abgedichtet.

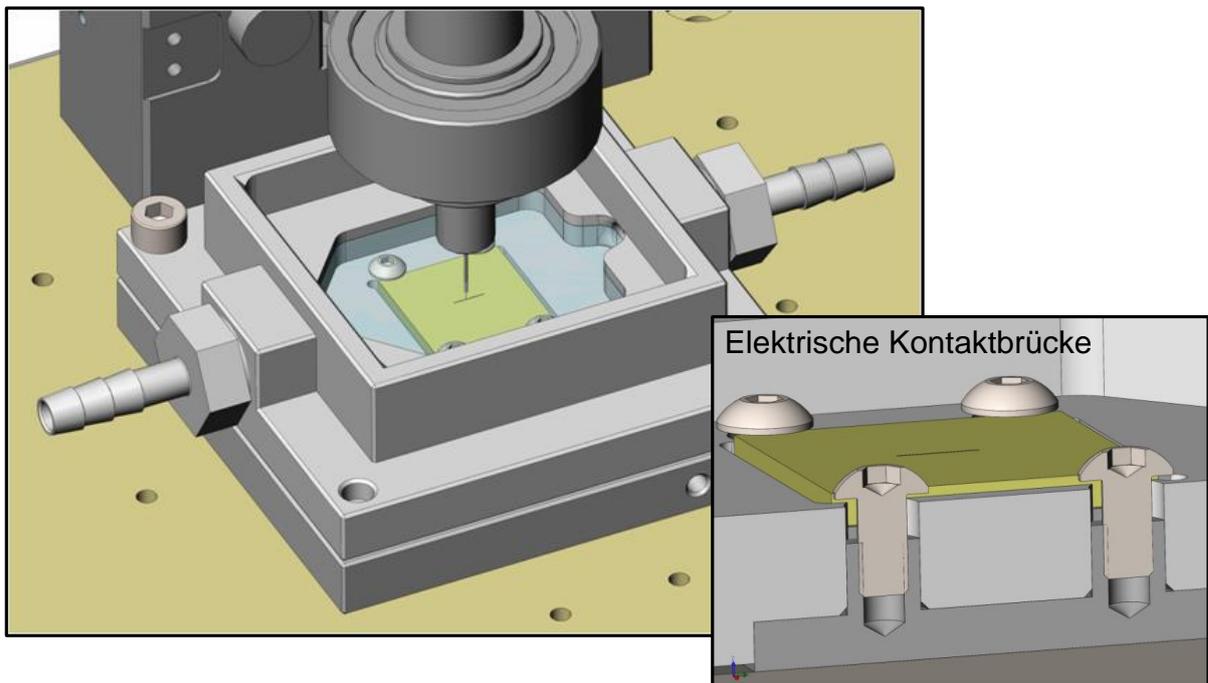


Abbildung 94: Entwickeltes Spülbecken und elektrische Kontaktbrücke zwischen Werkstück und Grundplatte als Schnittansicht

Um einen geregelten Elektrolytfluss zu ermöglichen, muss das aus drei peristaltischen Schlauchpumpen bestehende Pumpensystem adaptiert werden. Diese dienen dem Befüllen des Bearbeitungsbeckens und werden daher von der Maschinensoftware ausschließlich mit einer Spannung von 24 V versorgt. Durch Einsatz einer externen, einstellbaren Spannungsversorgung von 0 - 24 V kann das Durchflussvolumen stufenlos eingestellt werden. Anhang IV (Seite 146ff.) enthält die Konstruktionszeichnungen des Spülbeckens, der Kontaktbrücke sowie der angepassten Grundplatte.

Eine weitere Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit könnte durch ein zusätzliches Messmittel innerhalb des Bearbeitungsraumes erreicht werden. Jeder Aus- und Einspannvorgang des Werkzeughalters zur messtechnischen Beobachtung oder Beurteilung des Werkzeugverschleißes bewirkt einen Einspannfehler der nur durch innermaschinelles Messen verhindert werden kann. Dazu müsste ein kompaktes aber hochgenaues Messsystem eingesetzt werden, welches vertikal positioniert wird und nach Anfahren einer Messposition den Kantenradius des Werkzeuges misst.

12 Literaturverzeichnis

- [1] *Diffraktive Optische Elemente erobern den Markt*. Brinkmann, Matthias, et al. 1, Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2009.
- [2] Huang, Y., Sarkar, D. K. und Chen, X.-Grant. A One-Step Process to Engineer Superhydrophobic Copper Surfaces. *Materials Letters* 64. 2010, Bde. 2722 - 2724.
- [3] DIN 8580. *Fertigungsverfahren: Begriffe, Einleitung*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [4] DIN 8590. *Fertigungsverfahren Abtragen*. Berlin : Beuth Verlage, 2003.
- [5] VDI Richtlinie 3401, Blatt 1. *Elektrochemisches Abtragen, Formabtragen*. Berlin : Beuth Verlag, 2009.
- [6] Latscha, Hans Peter, Klein, Helmut Alfons und Mutz, Martin. *Allgemeine Chemie - Chemie Basiswissen I*. Heidelberg : Springer, 2011. 978-3-642-17522-0.
- [7] Hädener, A und Kaufmann, H. *Grundlagen der allgemeinen und anorganischen Chemie*. Basel : Birkhäuser Verlag, 2006. 978-3-7643-7041-1.
- [8] Kanani, Nasser. *Galvanotechnik - Grundlagen, Verfahren und Praxis einer Schlüsseltechnologie*. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2009. 987-3-446-41738-0.
- [9] Klocke, Fritz und König, Wilfried. *Fertigungsverfahren - Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung*. Heidelberg : Springer, 2007. 978-3-540-23492-0.
- [10] Deconinck, D., Van Damme, S. und Deconinck, J. A Temperature Dependent Multi-Ion Model for Time Accurate Numerical Simulation of the Electrochemical Machining Process. Part I: Theoretical Basis. *Electrochimica Acta* 60. 2012, Bde. 321 - 328.
- [11] Deconinck, D., Van Damme, S. und Deconinck, J. A Temperature Dependent Multi-Ion Model for Time Accurate Numerical Simulation of the Electrochemical Machining Process. Part II: Numerical Simulation. *Electrochimica Acta* 69. 2012, Bde. 120 - 127.
- [12] Burger, Matija. *Dissertation mit dem Thema "Präzise Elektrochemische Bearbeitung (PECM) komplexer Strukturbauteile - Dissertation"*. München : Technische Universität München, 2010.
- [13] Hamann, Carl H. und Vielstich, Wolf. *Elektrochemie*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag, 2005. 978-3-527-31068-5.

- [14] VDI Richtlinie 3401, Blatt 3. *Elektrochemisches Formabtragen, Behandlung der Elektrolytlösungen, Abwässer und Schlämme*. Berlin : Beuth Verlag, 1993. DK 621.357.7: 628.54(083.132).
- [15] Behr, A., Agar, D. W. und Jörissen, J. *Einführung in die Technische Chemie*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2010. 978-3-8274-2073-2.
- [16] Kock, Matthias. *Dissertation mit dem Titel: "Grenzen und Möglichkeiten der elektrochemischen Mikrostrukturierung mit ultrakurzen Spannungspulsen"*. Berlin : s.n., 2004.
- [17] Gmelin, Thomas und Hofmann, Klaus. *Schulung zum Arbeiten mit dem Elektrochemischen Fräsen*. [PDF] Holzerlingen : ECMTEC - Electrochemical Micromilling, 2010.
- [18] Chen, Xiaolei, et al. Pulsed Electrochemical Micromachining for Generating Micro-Dimple Arrays on a Cylindrical Surface with a Flexible Mask. *Applied Surface Science* 343. 2015, Bde. 141 - 147.
- [19] Klocke, F., et al. Experimental Research on the Electrochemical Machining of Modern Titanium- and Nickel-based Alloys for Aero Engine Components. *CIRP Procedia* 6. 2013, Bde. 368 - 372.
- [20] Xu, Kun, et al. Study of Surface Roughness in Wire Electrochemical Micro Machining. *Journal of Materials Processing Technology* 222. 2015, Bde. 103 - 109.
- [21] Jo, Chan Hee, Kim, Bo Hyun und Chu, Chong Nam. Micro Electrochemical Machining for Complex Internal Micro Features. *CIRP Anals - Manufacturing Technology* 58. 2009, Bde. 181 - 184.
- [22] Degenhardt, Helmut. *Elektrochemische Senkbarkeit metallischer Werkstoffe*. Aachen : Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1972.
- [23] Choi, Se Hwan, et al. Analysis of the Electrochemical Behaviours of WC-Co Alloy for Micro ECM. *Journal of Materials Processing Technology* 213. 2013, Bde. 621 - 630.
- [24] Schubert, N., Schneider, M. und Michealis, A. The Mechanism of Anodic Dissolution of Cobalt in Neutral and Alkaline Electrolyte at High Current Density. *Electrochimica Acta* 113. 2013, Bde. 748-754.
- [25] Deconinck, D., Hoogsteen, W. und Deconinck, J. A Temperature Dependent Multi-Ion Model for Time Accurate Numerical Simulation of the Electrochemical Machining Process. Part III: Experimental Validation. *Electrochimica Acta* 103. 2013, Bde. 161 - 173.

- [26] Kalweit, Andreas, et al. *Handbuch für Technisches Produktdesign: Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2012. 978-3-642-02642-3.
- [27] Wielage, B., et al. Carbon Fibres used as Electrode Tools for Micro-Electrochemical Machining. *International Conference on Composite Materials*. 17th, 2009.
- [28] Schmidt, Volkmar M. *Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozessoptimierung*. s.l. : Wiley-VCH Verlag, 2004. 978-352-7299-584.
- [29] Wächter, Michael. *Tabellenbuch zur Chemie - Ergänzendes Online-Angebot zu o.g. Nachschlagewerk*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2012. 978-3-527-32960-1.
- [30] Strähle, Joachim und Schweda, Eberhard. *Lehrbuch der analytischen und präparativen anorganischen Chemie*. Stuttgart : S. Hirzel Verlag, 2006. 978-3-7776-1388-8.
- [31] Förster, Ralf. *Dissertation mit dem Titel: "Untersuchung des Potentials elektrochemischer Senkbearbeitung mit oszillierender Werkzeugelektrode für Strukturierungsaufgaben der Mikrosystemtechnik"*. Göttingen : Cuvillier Verlag Göttingen, 2004. 3-86537-228-7.
- [32] Schrage, Norbert, Kuckelkorn, Ralf und Redbrake, Claudia. Erste-Hilfe-Maßnahmen bei Verätzungen und Verbrennungen der Augen. *Deutsches Ärzteblatt*. 97, 2000, Bd. Heft 3.
- [33] Leidl, Erich. Höchste Vorsicht beim Umgang mit Flusssäure. *Unfallversicherung aktuell, Info für Betriebsärzte und Fachkräfte für Arbeitssicherheit*. 2001.
- [34] PREVOR GmbH. PREVOR Vorbeugen und Retten, Forschungslabor Toxikologie & Umgang mit chemischen Risiken. [Online] [Zitat vom: 11. 06. 2017.] <http://www.prevor.com/de/sie-haben-einen-spritzer-flusssaure-ins-auge-oder-auf-die-haut-bekommen-wie-reagieren-sie-richtig>.
- [35] ECM Technologies. www.electrochemicalmachining.com. [Online] [Zitat vom: 10. 01. 2016.] <http://electrochemicalmachining.com/technology/processes-application>.
- [36] EMAG GmbH & Co. KG. <http://www.emag.com>. [Online] [Zitat vom: 24. 11. 2017.] http://cdn.emag.com/fileadmin/_processed_/csm_Folie14_DE_9dfa813456.jpg.

- [37] PEMTec SNC. www.pemtec.de. [Online] [Zitat vom: 24. 11. 2017.] <http://pemtec.de/branchen/medizintechnik>.
- [38] Bosch Rexroth AG Linear Motion and Assembly Technologies. *Kugelwagen in Hochpräzisionsausführung*. Germany : Bosch Rexroth AG, 2006.
- [39] DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH. <https://www.heidenhain.at>. [Online] [Zitat vom: 25. 11. 2017.] https://www.heidenhain.at/de_AT/produkte/laengenmessgeraete/offene-geraete/auswahlhilfe-lip/lip-471481/.
- [40] Gründler, Peter. *Chemische Sensoren - Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Ingenieure*. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 2004. ISBN 3-540-20984-0.
- [41] DIN 66025. *Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1983.
- [42] ISO 6983. *Numerische Steuerung von Maschinen*. s.l. : ISO - Internationale Organisation für Normierung, 2009.
- [43] TESA Technology, Hexagon Manufacturing Intelligence. www.tesatechnology.com. [Online] [Zitat vom: 20. 03. 2017.] http://www.tesatechnology.com/en-gb/products/tesatast-standard-models-p246.htm?Filtres=F_223:0%2C002#.WNglaH1SBdg.
- [44] Hoffmann Group. www.hoffmann-group.com. [Online] [Zitat vom: 20. 03. 2017.] <https://www.hoffmann-group.com/DE/de/hom/Messtechnik/Messuhren/Fühlhebelmessgerät-Tesatast-Tastarmlänge-11,8-mm/p/436252>.
- [45] Tränkler, Hans-Rolf und Reindl, Leonhard M. *Sensortechnik - Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2014. 978-3-642-29941-4.
- [46] Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG. *Instruction Manual eddyNCDT 3100/3100-SM*. 2008.
- [47] Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG. www.micro-epsilon.com. [Online] [Zitat vom: 20. 03. 2017.] http://www.micro-epsilon.com/displacement-position-sensors/eddy-current-sensor/eddyNCDT_3100/.
- [48] Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG. www.micro-epsilon.de. [Online] [Zitat vom: 20. 03. 2017.] http://www.micro-epsilon.de/images/titles/eddy-current/eddyNCDT_3100_820x220_1.jpg.
- [49] Renishaw plc. *Systeme zur Genauigkeitsprüfung*. Deutschland : s.n., 2012. L-8003-2430-03.

- [50] Alicona Imaging GmbH. www.alicon.com. [Online] [Zitat vom: 08. 06. 2017.] <http://www.alicon.com/de/produkte/>.
- [51] GOM - Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH. www.gom.com. [Online] [Zitat vom: 7. 10. 2016.] <http://www.gom.com/de/>.
- [52] National Instruments Corporation. www.ni.com. [Online] [Zitat vom: 20. 02. 2017.] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/de/nid/203720>.
- [53] Wälder, Konrad und Wälder, Olga. *Statistische Methoden der Qualitätssicherung – Praktische Anwendung mit MINITAB und JMP*. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2013. 978-3-446-43217-8.
- [54] Renishaw. *XL Laser Measurement System Manual*. s.l. : Renishaw plc. , 2007-2011. Version 3.1.1.
- [55] Siebertz, Karl, Bebbber, David van und Hochkirchen, Thomas. *Statistische Versuchsplanung – Design of Experiment (DoE)*. Heidelberg : Springer Verlag, 2010. 978-3-642-05493-8.
- [56] StatPoint Technologies, Inc. *STATGRAPHICS Centurion XVI - User Manual*. USA : s.n., 2009.
- [57] Chen, Zhi, et al. A Rapid One-Step Process for Fabrication of Superhydrophobic Surface by Electrodeposition Method. *Electrochimica Acta* 59. 2012, Bde. 168 - 171.
- [58] Young, T. Water Contact Angle. *Philos. Trans. R. Soc. London* 95. 1805, Bd. 65.
- [59] Marmur, Abraham. Equilibrium Contact Angles: Theory and Measurement. *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects* 116. 1996, Bde. 55 - 61.
- [60] Xu, Wenji, et al. Fabrication of Superhydrophobic Surfaces on Aluminum Substrates using NaNO₃ Electrolytes. *Journal of Mater Sciences* 46. 2011, Bde. 5925 - 5930.
- [61] Song, Jinlong, et al. Rapid Fabrication of Superhydrophobic Surfaces on Copper Substrates by Electrochemical Machining. *Applied Surface Science* 257. 2011, Bde. 10910 - 10916.
- [62] Larmour, Iain A., Bell, Steven E. J. und Saunders, Graham C. Remarkably Simple Fabrication of Superhydrophobic Surfaces Using Electroless Galvanic Deposition. *Angewandte Chemie International* 46. 2007, Bde. 1710 - 1712.

- [63] Zhang, Youfa, et al. Fabrication of Superhydrophobic Copper Surface with Ultra-Low Water Roll Angle. *Applied Surface Science* 256. 2010, Bde. 1883 - 1887.
- [64] Nam, Jung Soo, Lee, Pil-Ho und Lee, Sang Won. Experimental Characterization of Micro-Drilling Process using Nanofluid Minimum Quantity Lubrication. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2011, Bde. 649 - 652.
- [65] Malek, Olivier. Sirris Collective Centre for and by the Technological Industry. [Online] 27. 04 2015. [Zitat vom: 16. 01 2016.] <http://blog.sirris.be/blog/sirris-researches-water-repellent-surfaces-micro-texturing>.
- [66] JHW - Druckluftwerkzeuge Schleifmittel Werkzeugstahl. www.jhwerkzeug.de. [Online] [Zitat vom: 18. 10. 2016.] <http://www.jhwerkzeug.de/produkte/werkzeugstahl/1.2343-x37crmov5-1/werkstoffbeschreibung121.html>.
- [67] Van Damme, S., et al. Numerical Model for Predicting the Efficiency Behaviour during Pulsed Electrochemical Machining of Steel in NaNO₃. *Journal of Applied Electrochemistry*. 36, 2006, Bde. 1-10.
- [68] Chen, Chuangchuang, et al. Study of Micro Groove Machining by Micro ECM. *Procedia CIRP* 42. 2016, Bde. 418 - 422.
- [69] Kirchner, Viola, et al. Electrochemical Machining of Stainless Steel Microelements with ultrashort voltage pulses. *Applied Physics Letters*. Volume 79, 2001, Bd. Number 11.
- [70] Guodong, Liu, et al. Selection and Optimization of Electrolyte for Micro Electrochemical Machining on Stainless Steel 304. *Procedia CIRP* 42. 2016, Bde. 412 - 417.
- [71] Wagner, Thomas. *Dissertation mit dem Titel: High rate electrochemical dissolution of iron-based alloys in NaCl and CaNO₃ electrolytes*. Stuttgart : Institut für Metallforschung der Universität Stuttgart, 2002.
- [72] Ryu, Shi Hyoung und Yu, Jong Sun. Eco-Friendly Micro Electrochemical Machining. 2010.
- [73] Rauch, Peter. <http://www.ib-rauch.de>. [Online] [Zitat vom: 10. 07. 2017.] <http://www.ib-rauch.de/okbau/bauchemie/wolfram.html>.
- [74] Kendrion Kuhnke Automation GmbH. *Chemische Beständigkeit von Kunststoffen*. Bad Bellingen : Bürkle GmbH, 2015.

- [75] Kwon, Min Ho, Shin, Hong Shik und Chu, Chong Nam. Fabrication of a Super-Hydrophobic Surface on Metal using Laser Ablation and Electrodeposition. *Applied Surface Science* 288. 2014, Bde. 222 - 228.
- [76] Schörghofer, Paul. *Elektrochemische Mikrobearbeitung mit ultrakurzen Spannungspulsen von Stahl 1.4301, Bachelorarbeit*. Wien : Technische Universität Wien, 2012.
- [77] Lechner, Christoph. *Dissertation mit dem Titel: "Oberflächenmodifikation unter Einsatz der Technologie des Schlagverdichtens (Machine Hammer Peening)"*. Wien : TU Wien, 2014.
- [78] Generalic, Eni. Periodic Table of the Elements, Calculators, and Printable Materials. [Online] KTF-Split, 22. 04 2016. [Zitat vom: 27. 04 2016.] http://www.periodni.com/de/herstellung_von_losungen.php.

13 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einordnung des elektrochemischen Abtragens innerhalb der Struktur der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 (vgl. [3], S. 7ff.), DIN 8590 (vgl. [4], S. 23) und VDI 3401 (vgl. [5], S. 3)	5
Abbildung 2: Schema einer Elektrolyseapparatur (vgl. [7], S.26)	6
Abbildung 3: Einflussfaktoren beim elektrochemischen Bearbeiten (vgl. [12], S.11) ...	8
Abbildung 4: Vorgänge bei der elektrochemischen Metallauflösung (vgl. [9], S. 134, [8], S. 241ff., [13], S. 234)	9
Abbildung 5: Strom-Spannungs-Kurve der Metallauflösung bei Bildung einer passiven Deckschicht (vgl. [13], S. 236).....	12
Abbildung 6: Elektrisches Ersatzschaltbild des elektrochemischen Abtragprozesses (vgl. [17], S. 10)	14
Abbildung 7: Sprungantwort und Puls-Pause-Ratio (Puls-Pause-Verhältnis).....	15
Abbildung 8: Kenngrößen der elektrochemischen Bearbeitung mit mechanischer Oszillation der Werkzeugelektrode (vgl. [12], S.21).....	16
Abbildung 9: Mittels Scheibenelektrode erzeugte Hinterschnitte mit geringer Oberflächenrauheit (vgl. [21], S. 4).....	18
Abbildung 10: Konzentrationsabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit (vgl. [28], S.43f.)	22
Abbildung 11: Temperaturabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit, (vgl. [28], S.43f.)	23
Abbildung 12: Elektrolytbad ohne Spülung.....	25
Abbildung 13: Elektrolytstrom mit Zufuhr über die Elektrode.....	26
Abbildung 14: Elektrolytstrom mit seitlicher Zuführung.....	27
Abbildung 15: Elektrolytkreislauf mit Abscheidung und Aufbereitung.....	28
Abbildung 16: Anwendungsbeispiel 1: Kopf eines Rasierapparates (links), feine Mikrostrukturen 20 x 30 mm (rechts) (vgl. [9], S. 166).....	32
Abbildung 17: Anwendungsbeispiel 2: Finishing eines Turbinenblisks (vgl. [36])	32
Abbildung 18: Anwendungsbeispiel 3: Künstliches Knie- / Hüftgelenk (vgl. [37])	32
Abbildung 19: ECMTEC "Micro-Production" μ PECM-Versuchsanlage.....	33
Abbildung 20: ECMTEC „Micro-Production“, Achsen und Orientierung	34
Abbildung 21: Schemadarstellung der Bearbeitungszelle mit Potentiostat und Galvanostat (vgl. [17], S. 10)	36
Abbildung 22: Benutzeroberfläche der ECMTEC Software, Startfenster.....	37
Abbildung 23: Bedienfeld der elektrischen Parameter des Pulsgenerators	38
Abbildung 24: Displaydarstellung der tatsächlich und aktuell gemessenen Prozessparameter	38
Abbildung 25: Anpassung der überlagerten Werkzeugbewegung (Vorschub während der Bearbeitung).....	41

Abbildung 26: Versuchsaufbau (oben: Gesamtansicht, unten: Detailansicht)	42
Abbildung 27: TESA Tesatest S D28 (vgl. [44]).....	43
Abbildung 28: Micro-Epsilon eddyNCDT 3100 (vgl. [48])	44
Abbildung 29: Renishaw XL-80 Laserquelle.....	44
Abbildung 30: Funktionsprinzip Laserinterferometer (vgl. [49], S. 6).....	45
Abbildung 31: Dino-Lite AM2111 Basic, USB-Mikroskop	46
Abbildung 32: Reflecta DigiMicroscope USB.....	47
Abbildung 33: Stereomikroskop Krüss	48
Abbildung 34: Alicona Infinite Focus G5 (vgl. [50]).....	49
Abbildung 35: Keyence VW-9000.....	50
Abbildung 36: National Instruments Digitizer USB-5133 (vgl. [52])	50
Abbildung 37: Aufbau von Drehspindel und Werkzeughalter	52
Abbildung 38: Versuchsaufbau der Rundheitsmessung Nr. I	53
Abbildung 39: Versuchsaufbau der Rundheitsmessung Nr. II	53
Abbildung 40: Anordnung des Eddy-Sensors zur Messung der Rundheitsabweichung in der Spindelwelle (Versuchsaufbau Nr. II)	54
Abbildung 41: Kalibrierkurve entlang der Y-Achse, Eddy NCDT 3100	55
Abbildung 42: Messaufbau der dynamischen Messung des Rundheitsfehlers am kalibrierten Prüfzylinder mittels berührungslosem Sensor (Eddy)	56
Abbildung 43: Ergebnis der taktilen, statischen Rundheitsmessung an der Spindelwelle mittels Fühlhebelmessgerät in 5°-Schritten	57
Abbildung 44: Ergebnis der kontaktlosen, dynamischen Rundheitsmessung an der Spindelwelle mittels Wirbelstromsensor	58
Abbildung 45: FFT des Signalverlaufes der berührungslosen Rundheitsmessung und der normierten taktilen Rundheitsmessung, Abtastrate 14400 Hz, Hanning- Fensterfunktion.....	59
Abbildung 46: Zusammengefasstes Ergebnis der kontaktlosen Rundheitsmessung an 3 Messpositionen mittels Wirbelstromsensor	61
Abbildung 47: Typische Systemkonfiguration mit Renishaw XL-80 zur Messung der Position (vgl. [54], linear measurement set-up)	64
Abbildung 48: Versuchsaufbau der Positionsmessung (X-Achse) und Orientierung der beweglichen Achsen sowie deren Vorzeichen gemäß Maschinensteuerung	65
Abbildung 49: Positionsfehler der X-Achse über eine Messlänge von 90 mm und 5 Durchläufe	66
Abbildung 50: Positionierfehler, Reproduzierbarkeit und systematischer Positionierfehler nach ISO 230-2 (2014), X-Achse.....	67
Abbildung 51: Typische Systemkonfiguration mit Renishaw XL-80 zur Messung des Kippwinkels (vgl. [54], angular measurement set-up).....	69
Abbildung 52: Renishaw XL-80, Versuchsaufbau zur Winkelmessung an der Y-Achse (Anordnung: Y/Z-Ebene)	70

Abbildung 53: Kippwinkelfehler der Y-Achse über eine Messlänge von 90 mm bei fünf Durchläufen (Y/Z-Ebene).....	72
Abbildung 54: Kippwinkelfehler, Reproduzierbarkeit und systematischer Positionierfehler nach ISO 230-2 (2014), Y-Achse (Y/Z-Ebene)	74
Abbildung 55: Typische Systemkonfiguration mit Renishaw XL-80 zur Messung des Kippwinkels (vgl. [54], straightness measurement set-up)	75
Abbildung 56: Messdaten (Rohdaten) der Geradheitsmessung der Y-Achse (Y/Z-Ebene), Renishaw XCal-View	77
Abbildung 57: Geradheitsauswertung mittels „Gerade durch die Endpunkte“, Y-Achse (Y/Z-Ebene), Renishaw XCal-View	77
Abbildung 58: Geradheitsauswertung durch Bildung der Summe der kleinsten Fehlerquadrate, Y-Achse (Y/Z-Ebene), Renishaw XCal-View	78
Abbildung 59: Geradheitsauswertung nach VDI 2617, Y-Achse (Y/Z-Ebene), Renishaw XCal-View	78
Abbildung 60: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Pulsgenerators.....	80
Abbildung 61: Teilfaktorielle Versuchsplanung.....	81
Abbildung 62: Spannungssignal des Pulsgenerators	83
Abbildung 63: Standardisierte Effekte der ausgewählten Einflussgrößen auf die Zeitkonstante τ des generierten Spannungs-Pulses (Pareto-Diagramm)	85
Abbildung 64: Standardisierte Effekte der ausgewählten Einflussgrößen auf das Pulsenergieverhältnis des generierten Spannungs-Pulses (Pareto-Diagramm).....	85
Abbildung 65: Haupteffekte der Prozessparameter auf die Zeitkonstante τ	86
Abbildung 66: Haupteffekte der Prozessparameter auf das Pulsenergieverhältnis... ..	86
Abbildung 67: Optimierungsfunktion für das Pulsenergieverhältnis (PEV) und die Zeitkonstante τ	87
Abbildung 68: Wasserkontaktwinkel Θ_{ac} (links) und Beschleunigung $a > 0$ des Wassertropfens nach Erreichen des Wasserkippwinkels α_K (rechts).....	90
Abbildung 69: Durch Laserabtrag und anschließende elektrochemische Abscheidung von Kupfer erzeugtes Mikropolsterfeld (vgl. [2], S. 4ff.).....	91
Abbildung 70: Das Toolingbecken zur Herstellung von zylindrischen Werkzeugen ..	92
Abbildung 71: Kegelherstellung mit 30° Öffnungswinkel an der abgewinkelten Abrichtplatte aus Wolfram	93
Abbildung 72: Ergebnis der Durchmesserreduktion (Versuch Nr. 65)	96
Abbildung 73: Ergebnis der Erzeugung eines Werkzeuges mit großem Aspektverhältnis (Versuch Nr. 70).....	96
Abbildung 74: Kegelspitze mit einem Radius von 17 μm (Versuch Nr. 111)	97
Abbildung 75: Ergebnis der Versuche zur Herstellung einer Pyramidenspitze (Versuch Nr. 93)	97
Abbildung 76: Ergebnis der Herstellung eines Werkzeugkeils mit guter Winkelabbildung (Versuch Nr. 133).....	98

Abbildung 77: Ergebnis der Herstellung eines Werkzeugkeils mit verbesserter Oberflächenrauheit (Versuch Nr. 149).....	99
Abbildung 78: Messmethode zur Bewertung der Kufenform an der Werkzeugelektrode (links Versuch Nr. 149, rechts Versuch Nr. 161).....	100
Abbildung 79: Lochmuster 10 (Versuch Nr. 66).....	103
Abbildung 80: Werkzeug mit starkem Verschleiß (nach Versuch Nr. 66)	103
Abbildung 81: Lochmuster Pyramidenform, Schichtdarstellung (Versuch Nr. 85) ...	104
Abbildung 82: Erzeugtes Muster in Abhängigkeit des Bahnabstandes a	105
Abbildung 83: Bahnmuster in Wolfram (Versuch Nr. 154)	106
Abbildung 84: Gekreuzte Struktur in Wolfram (Versuch Nr. 159)	107
Abbildung 85: Bearbeitung von 1.2343 in 2 M NaNO ₃ (Versuch Nr. 140)	111
Abbildung 86: Oberflächenveränderung an Werkstück (1.2343) links und Werkzeug (W) rechts, Elektrolyt: 0,2 M H ₂ SO ₄ (Versuch Nr. 164).....	112
Abbildung 87: Bearbeitungsergebnisse in 1.2343 mit 0,2 M H ₂ SO ₄ -Elektrolytlösung (Versuch Nr. 147)	114
Abbildung 88: Bearbeitungsergebnisse in 1.2343 mit 1 M HCl-Elektrolytlösung (Versuch Nr. 217)	115
Abbildung 89: Gekreuzte Struktur in 1.2343 mit Schnittebene und Falschfarbenbild (Versuch Nr. 231)	116
Abbildung 90: Korrosion am Werkstück (1.2343) nach elektrochemischer Bearbeitung mit HCl als Elektrolyt	116
Abbildung 91: Stempелеlektrode für die ECM-Bearbeitung mit höherer Flächenleistung	117
Abbildung 92: Ausrichtung eines flächigen Werkzeuges zum Werkstück	118
Abbildung 93: Beispiel eines möglichen Prägestempels für den Einsatz im MHP-Verfahren.....	118
Abbildung 94: Entwickeltes Spülbecken und elektrische Kontaktbrücke zwischen Werkstück und Grundplatte als Schnittansicht	121

14 Formelverzeichnis

(1) Reaktionsgleichung: Wasserstoffbildung an der Kathode	11
(2) Elektrochemische Abtraggeschwindigkeit	11
(3) Stromdichte zwischen Anode und Kathode.....	11
(4) Arbeitsspaltbreite in Abhängigkeit der Stromdichte.....	14
(5) Zeitkonstante eines ladenden Kondensators	14
(6) Elektrischer Widerstand zwischen den Elektroden	22
(7) Spezifische Leitfähigkeit eines Elektrolyten	22
(8) Molare Leitfähigkeit eines Elektrolyten.....	23
(9) Reaktionsgleichung: Bildung von sechswertigem Chrom (VI).....	29
(10) Reaktionsgleichung: Bildung von toxischem Stickstoffdioxid	29
(11) Abstand zwischen Sensor und Spindelwelle umgelegt auf die Y-Achse	55
(12) Spannungs-Ladekurve eines Kondensators	82
(13) Zeitkonstante eines Kondensators.....	83
(14) Pulsenergie aus der Spannungs-Ladekurve bei konstantem Strom	83
(15) Pulsenergieverhältnis.....	84

15 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich trennender Bearbeitungsverfahren	13
Tabelle 2: Elektrolytlösungen zur elektrochemischen Senkbearbeitung sowie deren Vor- und Nachteile (vgl. [22], S. 50)	21
Tabelle 3: Elektrolyt-Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Konzentration (vgl. [29], S.58)	23
Tabelle 4: Löslichkeitsprodukte und theoretische pH-Bereiche der Fällung von Hydroxiden (vgl. [30], S. 88)	24
Tabelle 5: Temperaturkoeffizienten verschiedener Ionen (vgl. [29], S.58)	24
Tabelle 6: Häufig für die elektrochemische Bearbeitung eingesetzte Chemikalien, deren Gefahrensymbole sowie R- und S-Sätze	29
Tabelle 7: Einsatzgebiete des ECM-Verfahrens und Anwendungsbeispiele	31
Tabelle 8: Technische Daten ECMTEC "Micro-Production"	35
Tabelle 9: Systemspezifikationen Renishaw XL-80.....	46
Tabelle 10: Positionierabweichung der A-Achse bei unterschiedlichen Schrittgrößen	62
Tabelle 11: Drehzahlabweichung der A-Achse bei unterschiedlichen Drehzahlen....	62
Tabelle 12: Gewählte Messoptionen und deren Beschreibung, Renishaw XL-80 (vgl. [49], S. 11)	63
Tabelle 13: Ergebnisse der Positionsmessung, Auswertung nach ISO 230-2 (2014) mit der Software XCal-View (Renishaw)	68
Tabelle 14: Vorzeichenkonvention bei der Kippwinkelmessung am Objekt des Winkelreflektors.....	71
Tabelle 15: Ergebnisse der Kippwinkelmessung, Auswertung nach ISO 230-2 (2014) mit der Software XCal-View (Renishaw)	73
Tabelle 16: Vorzeichenkonvention bei der Geradheitsmessung am Objekt des Geradheitsreflektors	76
Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse der Geradheitsmessung nach VDI 2617 (1989) und Renishaw (2012)	79
Tabelle 18: Parameterbereiche bei der Überprüfung des Pulsgenerators.....	82
Tabelle 19: Parameter gemäß kombinierter Optimierungsfunktion für das Pulsenergieverhältnis PEV und die Zeitkonstante τ	87
Tabelle 20: Parameter gemäß kombinierter Optimierungsfunktion für das Pulsenergieverhältnis PEV und die Zeitkonstante τ bei fester Pulsdauer PD.....	88
Tabelle 21: Ergebnisse der Rauheitsmessung an geläppten Wolframproben	99
Tabelle 22: Spezifische Kennwerte zur Bewertung der Keilqualität.....	100
Tabelle 23: Einflussfaktoren auf die Bearbeitungsqualität beim elektrochemischen Abtragen mit keilförmigem Werkzeug.....	108

Tabelle 24: Werkstoffzusammensetzung X37CrMoV5-1 (vgl. [66] sowie Anhang IV)	109
Tabelle 25: Elektrolyte zur Bearbeitung von Stahl	109
Tabelle 26: Elektrochemische Bearbeitung von Stahlproben (1.2343), Versuchsübersicht	110
Tabelle 27: Chemisch-physikalische Eigenschaften ausgewählter Hartmetalle	119
Tabelle 28: Chemische Beständigkeit ausgewählter Kunststoffe bei zwei Temperaturen 20 °C / 50 °C (vgl. [74])	120

16 Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen	
altgr.	altgriechisch
ca.	circa
bzw.	beziehungsweise
chem.	chemisch(e)
engl.	English
et al.	und andere
f.	inklusive der folgenden Seite
ff.	inklusive der folgenden Seiten
max.	maximal
lt.	laut, gemäß
S.	Seite
sog.	sogenannt
vgl.	vergleiche mit
usw.	und so weiter
z.B.	zum Beispiel

Technische Abkürzungen	
μPECM	Micro Pulsed Electro Chemical Machining
3D	dreidimensional
C	Gefahrensymbol: Ätzend
CNC	Computerized Numerical Control
DE	Deutschland
DIN	Deutsches Institut für Normung
DL	Double Layer (Doppelschicht)
DOE	Design of Experiment
EC	Electro Chemical (Elektrochemisch)
ECM	Electro Chemical Machining (Elektrochemische Bearbeitung)
EDM	Electrical Discharge Machining (Funkenerosive Bearbeitung)
EU	Europäische Union
Fa.	Firma
FAS	Fluoralkylsilan
FFT	Fast Fourier Transformation
FPM	Fluorkautschuk (auch FKM; Handelsname: Viton)
G-Code	General Code
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GOM	Gesellschaft für Optische Messtechnik

HDPE	High Density Polyethylen
HDR	High Dynamic Range Image
HM	Hartmetall
HRC	Hardness Rockwell, Scale C (Cone)
IFM	Infinite Focus Measurement
ISO	International Organization for Standardization
LDPE	Low Density Polyethylen
LED	Light Emitting Diode
MAK	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration
MHP	Machine Hammer Peening
N	Gefahrensymbol: Umweltgefährlich
NI	National Instruments
O	Gefahrensymbol: Brandfördernd
PC	Personal Computer
PD	Pulsdauer
PECM	Pulsed Electro Chemical Machining
PEV	Pulsenergieverhältnis
PP	Polypropylen
ppr.	Pulse/Pause Ratio
PTFE	Polytetrafluorethylen (Handelsname: Teflon)
PW	Pulsweite
R-Satz	Risk-Satz
RC-Glied	elektrische Schaltung aus Widerstand und Kondensator
S-Satz	Safety-Satz
STL	Stereo Lithography
T	Gefahrensymbol: Giftig
T+	Gefahrensymbol: Sehr giftig
TU	Technische Universität
USB	Universal Serial Bus
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VGA	Video Graphics Array
Xn	Gefahrensymbol: Gesundheitsschädlich

Chemische Abkürzungen	
AgOH	Silberhydroxid
Al	Aluminium
Al(OH) ₃	Aluminium (III) Hydroxid
Be(OH) ₂	Berylliumhydroxid
C	Kohlenstoff
C ₆ H ₈ O ₇	Citronensäure
Ca(OH) ₂	Calciumhydroxid

$\text{Cd}(\text{OH})_2$	Cadmiumhydroxid
Co	Kobalt
CO_2	Kohlenstoffdioxid
$\text{Co}(\text{OH})_2$	Cobalthydroxid
Cr	Chrom
$\text{Cr}(\text{OH})_2$	Chromhydroxid
CrO_3	Chrom(VI)-Oxid
Cu	Kupfer
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	Kupferhydroxid
e^-	Elektron
F^+	Fluorion
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Eisenhydroxid
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	Eisen (III) Hydroxid
FeSO_4	Eisen-(II)-Sulfat
H	Wasserstoff
H^+	Wasserstoffion
H_2	Molekularer Wasserstoff
H_2O	Wasser
H_2SO_4	Schwefelsäure
HCl	Chlorwasserstoff (in Wasser gelöst: Salzsäure)
HF	Fluorwasserstoff (in Wasser gelöst: Flusssäure)
HNO_3	Salpetersäure
K^+	Kaliumion
KCl	Kaliumchlorid
KNO_3	Kaliumnitrat
Me	Metallatom
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	Magnesiumhydroxid
$\text{Mn}(\text{OH})_2$	Manganhydroxid
Mo	Molybdän
NO_3^-	Nitrat
Na^+	Natriumion
NaCl	Natriumchlorid
NaClO_3	Natriumchlorat
NaF	Natriumfluorid
NaNO_3	Natriumnitrat
NaOH	Natriumhydroxid
Na_2SO_4	Natriumsulfat
Na_3Cit ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$)	Trinatrium Citrat
Nd:YAG / $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
NO_2	Stickstoffdioxid

Ni	Nickel
Ni(OH) ₂	Nickelhydroxid
O	Sauerstoff
O ₂	Molekularer Sauerstoff
OH ⁻	Hydroxidion
Sb(OH) ₃	Antimon (III) Hydroxid
Si	Silizium
Sn(OH) ₂	Zinnhydroxid
Ti	Titan
V	Vanadium
W	Wolfram
WC	Wolframkarbid
WO ₃	Wolframtrioxid
Zn(OH) ₂	Zinkhydroxid

Formelzeichen		
Zeichen	Bezeichnung	Einheit (SI)
a	Beschleunigung	m/s ²
A	Pulsamplitude	mV
a _B	Bahnabstand	µm
AW	Ausschaltwinkel	°
c	Stoffmengenkonzentration	mol/dm ³
C _{DL}	Doppelschicht-Kapazität	F
E _P	Pulsenergie	W
EW	Einschaltwinkel	°
F	Fläche	mm ²
h	Abstand zwischen den Elektroden	µm
h _B	Eindringtiefe	µm
I	elektrischer Strom	A
I, I _i , I _(t)	elektrischer Strom	A
I _{GE}	Strom durch die Gegenelektrode	µA
J	Stromdichte	A/mm ²
J _R	Reststromdichte	A/mm ²
R, R _i	elektrischer Widerstand	Ω
R ²	Bestimmtheitsmaß	-
R _a	Mittenrauwert (einer Oberfläche)	nm
s	Arbeitsspalt	µm
S _a	Arithmetischer Mittelwert der Höhen der ausgewählten Fläche	nm
S _q	Quadratischer Mittelwert der Höhen der ausgewählten Fläche	nm

S_z	Maximale Höhe der ausgewählten Fläche	μm
T	Toolspannung	mV
t_{aus}	Relaxationszeit	ms
t_{ein}	Pulsperiode	ms
U, U_i , $U_{(t)}$	elektrische Spannung	V
U_{GE}	Spannung an der Gegenelektrode	mV
U_{max}	Maximale Spannung	V
v_a	Abtraggeschwindigkeit	
V_{SP}	Abtragsvolumen	mm^3
α	Signifikanzniveau	-
α_K	Wasserkippwinkel	$^\circ$
α_T	Temperaturkoeffizient	K^{-1}
ϑ	Temperatur	$^\circ\text{C}$
Θ_{ac}	Wasserkontaktwinkel	$^\circ$
κ	spezifische Leitfähigkeit	S/m
Λ	molare Leitfähigkeit	$\text{S}\cdot\text{cm}^2/\text{mol}$
λ_c	Grenzwellenlänge	μm
τ_i	Zeitkonstante	ms
φ	Elektroden-Potential	V
φ_0	Null-Potential	V
φ_F	Flade-Potential	V

Anhang I

Versuchsparameter (1/2)

Versuchs-Nr.	Anode	Kathode	Elektrolyt	Toolspannung T [mV]	Spannungsamplitude A [mV]	Pulsweite p [ns]	Puls/Pause-Ratio ppr	konst. Strom durch d. Gegenelektrode [μ A]	Konstante Spannung an d. Gegenelektrode [mV]	Oberer Schwellwert [mV]	Unterer Schwellwert [mV]	Vorschub F / Schrittweite VOR	Spindeldrehzahl
65	Wolfram D = 500 μ m	Wolfram, 20x20x1 mm rechtwinkelig	NaOH 2,15 mol/l	-200	2600	600	4	(100)	(1800)	500	-1500	F9 / 0,015	0,5
66	Wolfram D = 500 μ m	Wolfram, 20x20x1 mm rechtwinkelig	NaOH 2,15 mol/l	-100	2500	600	4	(100)	(1800)	500	-1500	F9 / 0,015	-
70	Wolfram D = 500 μ m	Wolfram, 20x20x3 mm rechtwinkelig	NaOH 2,15 mol/l	-200	2600	500	4	(100)	(1800)	9999	-9999	F9 / 0,008	0,4
85	Wolfram D = 500 μ m	Wolfram, 20x20x3 mm rechtwinkelig	NaOH 2,15 mol/l	-100	3200	150	8	1000	(1800)	1500	-1500	F2 / 0,1	-
93	Wolfram D = 500 μ m	Wolfram, 20x20x3 mm 15° geschliffen	NaOH 1 mol/l	-100	6000	80	12	1500	(1800)	500	-500	F9 / 0,0025	-
111	Wolfram D = 1000 μ m	Wolfram, 20x20x3 mm 15° geschliffen	NaOH 1 mol/l	-100	5600	100	12	800	(1800)	3000	-3000	F0 / 0,001	-
133	Wolfram D = 1000 μ m	Wolfram, 20x20x3 mm 15° geschliffen	NaOH 1 mol/l	-100	5700 (6530)	200	6	1200	(1800)	1500	-1500	F9 / 0,001	-
140	Wolfram D = 1000 μ m	1.2343, 20x20x5 mm	H ₂ SO ₄ 0,2 mol/l	-100	7000 (7800)	1000	2	2000	(1800)	2000	-2000	F9 / 0,005	-

Versuchsparameter (2/2)

Versuchs-Nr.	Anode	Kathode	Elektrolyt	Toolspannung T [mV]	Spannungsamplitude A [mV]	Pulsweite p [ns]	Puls/Pause-Ratio ppr	konst. Strom durch d. Gegenelektrode [µA]	Konstante Spannung an d. Gegenelektrode [mV]	Oberer Schwellwert [mV]	Unterer Schwellwert [mV]	Vorschub F / Schrittweite VOR	Spindeldrehzahl
147	Wolfram D = 1000 µm	1.2343, 20x20x5 mm	H ₂ SO ₄ 0,2 mol/l	-50	3000 (3600)	200	2	500	(1800)	2000	-2000	F9 / 0,006	-
149	Wolfram D = 1000 µm	Wolfram, 20x20x3 mm 14,1° poliert	NaOH 1 mol/l	-100	5900 (6025)	150	6	1200	(1800)	1500	-1500	F9 / 0,001	-
154	Wolfram D = 1000 µm	Wolfram, 20x20x3 mm 14,1° poliert	NaOH 1 mol/l	-100	4600 (5086)	100	6	1200	(1800)	300	-300	F5 / 0,015	-
159	Wolfram D = 1000 µm	Wolfram, 20x20x3 mm 14,1° poliert	NaOH 1 mol/l	-100	4600 (5086)	100	6	1200	(1800)	300	-300	F5 / 0,015	-
161	Wolfram D = 1000 µm	Wolfram, 20x20x3 mm 14,1° poliert	NaOH 1 mol/l	-100	4400 (4730)	150	12	1200	(1800)	1500	-1500	F5 / 0,0012	-
164	Wolfram D = 1000 µm	1.2343, 20x20x5 mm	H ₂ SO ₄ 0,2 mol/l	-50	3000 (3600)	150	2	500	(1800)	9000	-9000	F9 / 0,004	-
231	Wolfram D = 1000 µm	1.2343, 20x20x5 mm	1 M HCl	-100	2000 (2220)	150	4	1000	(1800)	2000	-2000	F5 / 0,008	-
	Funktion												
a	Antasten bei sehr feinen Spitzengeometrien		-	-300	200	150	6	100	(1800)	80	-80	-	-

Anhang II

„Anleitung zum Herstellen von Elektrolytlösungen“

WICHTIG: Die persönliche Schutzausrüstung (PSA) ist beim Umgang mit und der Manipulation von Elektrolyten unbedingt zu tragen.

Dabei ist es notwendig, sich vorab genauestens darüber zu informieren, welche Chemikalien zum Einsatz kommen und welche PSA dem entsprechend zu tragen ist. Diese Verantwortung obliegt jedem Mitarbeiter selbst!

Als Leitfaden zur geeigneten Auswahl der PSA werden folgende Quellen angeführt:

- Chemische Beständigkeit von Kunststoffen gegenüber Chemikalien in unterschiedlichen Konzentrationen: [ics_pdf_chemische-bestaendigkeit-2015_de.pdf](#)
- Permeationszeiten und damit chemische Beständigkeit von Sicherheitshandschuhen der Marke Ansell: http://industrialcatalogue.ansell.eu/de/chemicalagentsperstyle?field_style_nid=105

Je nachdem, ob es sich bei den Ausgangsstoffen um wässrige Lösungen oder um Feststoffe z.B. in Form von Salzen handelt, ist die Vorgangsweise beim Mischen der Ziellösung eine andere. Unter Ziellösung wird hier die vor dem Mischen festgelegte, gewünschte Lösungskonzentration verstanden. Unter einer wässrigen Lösung versteht man einen in Wasser vorverdünnten Stoff. Die Information über das Verhältnis der Vorverdünnung kann entweder als Stoffmengenkonzentration in mol / Liter oder als Massenkonzentration in g / Liter angegeben werden. Eine veraltete aber immer noch übliche Schreibweise der Stoffmengenkonzentration lautet z.B. „2 M HCL“ für eine wässrige Lösung von HCL - dies bedeutet 2 Mol pro Liter (mol/l).

- Online-Berechnungshilfe:
http://www.periodni.com/de/herstellung_von_losungen.php?scq=H2SO4

Zur einfachen Mischung diverser Konzentrationen ist die Angabe in mol/l jedoch unpraktisch. Für die Umrechnung der Stoffmengenkonzentrationen in Gramm pro Liter benötigt man die molare Masse des jeweiligen Stoffes. Diese findet man in diversen Tabellenbüchern.

Beispiel 1: Ziellösung: 1 Liter 0,2 mol/l HCL (wässrige Lösung)

Zur Verfügung stehende Ausgangsstoffe: 2 M HCL (wässrige Lösung),
destilliertes Wasser H₂O

Dazu füllt man 100 ml der 2 M HCL-Lösung in einen Messzylinder und füllt diesen auf 1000 ml mit destilliertem Wasser auf. Anschließend gibt man einen Magnetrührstab hinzu und lässt die Lösung ca. 10 min mittels Magnetrührgerät rühren.

Beispiel 2: Ziellösung: 200 ml 0,4 M NaNO₃ (wässrige Lösung)

Zur Verfügung stehende Ausgangsstoffe: NaNO₃ (Salz in Pulverform), destilliertes Wasser H₂O

NaNO₃ hat eine Molmasse von 84,994 g/mol. Da es sich um einen Feststoff handelt ist meist auch die Reinheit angegeben, wir gehen hier in diesem Beispiel von 100 % aus. Die errechnete notwendige Masse NaNO₃ beträgt 6,7995 g. Um nun die Ziellösung herzustellen, gibt man die errechnete Masse NaNO₃ mit einem Spatel in den Messzylinder und füllt ca. 100 ml destilliertes Wasser auf. Anschließend gibt man einen Magnetrührstab hinein und lässt die Lösung ca. 10 min mittels Magnetrührgerät rühren. Da es beim Lösen des Salzes im Wasser zu einer Abnahme des Volumens kommen kann, wird erst nach dieser Vorverdünnung auf das Ziellösungsvolumen korrigiert. Dazu füllt man den Messzylinder auf 200 ml mit destilliertem Wasser auf und lässt nochmals ca. 10 min rühren.

Beispiel 3: Ziellösung: 500 ml 0,5 M NaNO₃ + 0,2 M H₂SO₄ (wässrige Lösung)

Zur Verfügung stehende Ausgangsstoffe: NaNO₃ (Salz in Pulverform, Reinheit: 99,1%), 0,5 mol/l H₂SO₄ (wässrige Lösung), destilliertes Wasser H₂O.

Aus den Angaben zur Ziellösung ergeben sich folgende Massenkonzentrationen:

$$0,5 \text{ mol/l NaNO}_3 \text{ in H}_2\text{O} \rightarrow 0,5 \text{ mol/l} * 84,99 \text{ g/mol} = \mathbf{42,50 \text{ g/l}}$$

$$0,2 \text{ mol/l H}_2\text{SO}_4 \text{ in H}_2\text{O} \rightarrow 0,2 \text{ mol/l} * 98,08 \text{ g/mol} = \mathbf{19,62 \text{ g/l}}$$

Da es sich bei Natriumnitrat NaNO₃ um ein festes Salz mit einer Reinheit von 99,1% handelt, kann man nach obiger Konzentrationsgleichung relativ leicht eine 0,5 mol/l-Lösung herstellen. Die benötigte Menge an NaNO₃ ergibt sich aus folgender Berechnung:

$$0,5 \text{ mol/l NaNO}_3 \text{ in H}_2\text{O} \rightarrow 42,50 \text{ g/l} \rightarrow 21,25 \text{ g pro 500 ml}$$

$$\text{Reinheit} = 99,1\% \rightarrow 21,25 \text{ g} / 0,991 = 21,44 \text{ g}$$

Die benutzte Schwefelsäure hat eine Konzentration von 0,5 mol/l und muss daher auf 0,2 mol/l vorverdünnt werden.

Zielkonzentration:

$$19,62 \text{ g/l} \rightarrow 9,81 \text{ g pro 500 ml}$$

Zur Verfügung stehende Lösung:

$$0,5 \text{ mol/l H}_2\text{SO}_4 \text{ in H}_2\text{O} \rightarrow 0,5 \text{ mol/l} * 98,08 \text{ g/mol} = 49,04 \text{ g/l}$$
$$\rightarrow 24,52 \text{ g pro 500 ml}$$

Verhältnis zwischen Ziellösung und zur Verfügung stehender Lösung:

$$\frac{9,81 \text{ g/500ml}}{24,52 \text{ g/l}} = 0,4001 \approx 40\%$$

Das bedeutet, dass zur Herstellung einer 0,2 M vorverdünnten Lösung auf 4 Teile 0,5 M Lösung 6 Teile destilliertes Wasser gefüllt werden müssen.

Zur Herstellung einer 500 ml Ziellösung mit 0,2 M H₂SO₄ benötigt man daher 500 ml * 40% = 200 ml der 0,5 M H₂SO₄-Lösung. Zur Mischung wird ein Messbecher mit geeigneter Skala und aus beständigem Material wie z.B. Polypropylen (PP) mit den errechneten 200 ml der 0,5 M H₂SO₄-Lösung gefüllt, 21,44 g NaNO₃ zugegeben und anschließend mit destilliertem H₂O auf 400 ml Volumen aufgefüllt. Nach Zugabe des Magnetrührstabes wird die Lösung ca. 10 min gerührt, danach der Magnetstab wieder entfernt und mit destilliertem H₂O auf das Zielvolumen von 500 ml aufgefüllt.

Anschließend ist die Lösung in ein geeignetes verschließbares Gefäß zu füllen und ordnungsgemäß zu beschriften.

→ Lösungen und Chemikalien stets und unbedingt ordnungsgemäß Beschriften!

Hinweise zu erhöhtem Gefahrenpotential:

- Bei der elektrochemischen Bearbeitung von Stählen mit hohem Chromanteil besteht die Gefahr der Bildung von giftigem Chrom(VI).
- Bei der Nutzung eines Natriumnitratelektrolyten können durch Reduktionsreaktionen an der Werkzeugkathode giftige Stickstoffverbindungen (z.B. Ammoniak, Nitrit, Hydroxilamin) entstehen. Diese giftigen Verbindungen müssen durch Zugabe geeigneter Substanzen, wie beispielsweise Eisensulfat oder Amidosulfonsäure entsprechend entgiftet werden.

Für weitere Informationen siehe Anhang III.

Anhang III

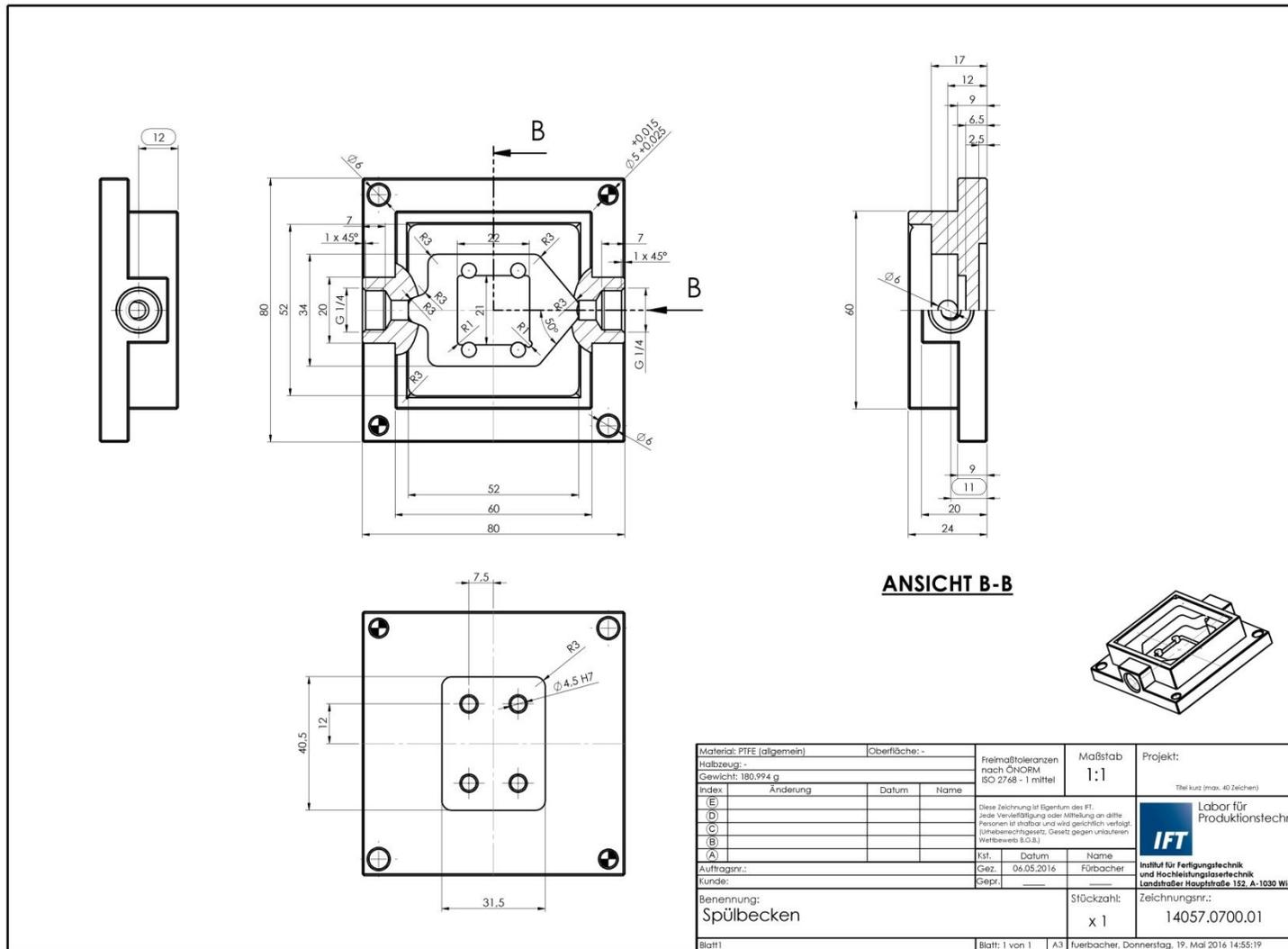
Risiko- und Sicherheitssätze der eingesetzten Chemikalien

R-Satz- Nummer	Bedeutung
8	Feuergefahr bei Berührung mit brennbaren Stoffen.
9	Explosionsgefahr bei Mischung mit brennbaren Stoffen.
22	Gesundheitsschädlich beim Verschlucken.
23	Giftig beim Einatmen.
24/25	Giftig bei Berührung mit der Haut und beim Verschlucken.
26/27/28	Sehr giftig beim Einatmen, Verschlucken und Berührung mit der Haut.
35	Verursacht schwere Verätzungen.
42/43	Sensibilisierung durch Einatmen und Hautkontakt möglich.
45	Kann Krebs erzeugen.
46	Kann vererbare Schäden verursachen.
48/23	Giftig: Gefahr ernster Gesundheitsschäden bei längerer Exposition durch Einatmen.
50/53	Sehr giftig für Wasserorganismen, kann in Gewässern längerfristig schädliche Wirkungen haben.
62	Kann möglicherweise die Fortpflanzungsfähigkeit beeinträchtigen.

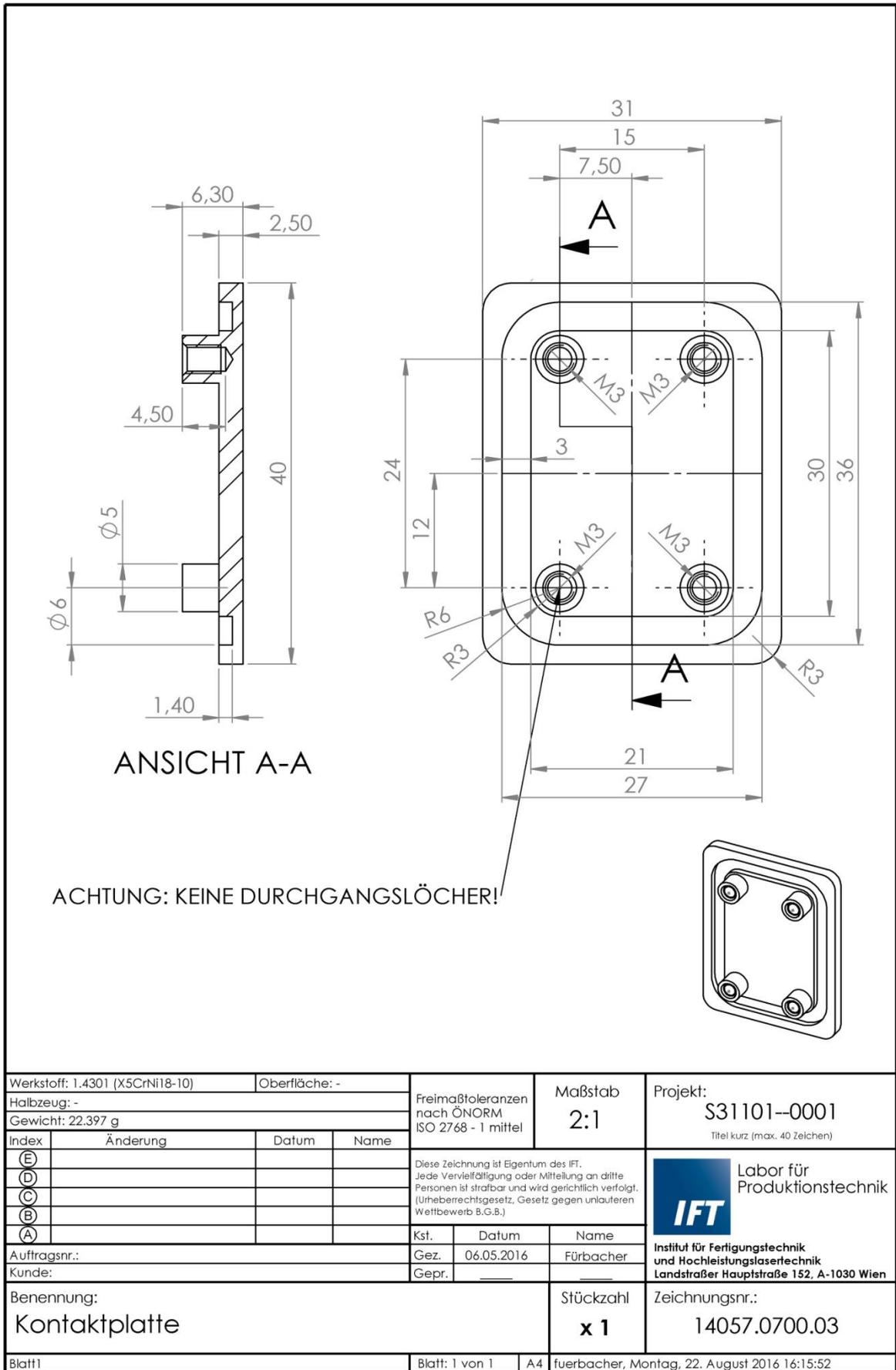
S-Satz- Nummer	Bedeutung
(1/2)	Unter Verschluss und für Kinder unzugänglich aufbewahren.
7/9	Behälter dicht geschlossen an einem gut gelüfteten Ort aufbewahren.
9	Behälter an einem gut gelüfteten Ort aufbewahren.
22	Staub nicht einatmen.
26	Bei Berührung mit den Augen gründlich mit Wasser abspülen und Arzt konsultieren.
30	Niemals Wasser hinzugießen.
36/37	Bei der Arbeit geeignete Schutzhandschuhe und Schutzkleidung tragen.
36/37/39	Bei der Arbeit geeignete Schutzkleidung, Schutzhandschuhe und Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen.
37/39	Bei der Arbeit geeignete Schutzhandschuhe und Schutzbrille/Gesichtsschutz tragen.
41	Explosions- und Brandgase nicht einatmen.
45	Bei Unfall oder Unwohlsein sofort Arzt hinzuziehen (wenn möglich, dieses Etikett vorzeigen).
53	Exposition vermeiden – vor Gebrauch besondere Anweisungen einholen. – Nur für den berufsmäßigen Verwender –
60	Dieses Produkt und sein Behälter sind als gefährlicher Abfall zu entsorgen.
61	Freisetzung in die Umwelt vermeiden. Besondere Anweisungen einholen/Sicherheitsdatenblatt zu Rate ziehen.

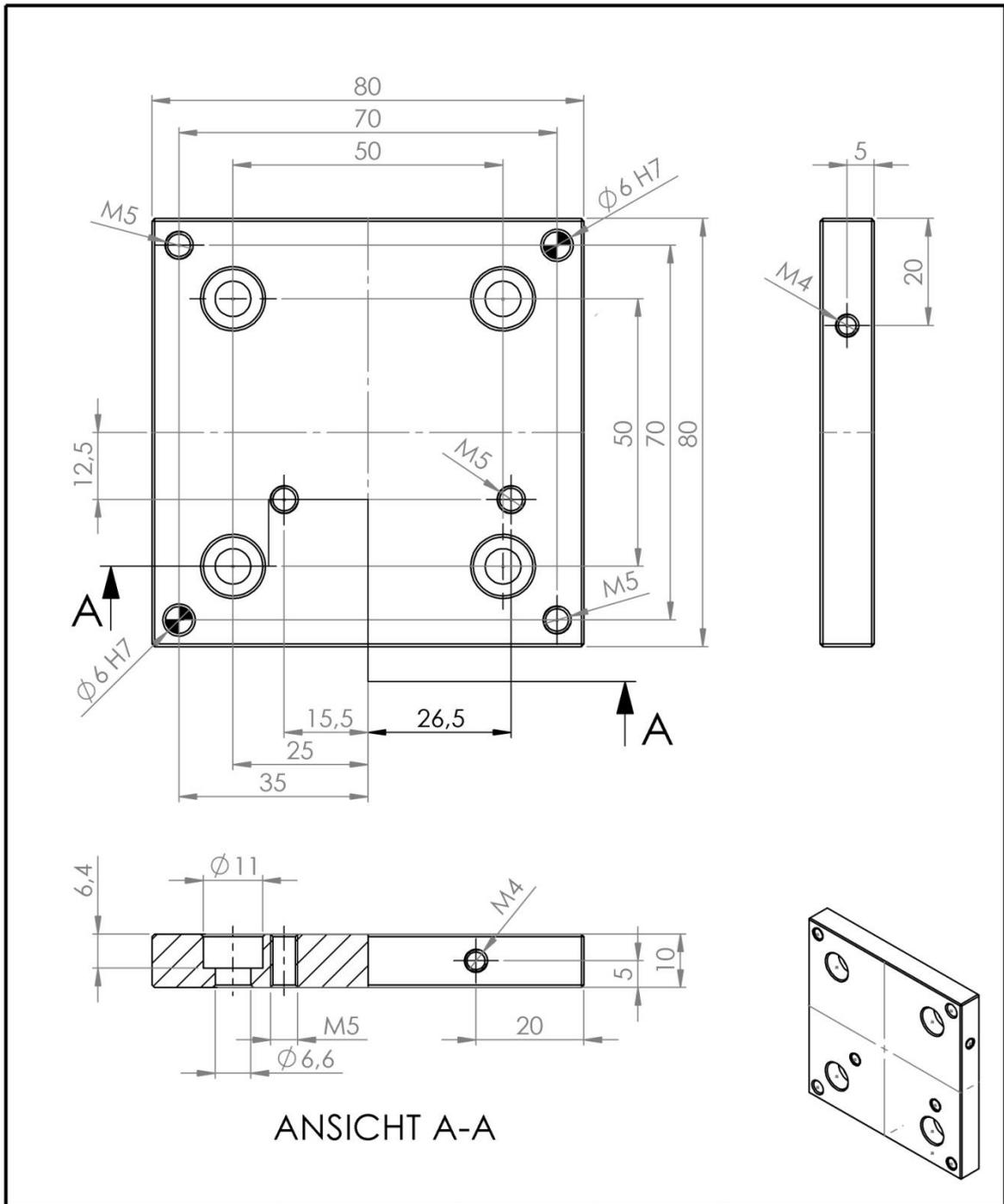
Anhang IV

Konstruktionszeichnungen des adaptierten Spülbeckens



Material: PTFE (allgemein)		Oberfläche: -		Freimaßtoleranzen nach ÖNORM ISO 2768 - 1 mittel	Maßstab: 1:1	Projekt: Teil kurz (max. 40 Zeichen)				
Halbzeug: -		Gewicht: 180,994 g		Diese Zeichnung ist Eigentum des IFT. Jede Vervielfältigung oder Mitteilung an Dritte Personen ist strafbar und wird gerichtlich verfolgt. Urheberrechtsgesetz, Gesetz gegen unfairen Wettbewerb B.O.8.						
Index:		Änderung					Datum		Name	
(E)										
(D)										
(C)										
(B)										
(A)										
Auftragsnr.:		Gez.:		Datum: 06.05.2016		Förbacher				
Kunde:		Gepr.:				Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungstechnik Landstraßer Hauptstraße 152, A-1030 Wien				
Benennung: Spülbecken		Stückzahl: x 1		Zeichnungsnr.: 14057.0700.01						
Blatt: 1 von 1		A3		fuertbacher, Donnerstag, 19. Mai 2016 14:55:19						





ANSICHT A-A

Werkstoff: 1.4301		Oberfläche: -		Freimaßtoleranzen nach ÖNORM ISO 2768 - 1 mittel	Maßstab 1:1	Projekt: S31101-0001 <small>Titel kurz (max. 40 Zeichen)</small>			
Halbzeug: -		Gewicht: 467.137 g				 Labor für Produktionstechnik Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik Landstraßer Hauptstraße 152, A-1030 Wien			
Index	Änderung	Datum	Name	Diese Zeichnung ist Eigentum des IFT. Jede Vervielfältigung oder Mitteilung an dritte Personen ist strafbar und wird gerichtlich verfolgt. (Urheberrechtsgesetz, Gesetz gegen unlauteren Wettbewerb B.G.B.)					
(E)				Kst.	Datum				Name
(D)				Gez.	06.05.2016				Fürbacher
(C)				Gepr.					
Auftragsnr.:				Stückzahl x 1		Zeichnungsnr.: 14057.0700.02			
Kunde:				Benennung: Grundplatte		Blatt1			
Blatt1				Blatt: 1 von 1		A4 fuerbacher, Donnerstag, 19. Mai 2016 14:59:00			

Anhang V

Befehlsliste und Beschreibung ECMTEC „Micro-Production“

M-Funktionen	
M3	Spindel EIN im Uhrzeigersinn (CW-Clockwise) mit vordefiniertem Spannungswert lt. Parameter
M4	Spindel EIN im Gegenuhrzeigersinn (CCW-Counter Clockwise) mit vordefiniertem Spannungswert lt. Parameter
M5	Spindel AUS (0 mV)
M200	Kontaktzähler rücksetzen
M201	Kontaktanzahl in Datei log2.log sichern
M205	Stoppuhr rücksetzen
M206	Stoppzeit in Datei log2.log sichern
M210	Programmlauf Halt, Anwender kann den Prozess fortführen
W-Funktionen	
W<cmd>	Befehl für Prozesssteuerung, Bsp: W<T300> setzt Toolspannung auf 300 mV
G-Funktionen	
G00	Geraden-Interpolation im Eilgang, Puls ausgeschaltet
G01	Geraden-Interpolation mit programmiertem Vorschub, Puls eingeschaltet
G04	Verweilzeit in Sekunden, Bsp.: G04 Pnnn Verweilzeit in nnn Sekunden
G22	Merker setzen (G22 #5*)
G23	Zum Merker springen (G23 #5 P12 → 12 Mal zu Merker 5 springen)
G30	Rohteildefinition, Minimalwerte
G31	Rohteildefinition, Maximalwerte
G54	Additiver, relativer Versatz zum aktuellen Nullpunkt, Nullpunktverschiebung im Werkstückkoordinatensystem (mit wirksamer Drehung G73) → Zwingende Angabe von X, Y, Z erforderlich
G55	Nullpunktversatz definieren
G73	Koordinatendrehung mit definiertem Winkel um einen Achsvektor, Bsp.: G73 X0 Y0 Z1 H90* → Rotation um Z-Achse um 90°; die Drehung erfolgt immer um den Werkstücknullpunkt; zwingende Angabe von X, Y, Z und H erforderlich; Gradzahlen > 0 → Rechtsdrehend in Blickrichtung = Vektorrichtung
G83	Tieflochbohren mit integrierten Spülbewegungen
G90	Absolute-Distance-Mode
G91	Incremental-Distance-Mode
G414	Werkstückeinmessung mit Radienkorrektur (Einmessen einer beliebigen Ecke mit Kipp- und Drehkorrektur)
G415	Einmessen von Gräben oder Stegen, Lage der Symmetrieachse, Drehwinkel bzg. X-Achse, ggf. Schnittpunkt der beiden
G416	Einmessen eines Zapfens
G417	Achse eines Lochs einmessen und Nullpunkt setzen
G418	Symmetriepunkt eines Zapfens einmessen und Nullpunkt setzen
G419	Werkstückverkipfung messen, korrigieren und Nullpunkt setzen
G431	Nullpunkt neu einmessen, Verschiebung wird erst durch Aktivierung der Nullpunkterfassung wieder auf Null gesetzt

F-Befehle	
Fx	Vorschubgeschwindigkeit x, z.B.: G01 Xnn Ynn Znn F1* - Siehe Anhang VI
T-Befehle	
T	Werkzeugaufruf, z.B.: T01 → Werkzeug 1 aufrufen
Q-Parameter (Programmvariablen werden überschrieben und bleiben bis zur nächsten Änderung erhalten)	
Q101	Schrittinkrement für überlagerte Vorwärtsfahrt in 1/10 µm, wenn F < 11
Q102	Schrittinkrement für überlagerte Rückwärtsbewegung in 1/10 µm, wenn F < 11
Q103	Schrittinkrement für überlagerte, senkrechte Linksbewegung in 1/10 µm, wenn F < 11
Q104	Schrittinkrement für überlagerte, senkrechte Rechtsbewegung in 1/10 µm, wenn F < 11
Q105	Segmentzahl für Kreisbogeninterpolation für Helixbohren
Q106	Additiver Kreisdurchmesser beim Helixbohren
Q110	Additive Verzögerung (Faktor zur Tiefe)
Q201	Toolspannung U_TE in mV
Q202	Spannungsamplitude in mV
Q203	Pulsweite in ns
Q204	Duty Cycle 1....10
Q205	Positiver Schwellwert in mV
Q206	Negativer Schwellwert in mV
Q210	Vorgabe Motorspannung des analogen Spindelmotors in mV (-10V bis +10V), Stillstand bei 0 V
Q250	Gegenelektrode zuschalten
Q251	Gegenelektrode trennen
Q252	Regelung einschalten
Q253	Regelung ausschalten
Q-Parameter (der Bearbeitungszyklen)	
Q254	Rückzugsabstand über Startpunkt beim Tieflochbohren
Q255	Zeitintervall, das nach dem Spülvorgang beim Tieflochbohren einsetzt
Q256	Mindestabstand beim oszillierenden Spülvorgang zum aktuellen Bohrgrund beim Tieflochbohren
Q257	Verweilzeit am oberen Totpunkt beim oszillieren, Tieflochbohren
Q258	Anzahl der Hübe, Tieflochbohren
Q259	Max. Messdistanz
Q260	Sichere Höhe
Q261	Messhöhe z
Q262	Insel oder Tasche
Q263	X-Wert Koordinate 1
Q264	Y-Wert Koordinate 1
Q265	Z-Wert Koordinate 1
Q267	Sichere X – Breite Zapfen
Q268	Sichere Y – Breite Zapfen
Q273	X-Wert Koordinate 3
Q274	Y-Wert Koordinate 3

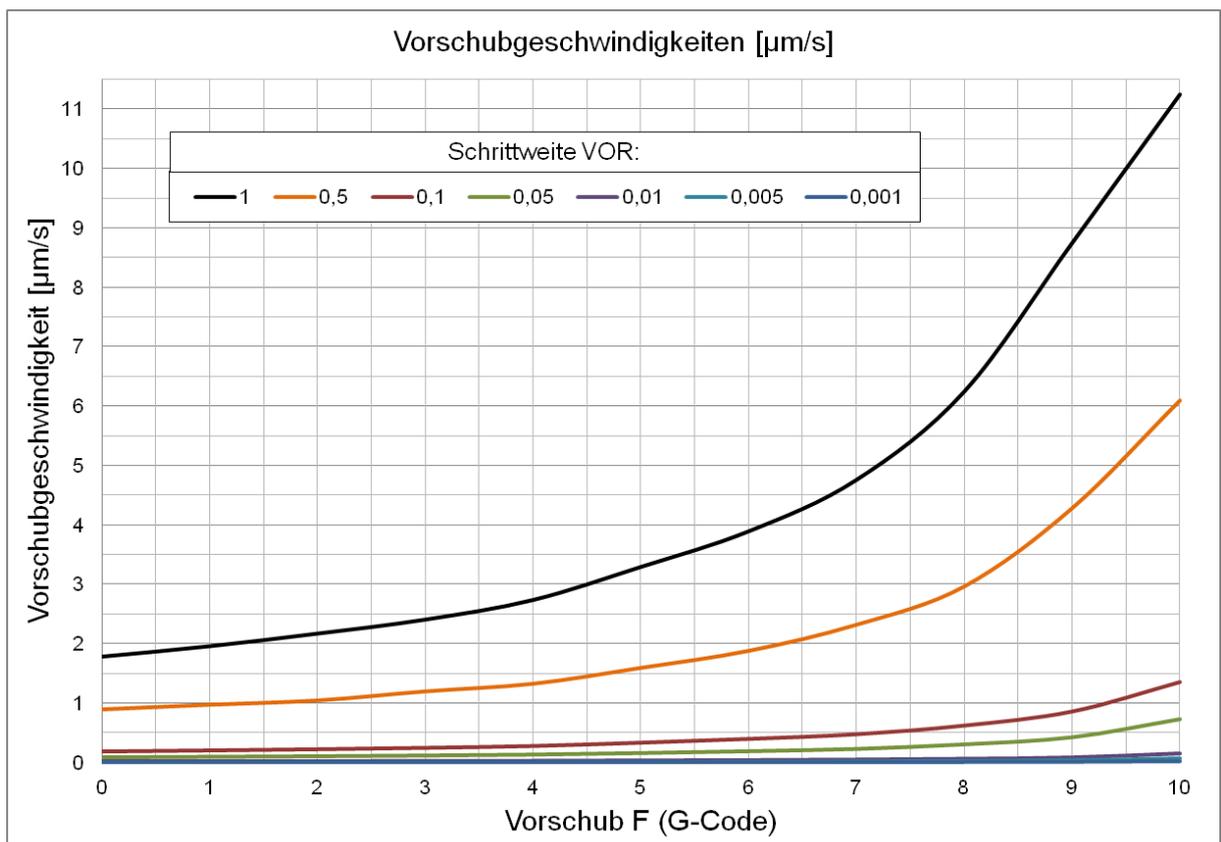
Q275	Z-Wert Koordinate 3		
Q283	X-Wert Koordinate 4		
Q284	Y-Wert Koordinate 4		
Q285	Z-Wert Koordinate 4		
Q296	X-Wert Koordinate 2		
Q297	Y-Wert Koordinate 2		
Q298	Z-Wert Koordinate 2		
Q300	Zulässige Toleranz zwischen Messwert und Referenzposition		
Q301	0 = Keine Berücksichtigung der Toleranzangabe, 1 = Prüfen + Warnhinweis + Stop bei Überschreitung, 2 = Prüfen + Korrigieren bei Überschreitung		
Q302	Langsames Antasten nach unten: 1 = langsam, 0 = Ellgang		
Q304	Grunddrehung setzen		
Q305	Bezugspunkt übernehmen		
Q306	Manuelle Justage aktivieren		
Q307	Bezugsachse bei der Erfassung des Drehwinkels definieren: 0 = X-Achse, 1 = Y-Achse		
Q308	Funktion G84, Wiederholende Aufzeichnung der Schwellwerte nach definierter Anzahl an Kontakten		
Q309	Übernahme X-Messwert als X-Nullpunktcoordinate		
Q310	Übernahme Y-Messwert als Y-Nullpunktcoordinate		
Q311	Übernahme Z-Messwert als Z-Nullpunktcoordinate		
Q315	Werkzeuglänge		
Q316	Startdurchmesser Tooling		
Q317	Solldurchmesser Tooling		
Q318	Strecke Ablängen Spitze		
Q320	Sicherheitsabstand, zusätzlich entgegen Messrichtung, Abstand des Messpunktes von der Berandung beim Antasten,		
Q321	Freier Sicherheitsabstand zwischen Werkzeug und Werkstück bei der Lochvermessung		
Q326	Abstand zum 1 Punkt		
Q327	Abstand zum 4 Punkt		
Tastaturbelegung		Aktiv bei Bearbeitung	Aktiv bei Leerlauf
S	Override Schrittpause +10	X	X
F	Override Schrittpause – 5	X	X
F1	Maschinenbeleuchtung EIN/AUS	X	X
F2	Ringlicht EIN/AUS	X	X
F3	Handsteuerung Stick		X
F4	Handsteuerung Relativkoordinatenfahrt		X
F5	Füllstandsregelung EIN/AUS	X	X
F6	Regelung Potentiostat EIN/AUS	X	X
F7	Fenster Prozesssteuerung	X	X
F8	Türe AUF/ZU	X	X
F9	Pumpensteuerung		X
F10	Spindelsteuerung		X

F11	Prozessparameter	X	X
Sonstige Hinweise			
Programmkommentare immer mit „;“ vom Programmcode trennen (Semikolon)			
X, Y, Z – Koordinatenbezeichnung immer groß schreiben, z.B.: X2 Y2 Z2 → nicht x2 y2 z2			
ESC-Taste während eines aktiven NC-Programmes → Programmstopp			
Sollte die Referenzierung/Achsansteuerung nicht funktionieren gleich nach Start der Maschine nicht funktionieren → Glasrohrsicherung der Steuereinheit kontrollieren (250V 2,5A)			

Anhang VI

Messung der tatsächlichen Vorschubgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Schrittweiten und Vorschubbefehlen

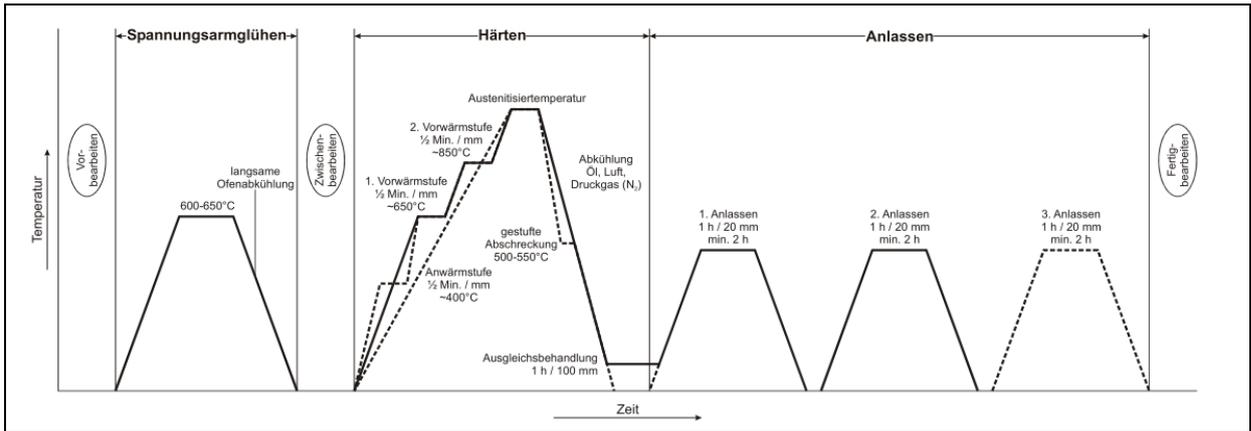
		Vorschubgeschwindigkeiten [$\mu\text{m/s}$]						
		Schrittweite VOR						
		0,001	0,005	0,01	0,05	0,1	0,5	1
Vorschub F	0	0,0018	0,0092	0,0183	0,0901	0,1802	0,9009	1,7857
	1	0,0020	0,0098	0,0196	0,1000	0,1980	0,9804	1,9608
	2	0,0022	0,0108	0,0217	0,1087	0,2174	1,0526	2,1739
	3	0,0024	0,0119	0,0242	0,1220	0,2419	1,2048	2,4096
	4	0,0028	0,0136	0,0273	0,1370	0,2727	1,3333	2,7397
	5	0,0032	0,0163	0,0333	0,1626	0,3279	1,6000	3,2967
	6	0,0038	0,0194	0,0388	0,1942	0,3922	1,8868	3,8961
	7	0,0048	0,0238	0,0481	0,2326	0,4706	2,3256	4,7619
	8	0,0060	0,0308	0,0610	0,3093	0,6173	2,9703	6,2500
	9	0,0085	0,0427	0,0840	0,4301	0,8547	4,2857	8,7500
	10	0,0156	0,0775	0,1515	0,7353	1,3514	6,0976	11,2500



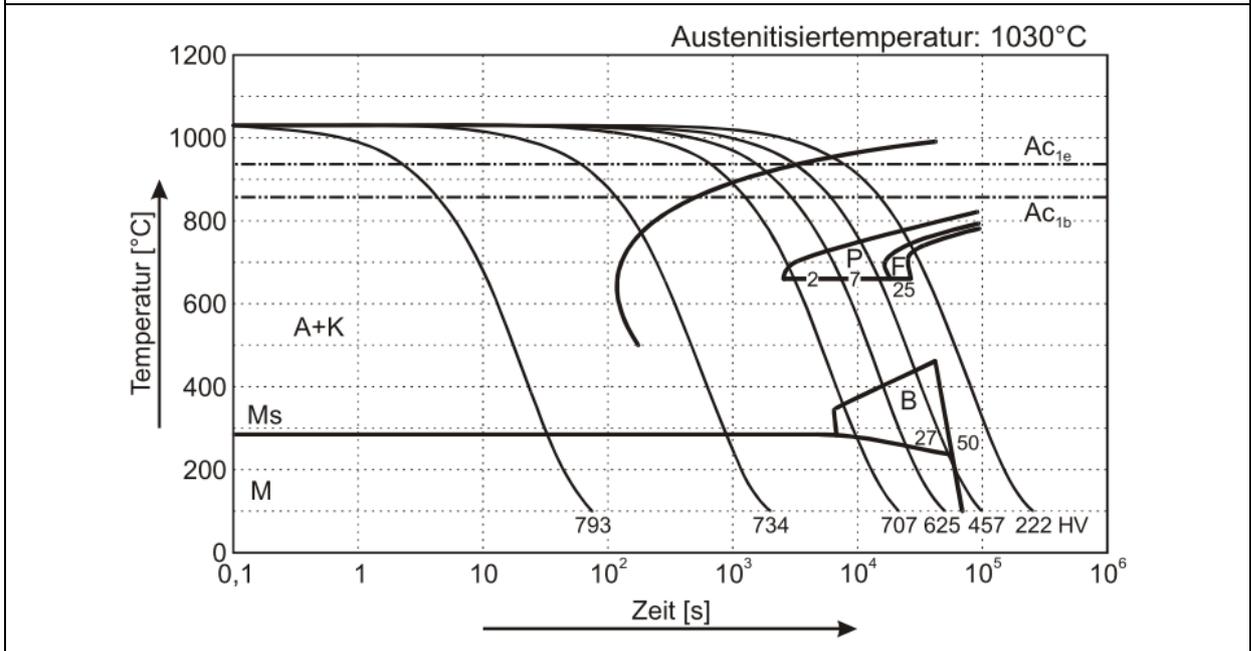
Anhang VII

Materialdatenblatt Warmarbeitsstahl X37CrMoV5-1 (1.2343)

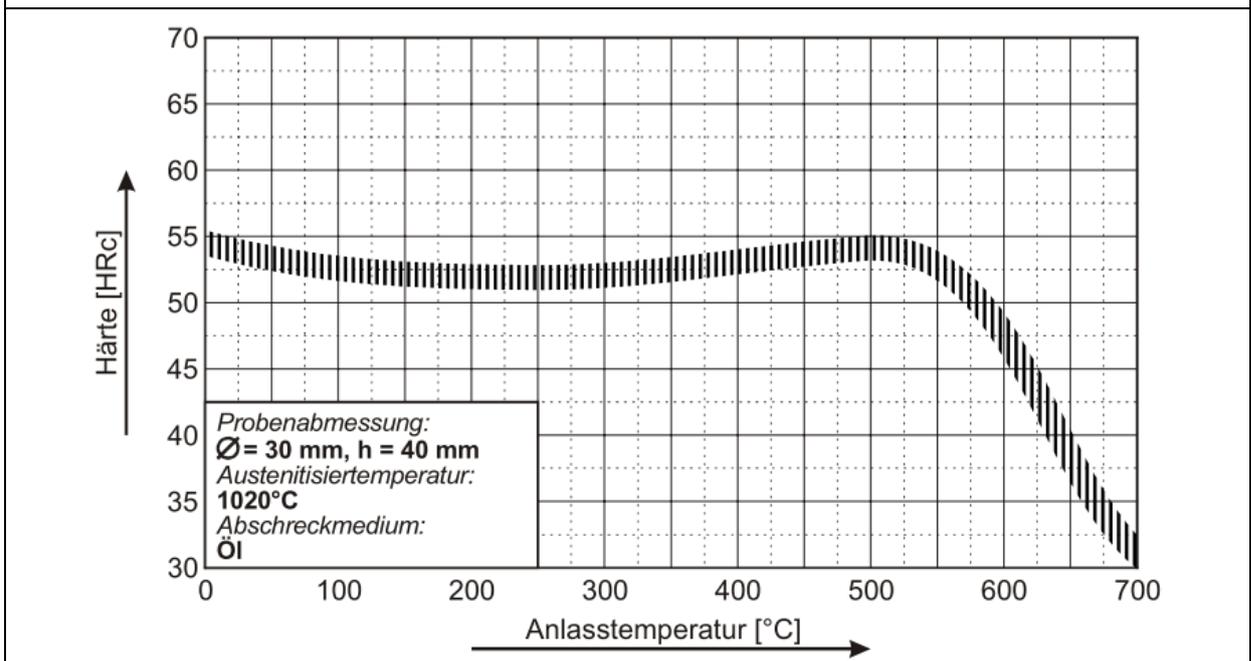
Werkstoff-Nr.:	1.2343				
Kurzname:	X37CrMoV5-1				
DE-Bezeichnung:	WP5				
Chemische Zusammensetzung: (Richtanalyse in %)	C	Si	Cr	Mo	V
	0,37	1,00	5,30	1,30	0,40
Werkstoffeigenschaften:	Warmarbeitsstahl mit hoher Zähigkeit und Warmfestigkeit, warmrissunempfindlich, gute Wärmeleitfähigkeit, nur bedingt wasserkühlbar. Bei sehr hohen Anforderungen strukturbearbeitet (Extra Feine Struktur) oder ESU lieferbar				
Verwendung:	Druckgießformen, Schmiedegesenke, Strangpresswerkzeuge, Armierungen, Zylinder und Schnecken für die Kunststoffverarbeitung, Warmscherenmesser, IHU-Werkzeuge				
Physikalische Eigenschaften:					
Wärmeausdehnungskoeffizient	$\left[\frac{10^{-6} \text{ m}}{\text{m K}} \right]$	20-100°C	20-300°C	20-500°C	20-700°C
		11,4	12,4	13,1	13,3
Wärmeleitfähigkeit	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m K}} \right]$	20°C	350°C	700°C	
		25,3	27,6	30,5	
Wärmebehandlung:					
Weichglühen	Temperatur	Abkühlung	Glühhärt		
	750 - 790°C	Ofen	max. 229 HB		
Spannungsarmglühen	Temperatur	Abkühlung			
	600 - 650°C	Ofen			
Härten	Temperatur	Abkühlung	Anlassen		
	1000 - 1050°C	Öl, Druckgas (N ₂), Luft oder Warmbad 500 - 550°C	siehe Anlassschaubild		
Temperatur-Zeit-Folge für die Wärmebehandlung					



Kontinuierliches ZTU-Schaubild



Anlassschaubild



Anhang VIII

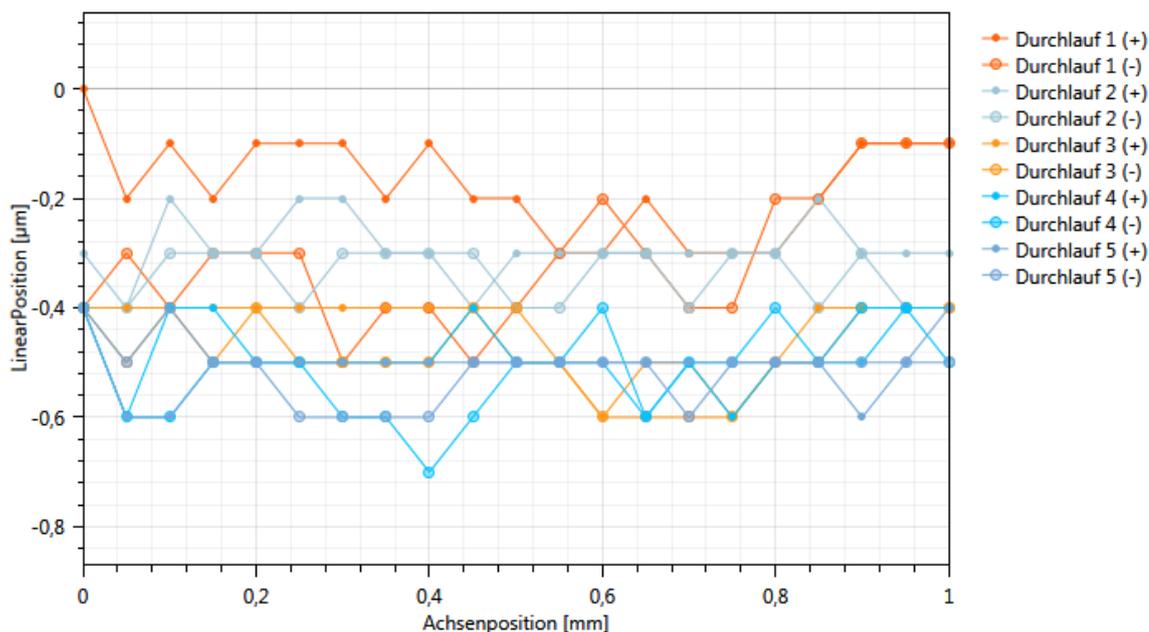
Diagramme zur Genauigkeitsuntersuchung mittels Laserinterferometer Renishaw XL-80 / Software XCal-View

Position:

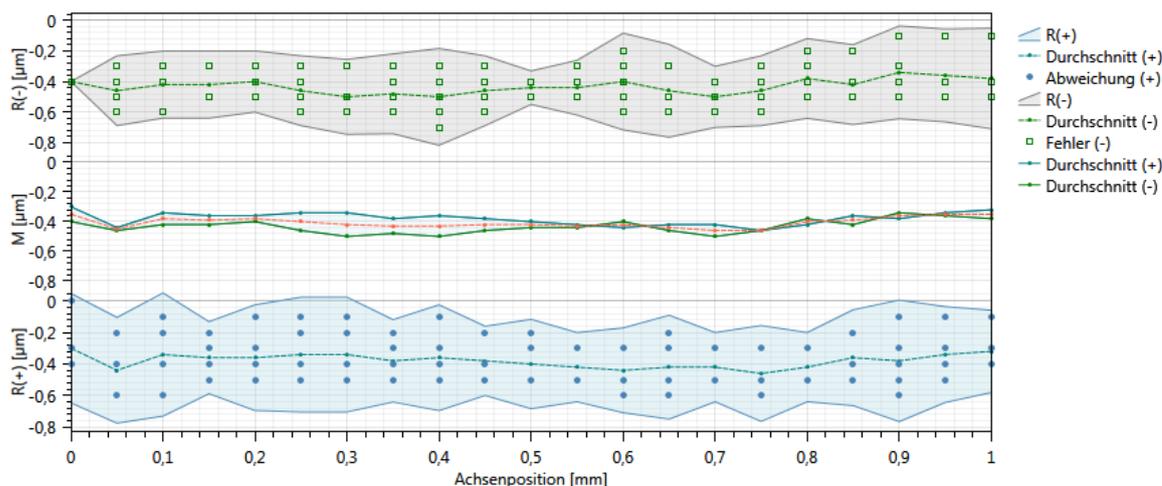
X-Achse, Messlänge 1 mm

File: X_Achse_0bis1mm_Pos_2_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

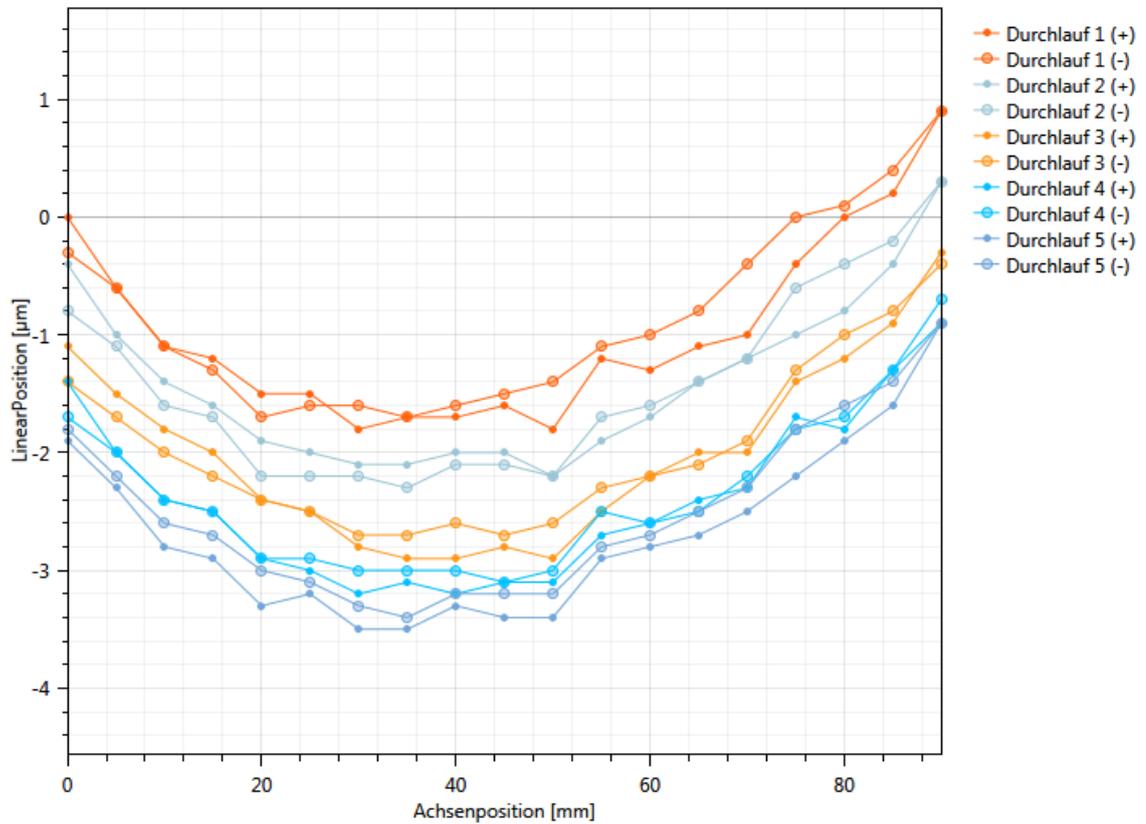


Name	(+) [µm]	(-) [µm]	Bidir [µm]	Name	Wert [µm]
Positionierfehler (A)	0,7	0,6	0,7	Umkehrbewegung (B)	0,1
Reproduzierbarkeit der P	0,7	0,5	0,7	Mittleres Umkehrspiel	0,0
Systematischer Positioni	0,1	0,2	0,2	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	0,1

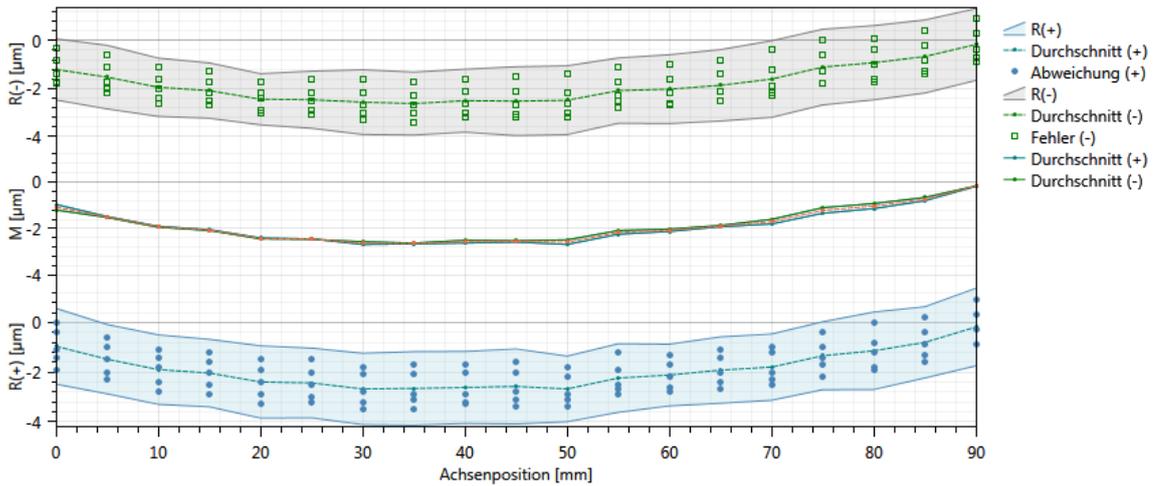
X-Achse, Messlänge 90 mm

File: X_Achse_0bis90mm_Pos_2_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

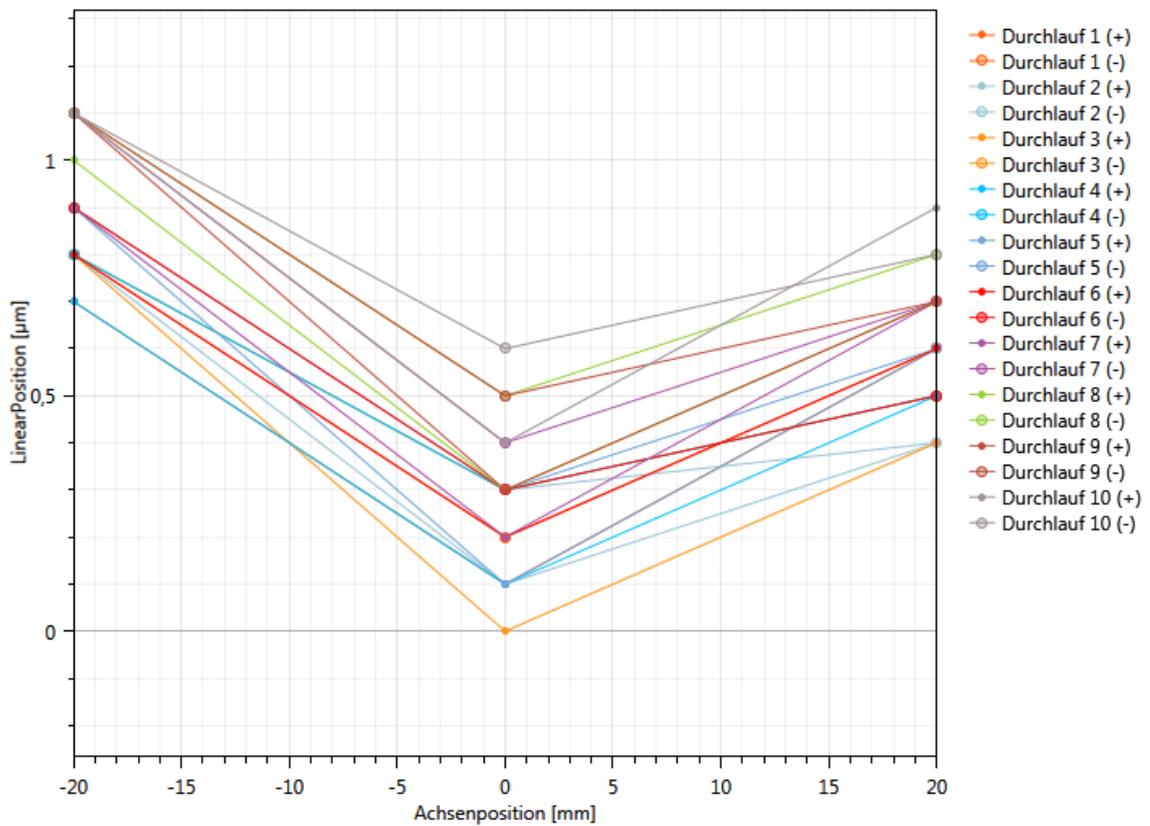


Name	(+) [µm]	(-) [µm]	Bidir [µm]	Name	Wert [µm]
Positionierfehler (A)	5,5	5,3	5,5	Umkehrbewegung (B)	0,2
Reproduzierbarkeit der P	3,1	3,2	3,3	Mittleres Umkehrspiel	-0,1
Systematischer Positioni	2,5	2,5	2,5	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	2,5

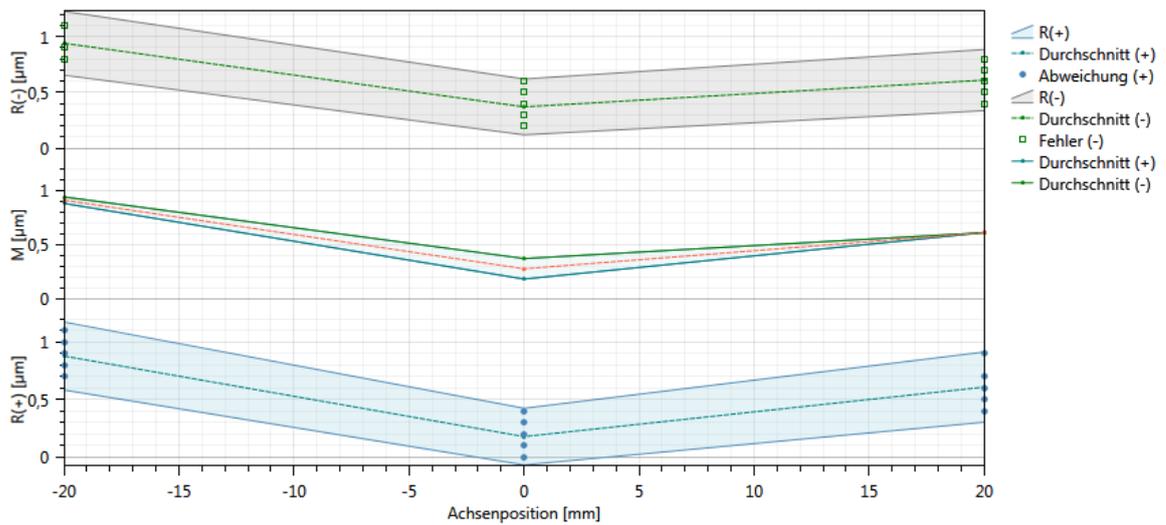
X-Achse, Messlänge ± 20 mm

File: X_Achse_+-20mm_Pos2_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

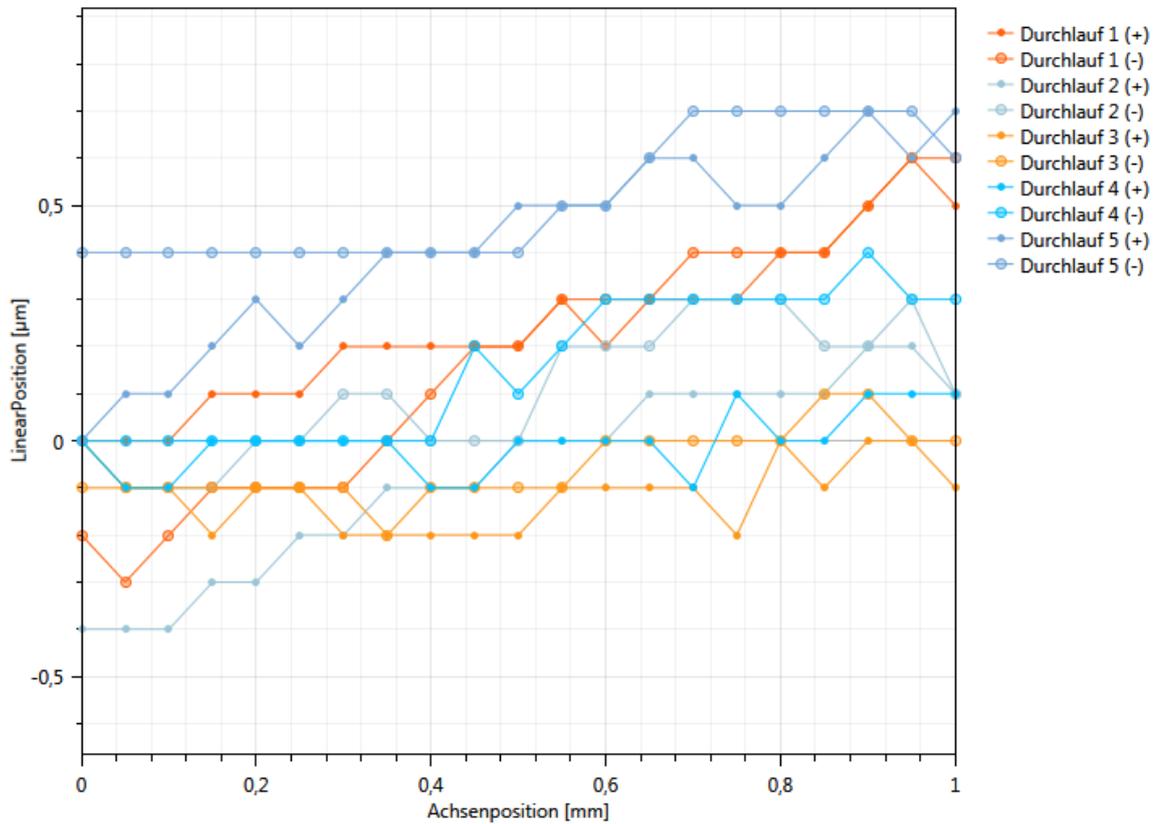


Name	(+) [µm]	(-) [µm]	Bidir [µm]	Name	Wert [µm]
Genauigkeit (A)	1,2	1,1	1,3	Umkehrbewegung (B)	0,2
Wiederholgenauigkeit (R)	0,6	0,6	0,7	Mittleres Umkehrspiel	-0,1
Sys Abw (E)	0,7	0,6	0,8	Mittlere Abweichung (M)	0,6

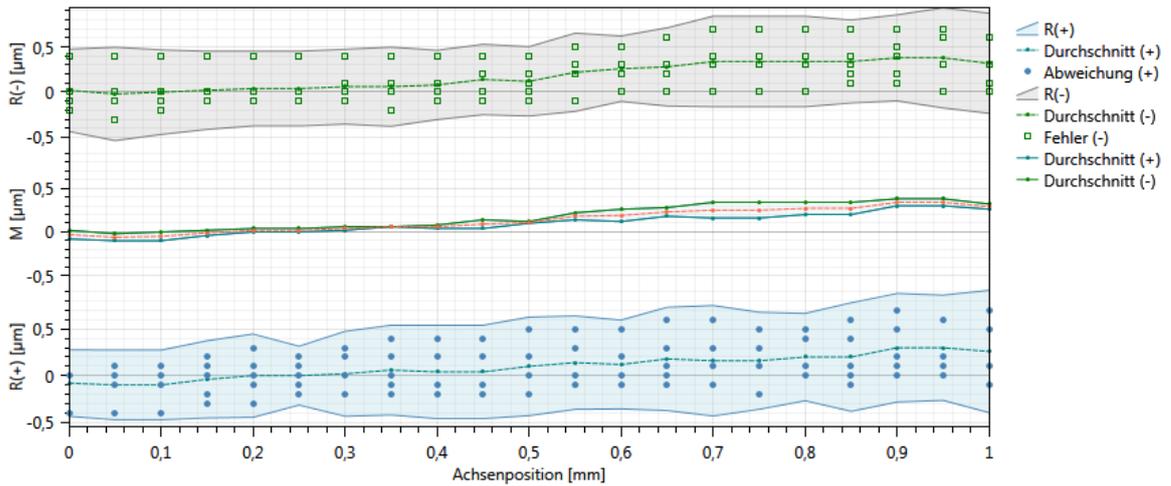
Y-Achse, Messlänge 1 mm

File: Y_Achse_0bis1mm_Pos2_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

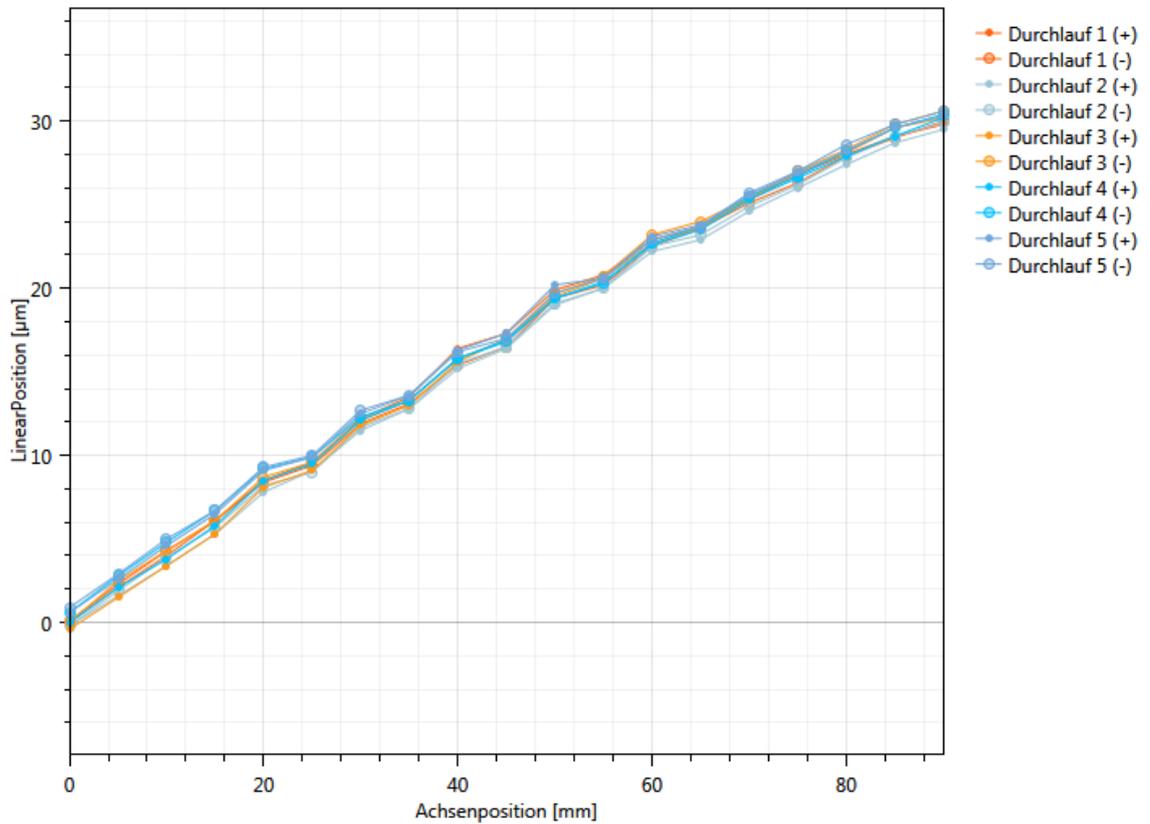


Name	(+) [µm]	(-) [µm]	Bidir [µm]	Name	Wert [µm]
Positionierfehler (A)	1,4	1,5	1,5	Umkehrbewegung (B)	0,2
Reproduzierbarkeit der P	1,3	1,1	1,3	Mittleres Umkehrspiel	-0,1
Systematischer Positioni	0,4	0,4	0,5	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	0,4

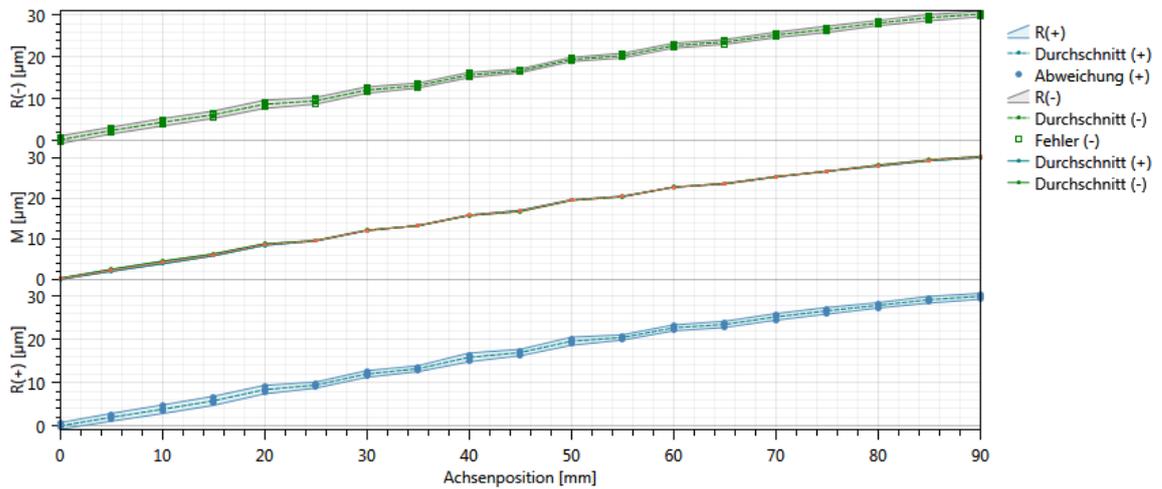
Y-Achse, Messlänge 90 mm

File: Y_Achse_0bis90mm_Pos3_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

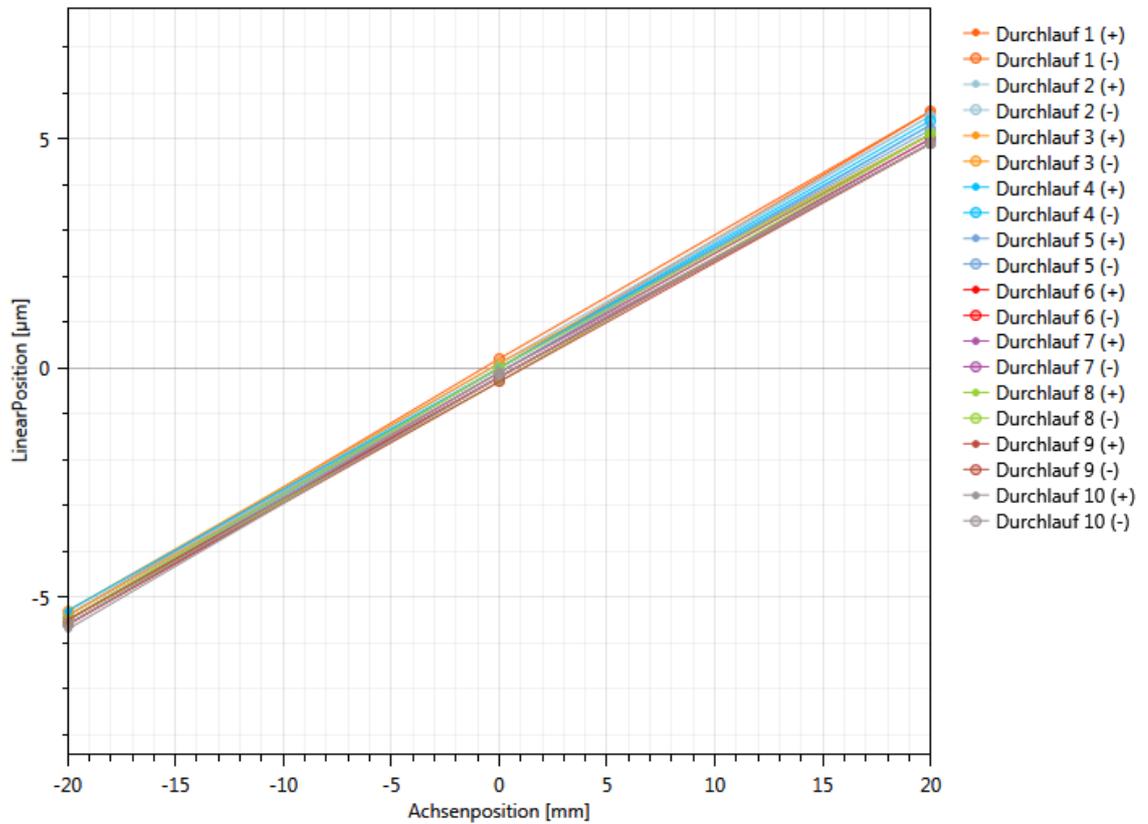


Name	(+) [µm]	(-) [µm]	Bidir [µm]	Name	Wert [µm]
Positionierfehler (A)	31,4	31,6	31,7	Umkehrbewegung (B)	0,6
Reproduzierbarkeit der P	2,1	1,9	2,5	Mittleres Umkehrspiel	-0,2
Systematischer Positioni	30,0	30,0	30,3	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	30,0

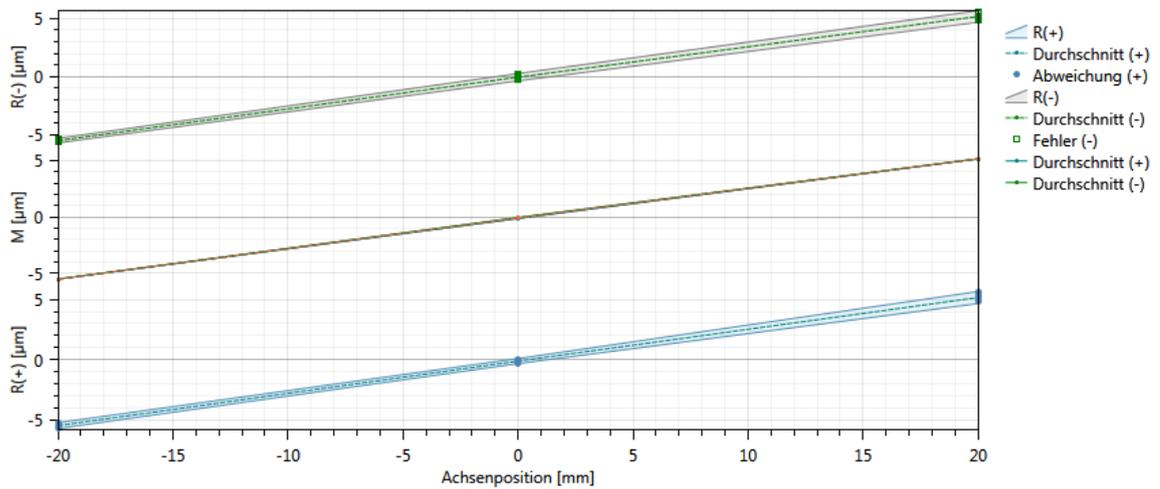
Y-Achse, Messlänge ± 20 mm

File: Y_Achse_+-20mm_Pos2_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

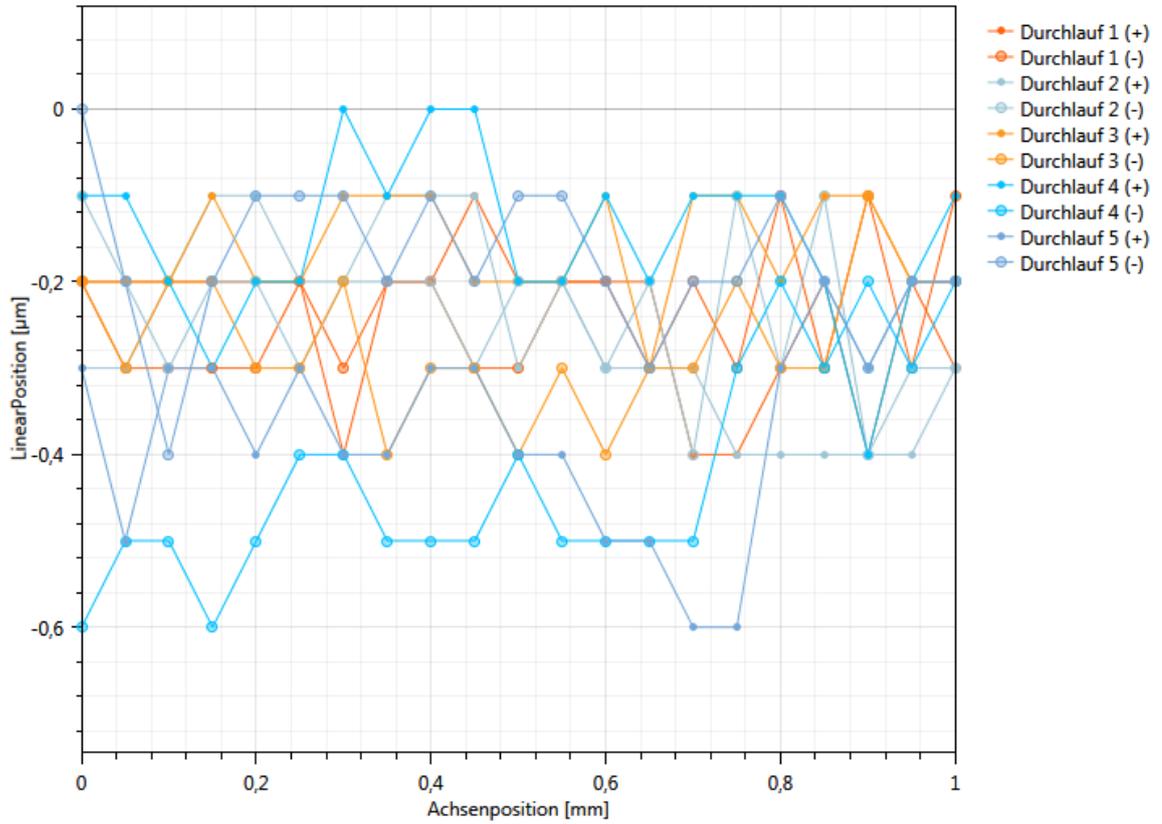


Name	(+) [µm]	(-) [µm]	Bidir [µm]	Name	Wert [µm]
Positionierfehler (A)	11,4	11,4	11,4	Umkehrbewegung (B)	0,1
Reproduzierbarkeit der P	1,0	1,0	1,0	Mittleres Umkehrspiel	0,0
Systematischer Positioni	10,7	10,7	10,7	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	10,7

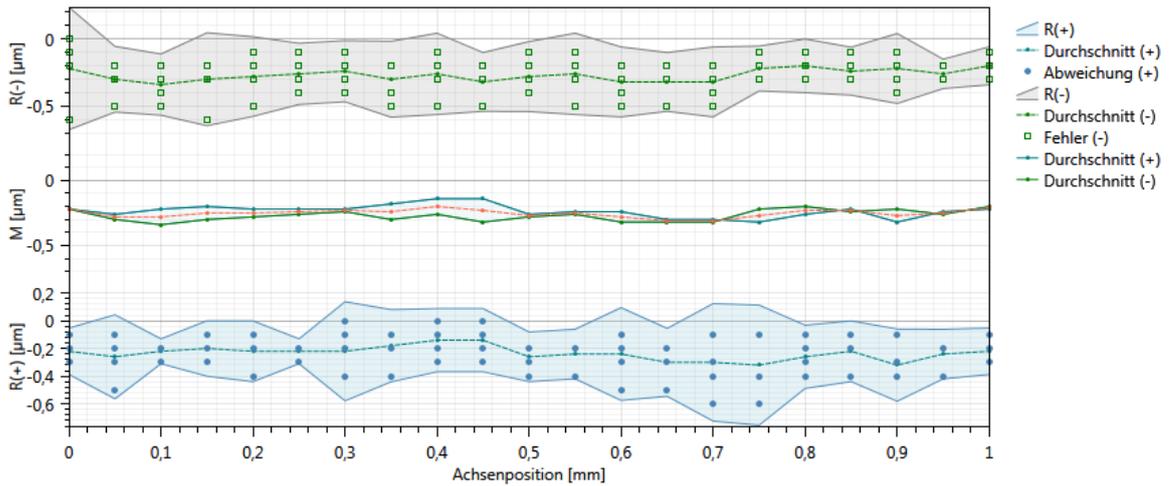
Z-Achse, Messlänge 1 mm

File: Z_Achse_0bis1mm_Pos1_#4

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

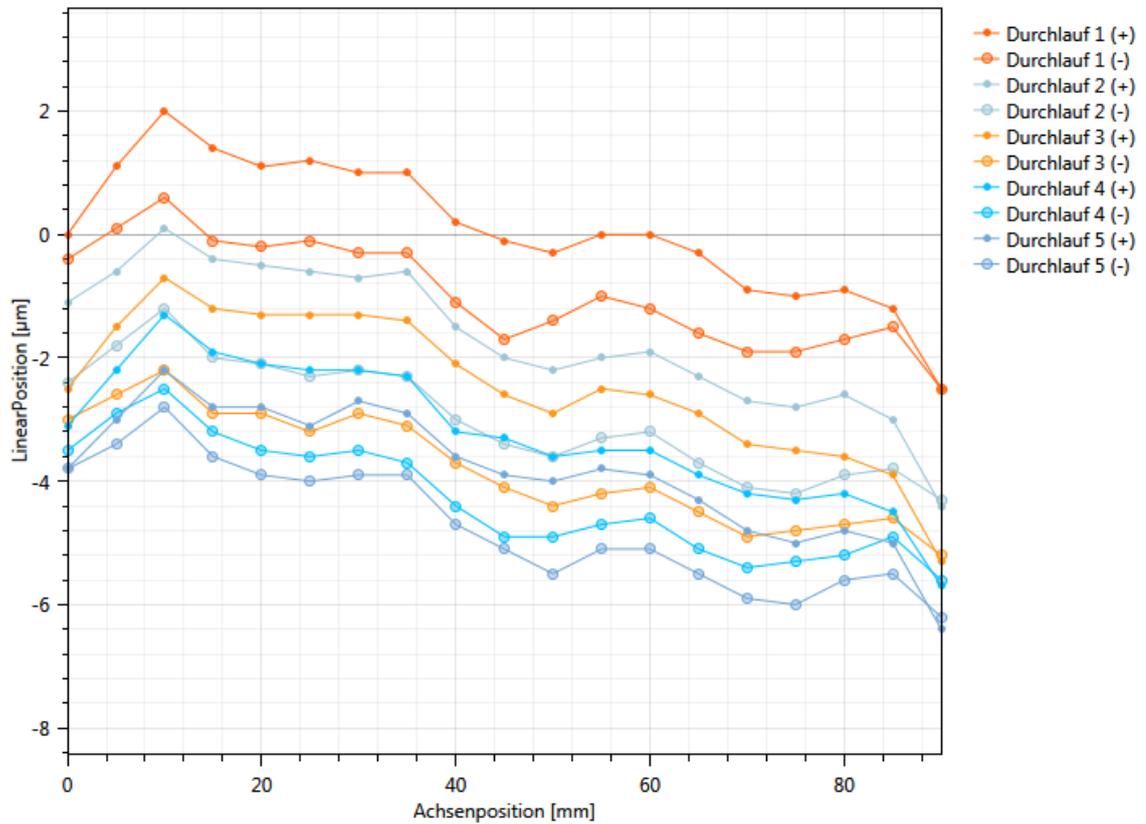


Name	(+) [µm]	(-) [µm]	Bidir [µm]	Name	Wert [µm]
Positionierfehler (A)	0,9	0,9	1,0	Umkehrbewegung (B)	0,2
Reproduzierbarkeit der P	0,9	0,9	0,9	Mittleres Umkehrspiel	0,0
Systematischer Positioni	0,2	0,1	0,2	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	0,1

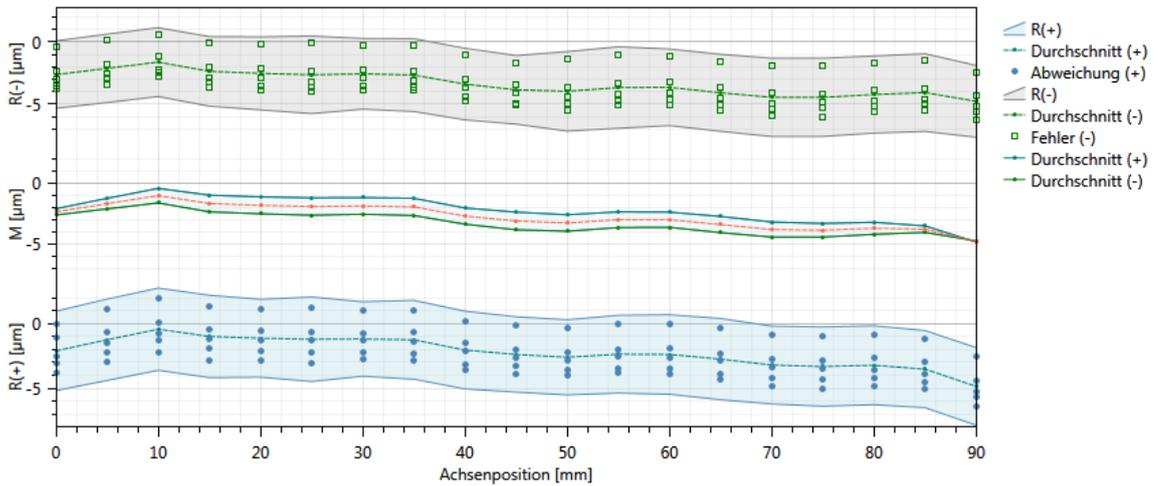
Z-Achse, Messlänge 90 mm

File: Z_Achse_0bis90mm_Pos1_#5

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

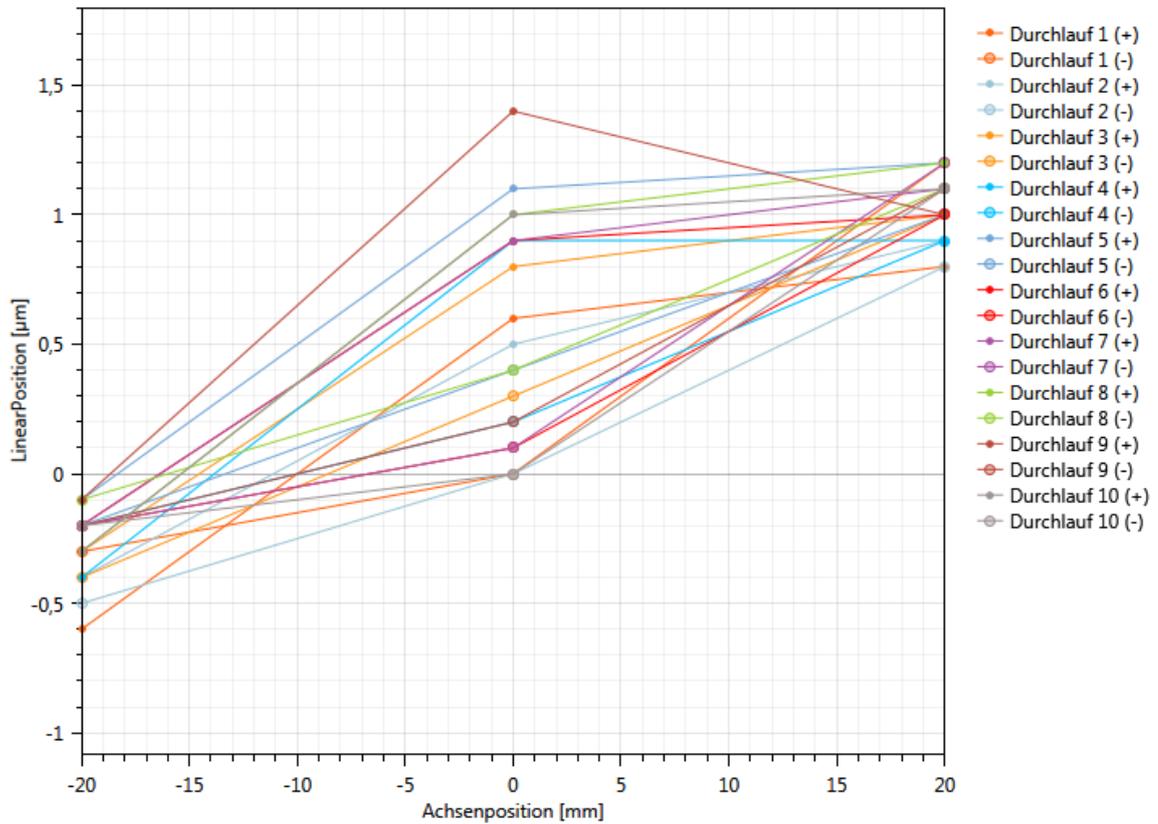


Name	(+) [µm]	(-) [µm]	Bidir [µm]	Name	Wert [µm]
Positionierfehler (A)	10,6	8,8	10,6	Umkehrbewegung (B)	1,5
Reproduzierbarkeit der P	6,6	6,5	7,8	Mittleres Umkehrspiel	1,1
Systematischer Positioni	4,4	3,1	4,4	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	3,8

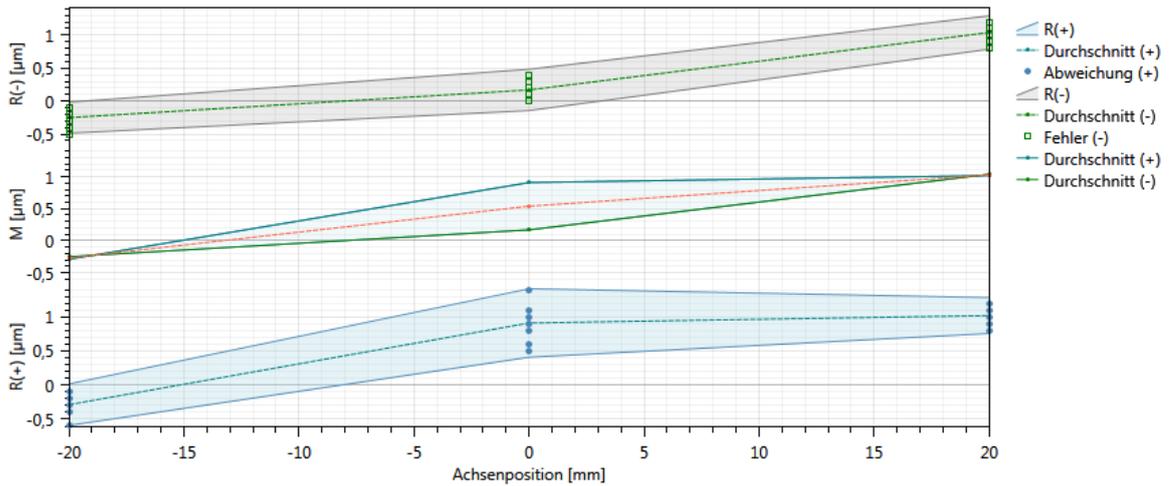
Z-Achse, Messlänge ± 20 mm

File: Z_Achse_+-20mm_Pos1_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:



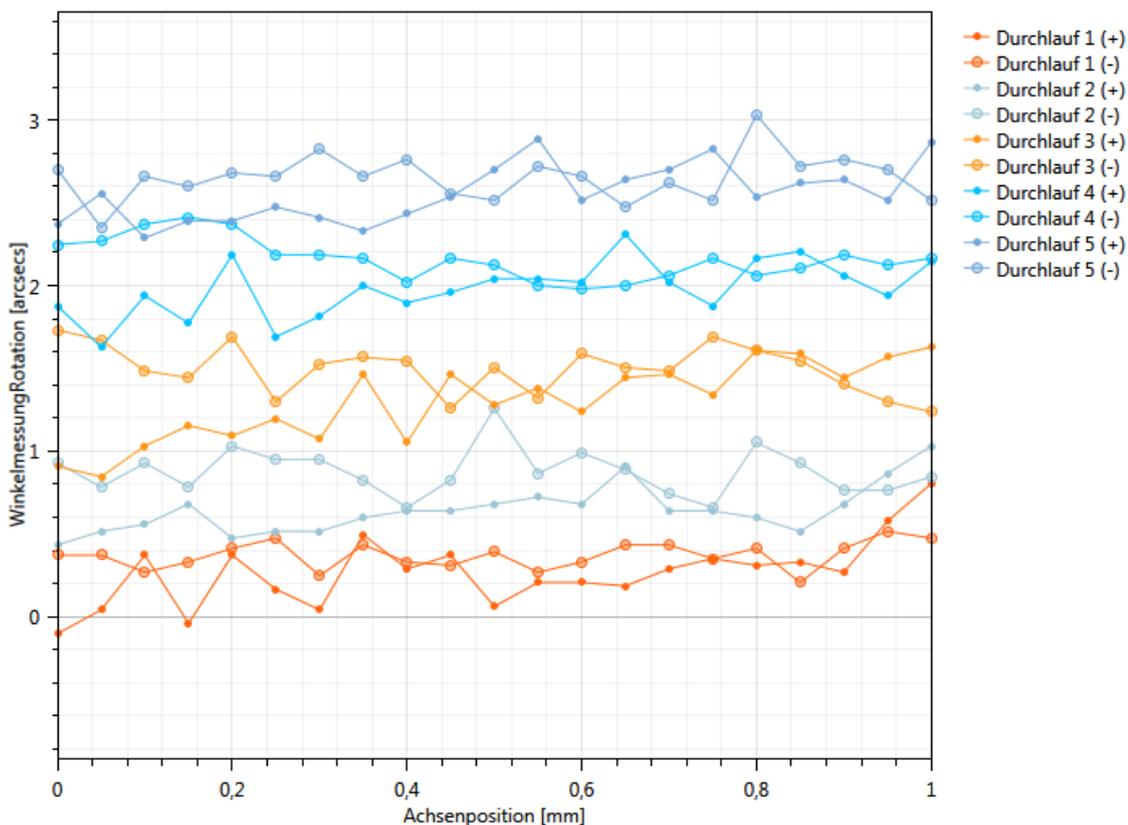
Name	(+) [µm]	(-) [µm]	Bidir [µm]	Name	Wert [µm]
Positionierfehler (A)	2,0	1,8	2,0	Umkehrbewegung (B)	0,7
Reproduzierbarkeit der P	1,0	0,6	1,6	Mittleres Umkehrspiel	0,2
Systematischer Positioni	1,3	1,3	1,3	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	1,3

Kippwinkel (Rotation):

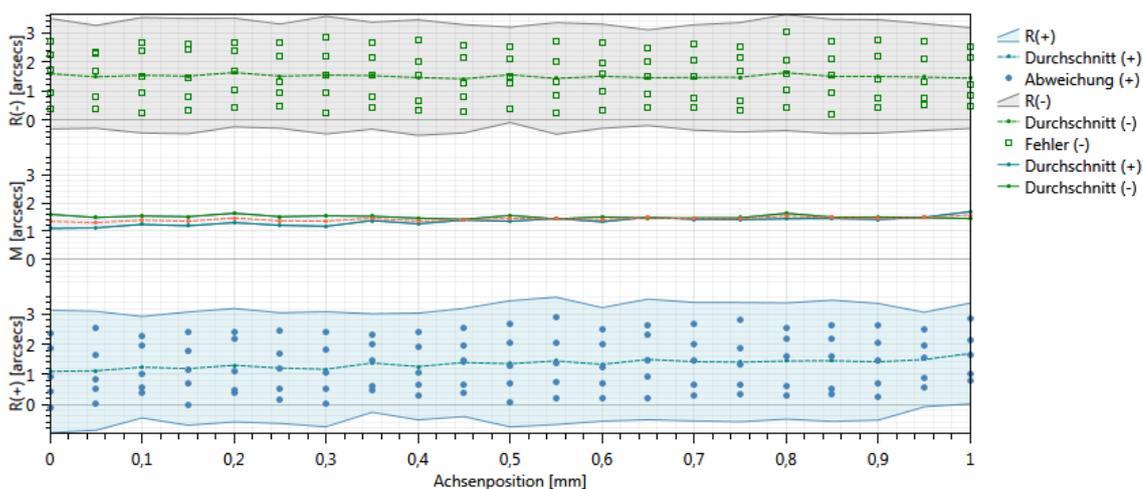
X-Achse, X/Y-Ebene, Messlänge 1 mm

File: Rotation_X_1mm_Pos2_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

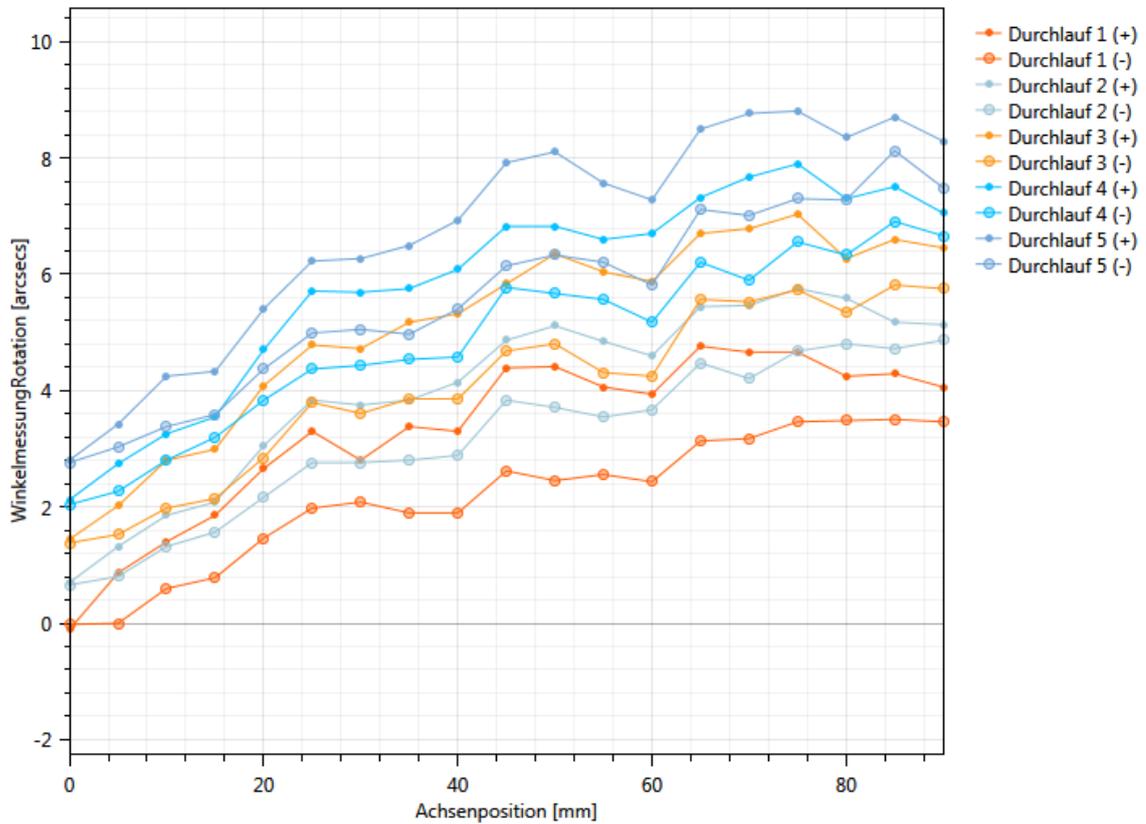


Name	(+) [arcsecs]	(-) [arcsecs]	Bidir [arcse]	Name	Wert [arcsecs]
Positionierfehler (A)	4,5	4,1	4,6	Umkehrbewegung (B)	0,5
Reproduzierbarkeit der P	4,2	4,0	4,4	Mittleres Umkehrspiel	-0,2
Systematischer Positioni	0,6	0,2	0,6	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	0,3

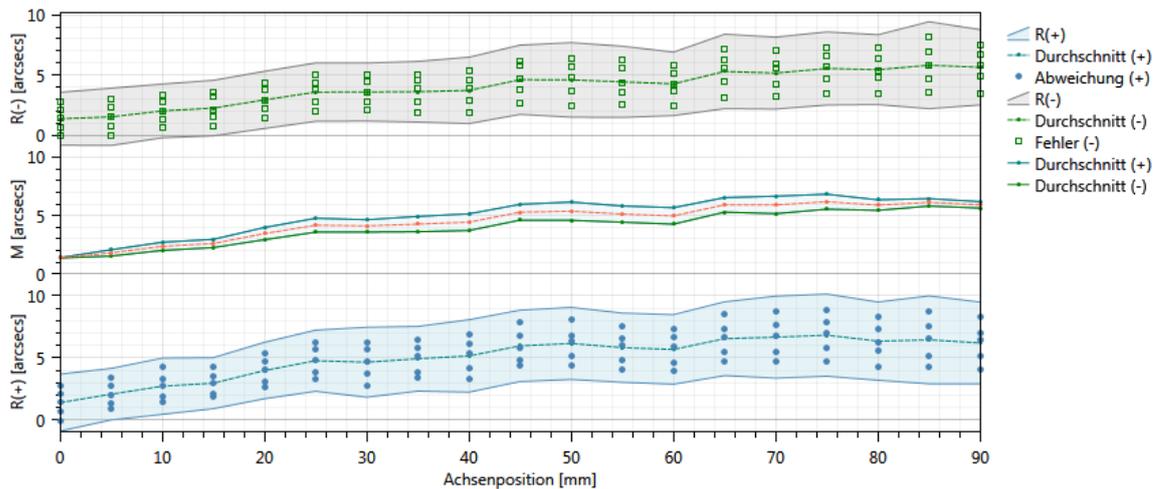
X-Achse, X/Y-Ebene, Messlänge 90 mm

File: Rotation_X_90mm_Pos2_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

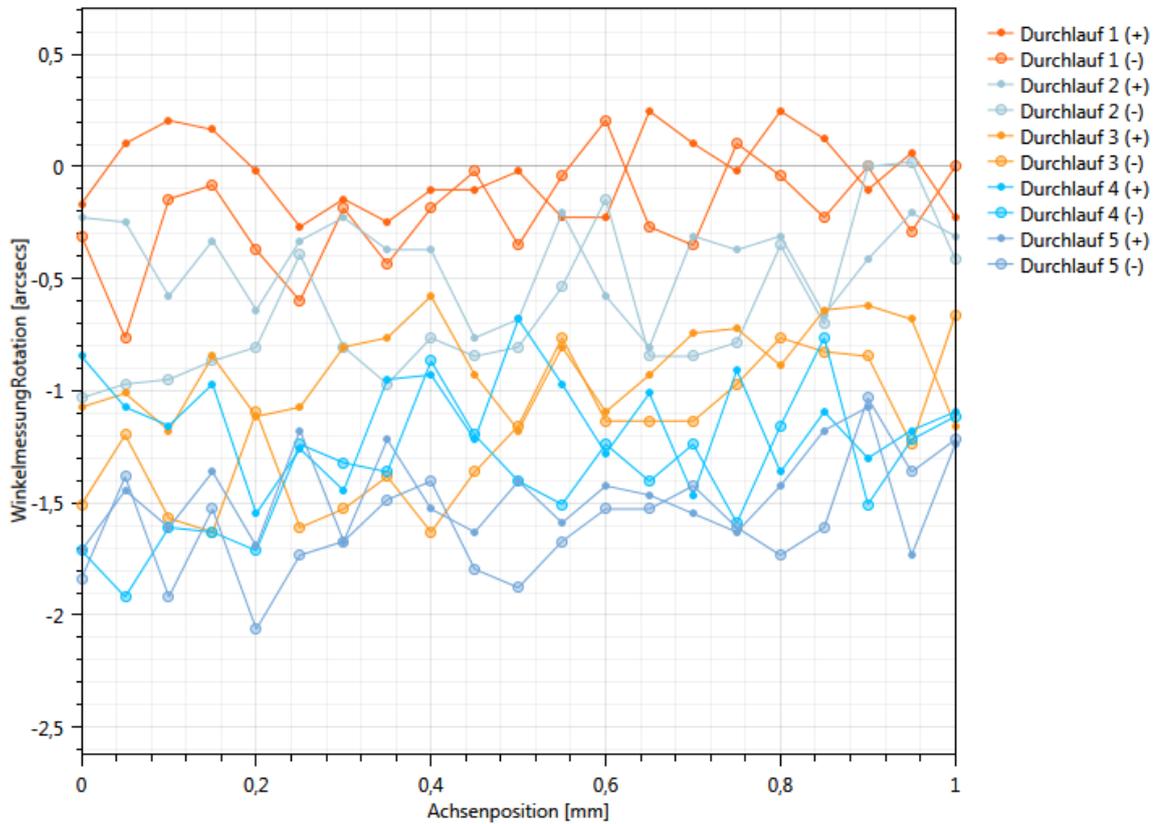


Name	(+) [arcsec]	(-) [arcsecs]	Bidir [arcsec]	Name	Wert [arcsecs]
Positionierfehler (A)	11,0	10,3	11,0	Umkehrbewegung (B)	1,6
Reproduzierbarkeit der P	7,1	7,2	7,8	Mittleres Umkehrspiel	1,0
Systematischer Positioni	5,4	4,5	5,5	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	4,8

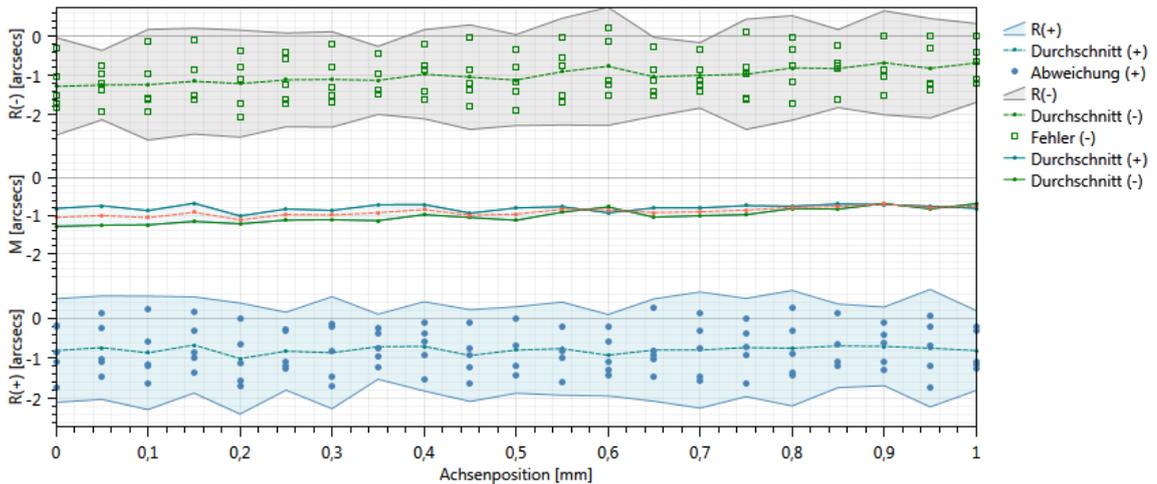
X-Achse, X/Z-Ebene, Messlänge 1 mm

File: X_Achse_Rot_1mm_Pos2_ZX_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

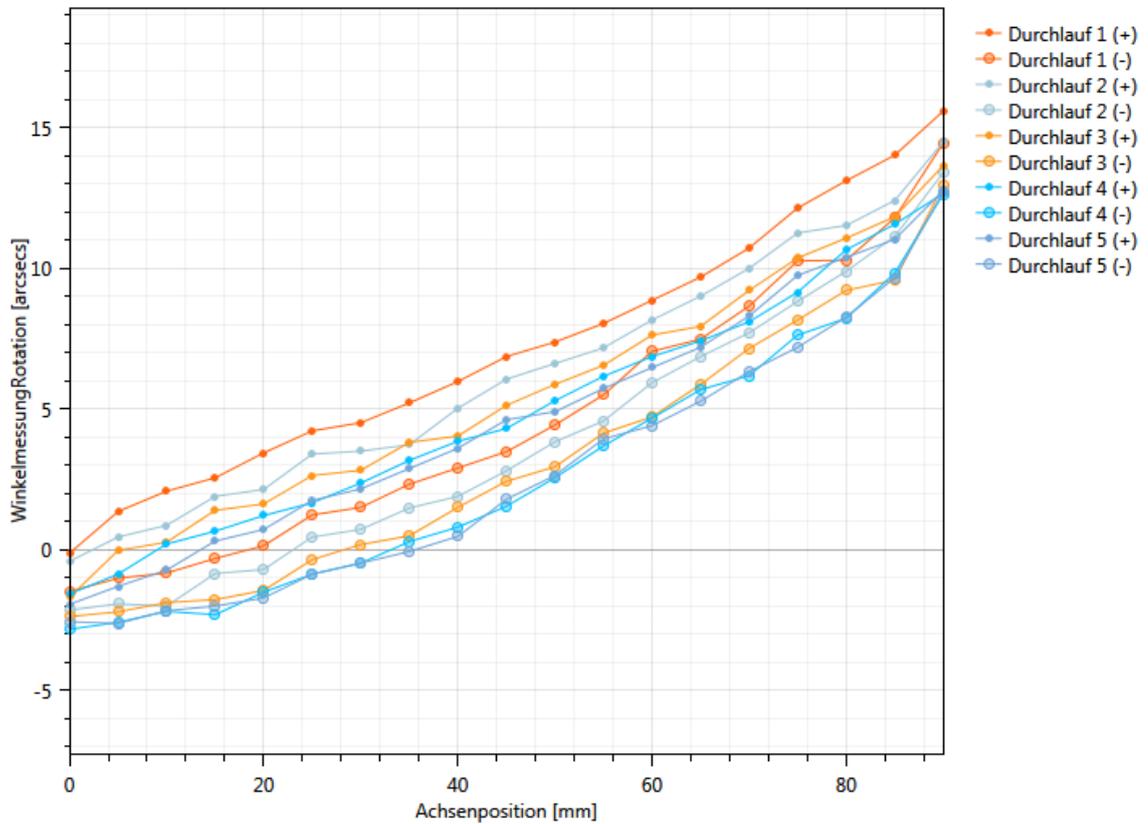


Name	(+) [arcsec]	(-) [arcsecs]	Bidir [arcse]	Name	Wert [arcsecs]
Positionierfehler (A)	3,1	3,4	3,4	Umkehrbewegung (B)	0,5
Reproduzierbarkeit der P	2,9	3,0	3,2	Mittleres Umkehrspiel	0,2
Systematischer Positioni	0,3	0,6	0,6	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers I	0,4

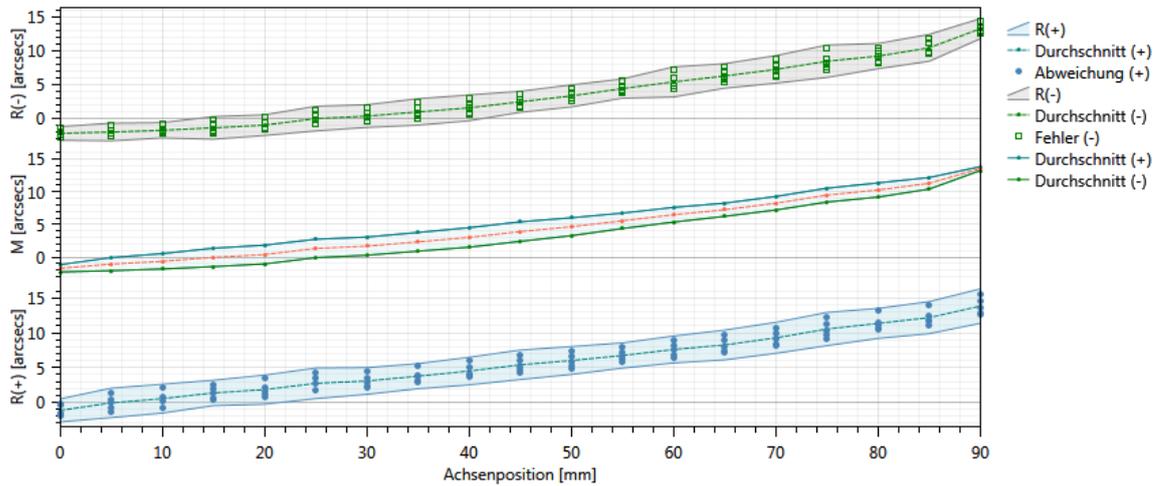
X-Achse, X/Z-Ebene, Messlänge 90 mm

File: X_Achse_Rot_90mm_Pos2_ZX_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

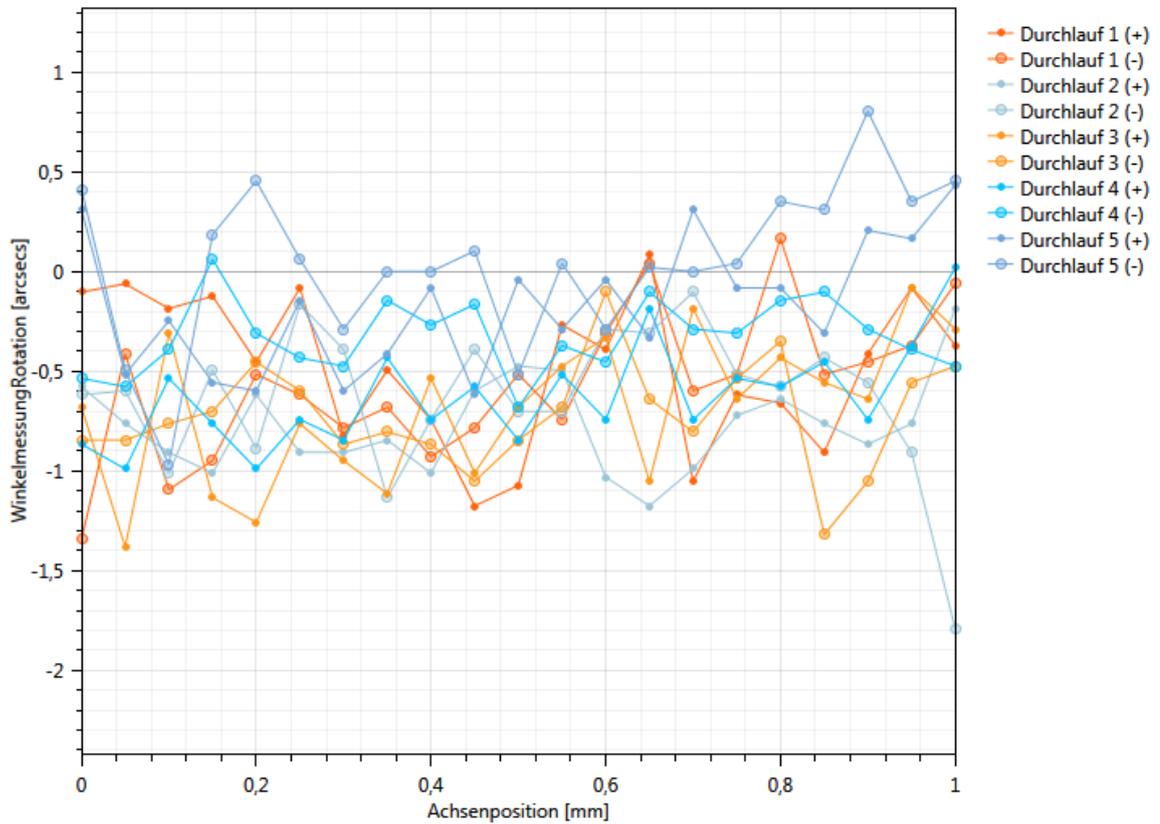


Name	(+) [arcsecs]	(-) [arcsecs]	Bidir [arcsec]	Name	Wert [arcsecs]
Positionierfehler (A)	19,1	18,1	19,7	Umkehrbewegung (B)	3,0
Reproduzierbarkeit der P	4,9	4,8	6,9	Mittleres Umkehrspiel	2,3
Systematischer Positioni	15,0	15,5	16,1	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	15,2

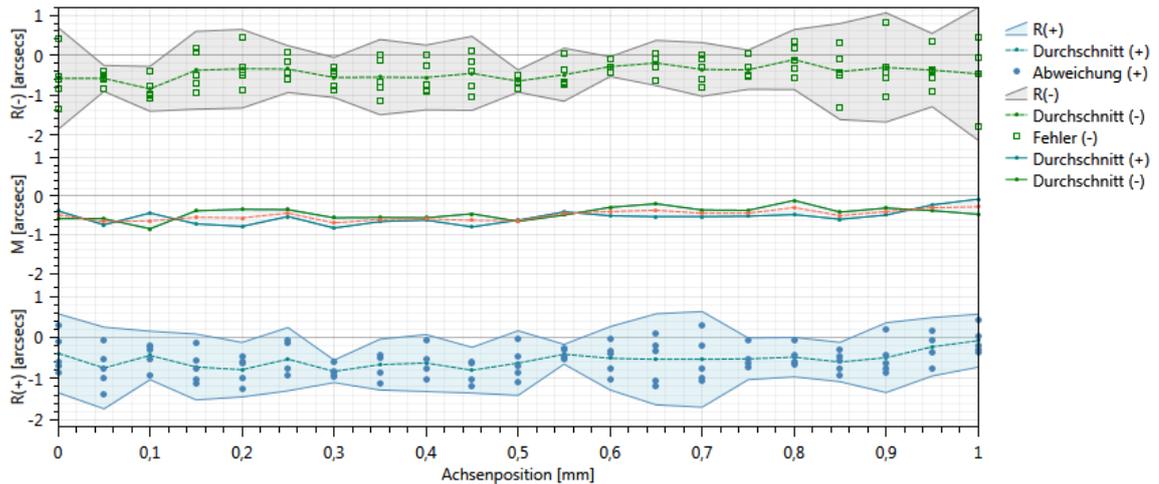
Y-Achse, Y/Z-Ebene, Messlänge 1 mm

File: Y_Achse_Rot_1mm_Pos3_ZY_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

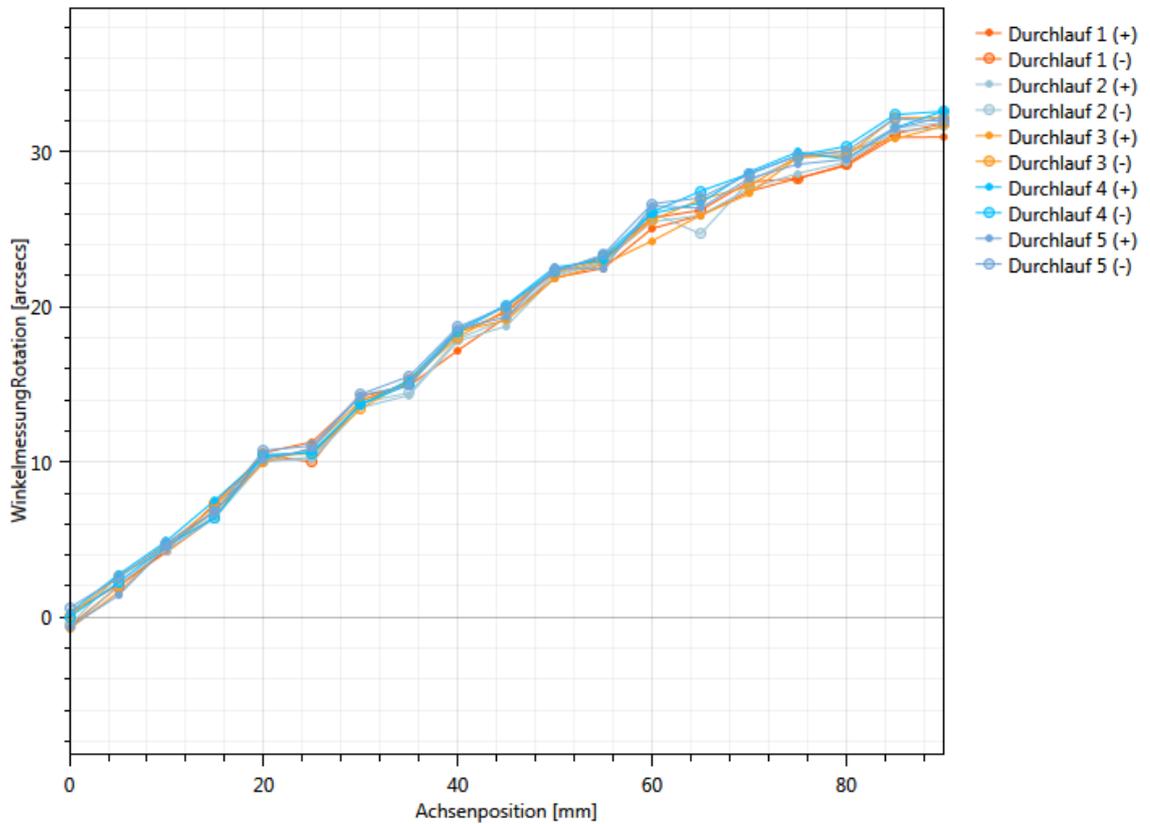


Name	(+) [arcsecs]	(-) [arcsecs]	Bidir [arcse]	Name	Wert [arcsecs]
Positionierfehler (A)	2,4	3,3	3,3	Umkehrbewegung (B)	0,4
Reproduzierbarkeit der P	2,3	3,3	3,3	Mittleres Umkehrspiel	-0,1
Systematischer Positioni	0,7	0,7	0,8	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	0,4

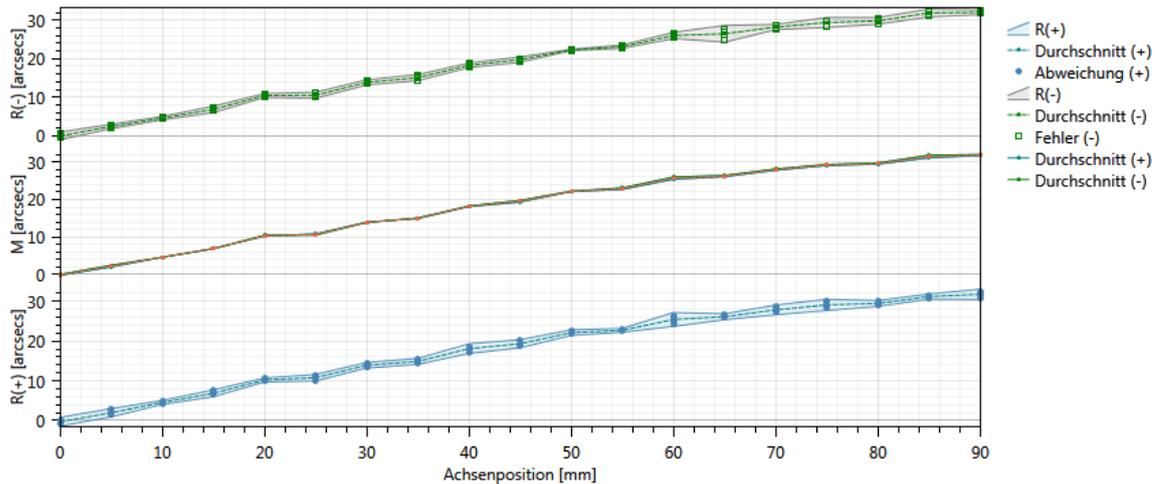
Y-Achse, Y/Z-Ebene, Messlänge 90 mm

File: Y_Achse_Rot_90mm_Pos3_ZY_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

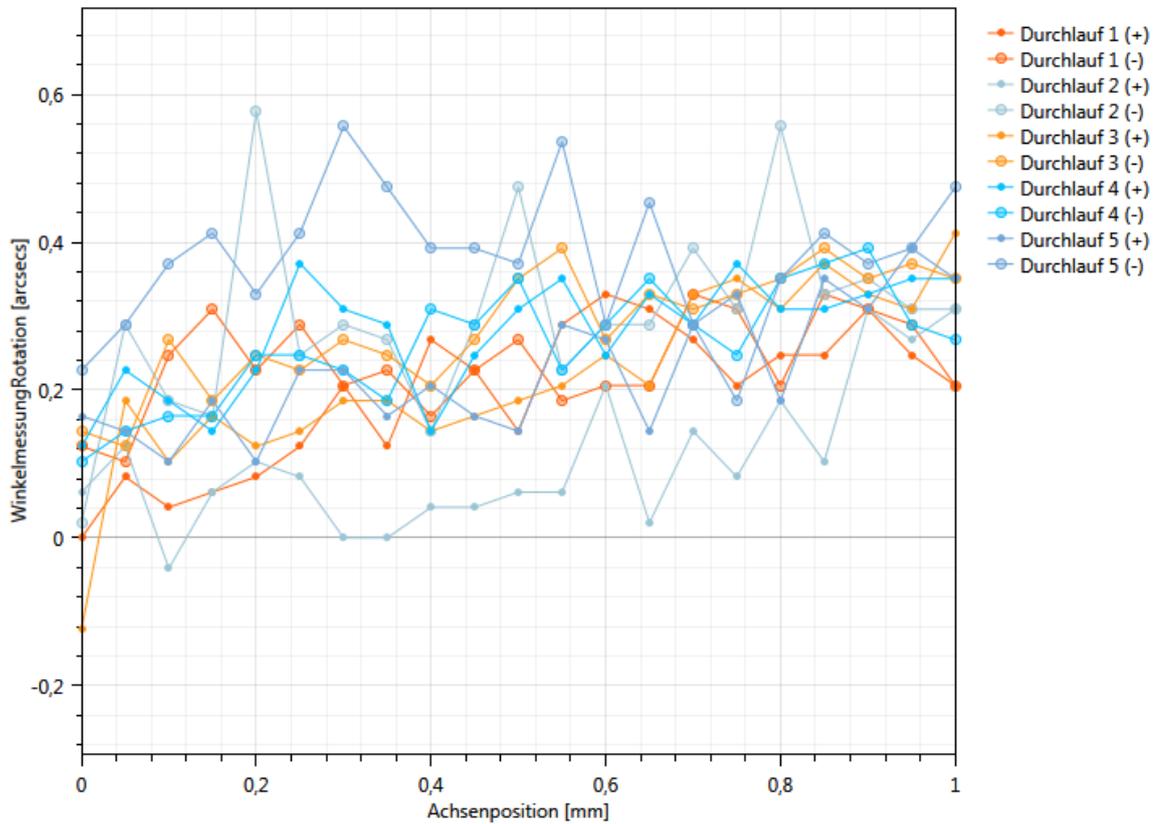


Name	(+) [arcsecs]	(-) [arcsecs]	Bidir [arcse]	Name	Wert [arcsecs]
Positionierfehler (A)	34,5	34,0	34,5	Umkehrbewegung (B)	0,7
Reproduzierbarkeit der P	3,5	4,3	4,3	Mittleres Umkehrspiel	-0,2
Systematischer Positioni	32,1	32,2	32,4	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	32,2

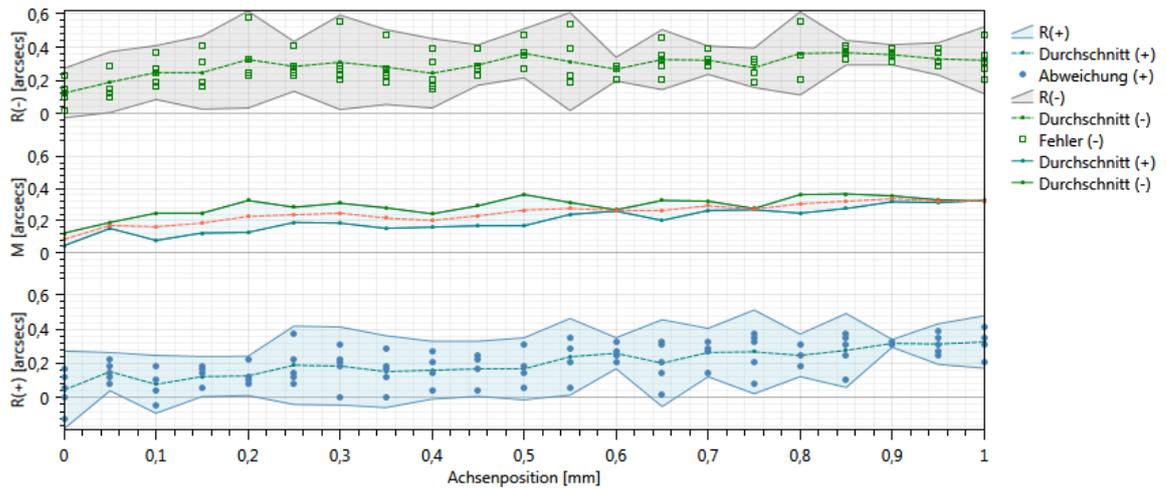
Y-Achse, X/Y-Ebene, Messlänge 1 mm

File: Rotation_Y_1mm_Pos2_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

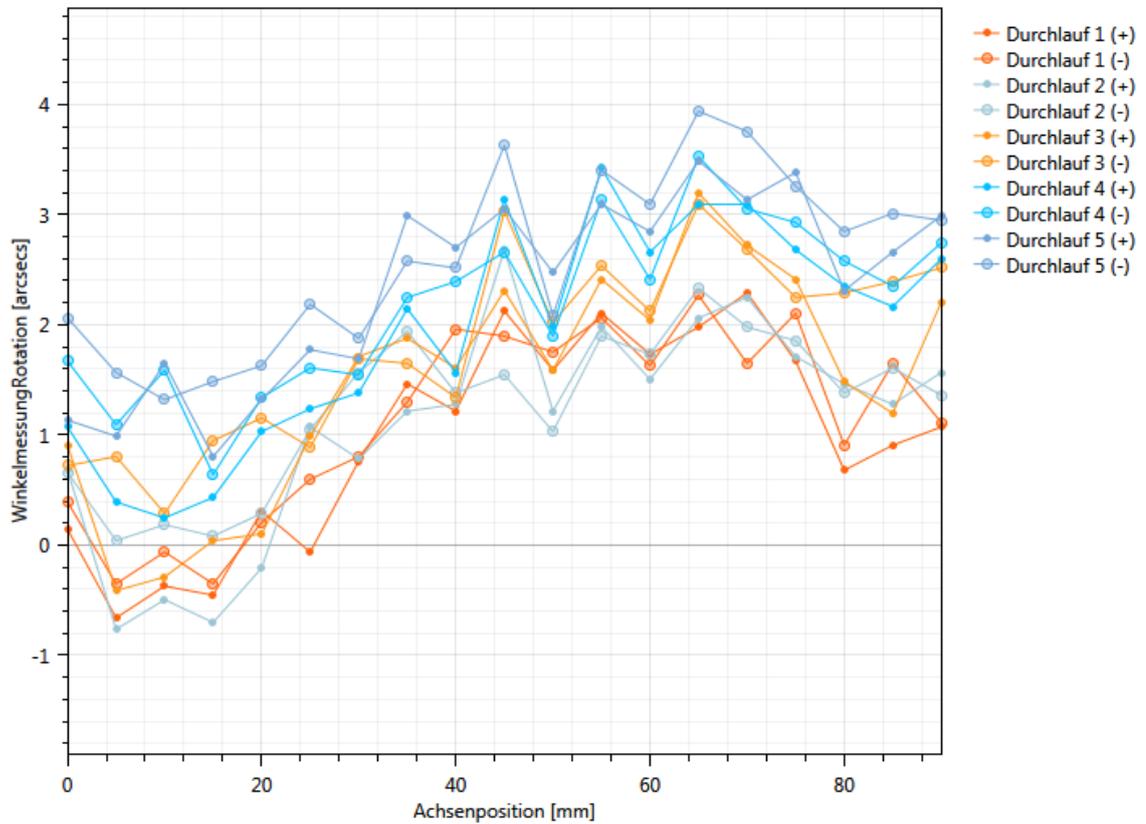


Name	(+) [arcsecs]	(-) [arcsecs]	Bidir [arcse]	Name	Wert [arcsecs]
Positionierfehler (A)	0,7	0,6	0,8	Umkehrbewegung (B)	0,2
Reproduzierbarkeit der P	0,5	0,6	0,6	Mittleres Umkehrspiel	-0,1
Systematischer Positioni	0,3	0,2	0,3	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	0,3

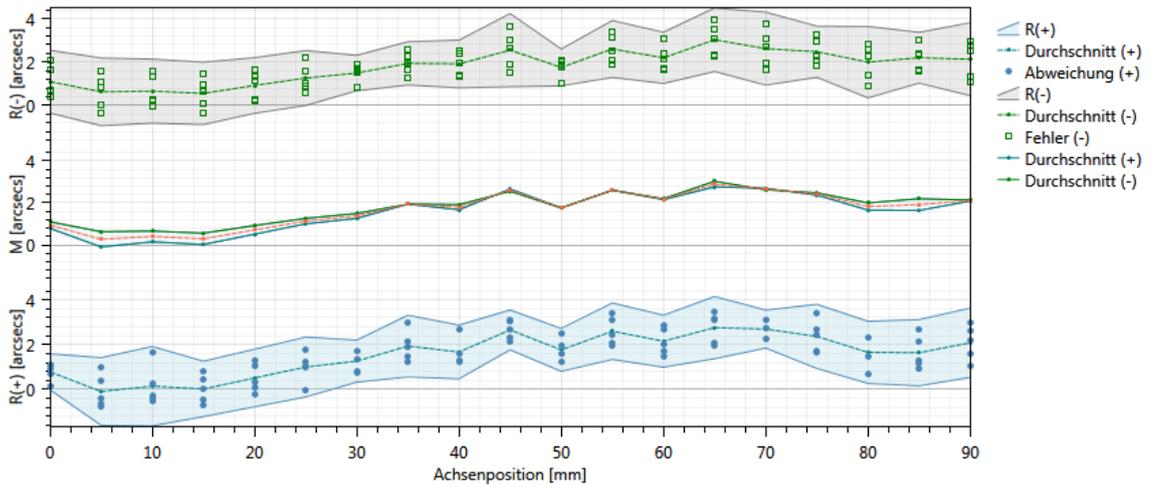
Y-Achse, X/Y-Ebene, Messlänge 90 mm

File: Y_Achse_Rot_90mm_XY_#2

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

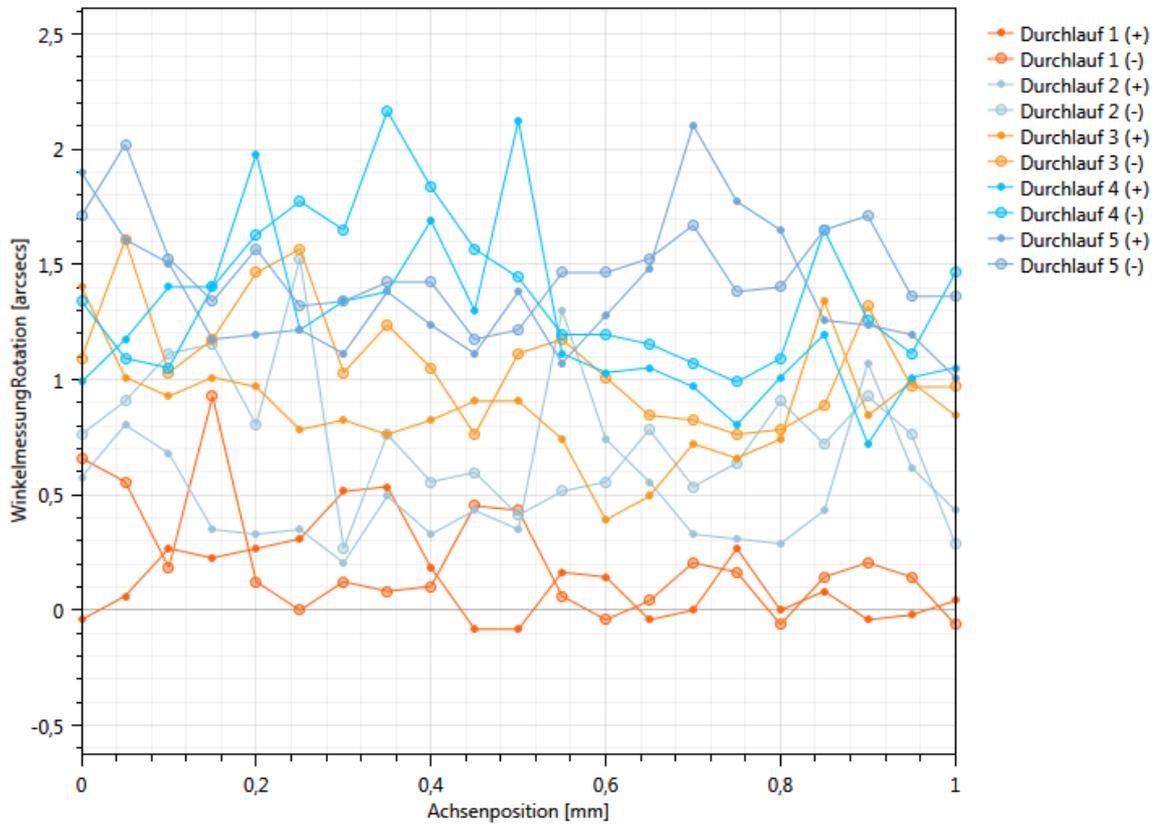


Name	(+) [arcsecs]	(-) [arcsecs]	Bidir [arcsecs]	Name	Wert [arcsecs]
Positionierfehler (A)	5,8	5,4	6,1	Umkehrbewegung (B)	0,7
Reproduzierbarkeit der P	3,5	3,4	3,8	Mittleres Umkehrspiel	-0,2
Systematischer Positioni	2,9	2,5	3,1	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	2,6

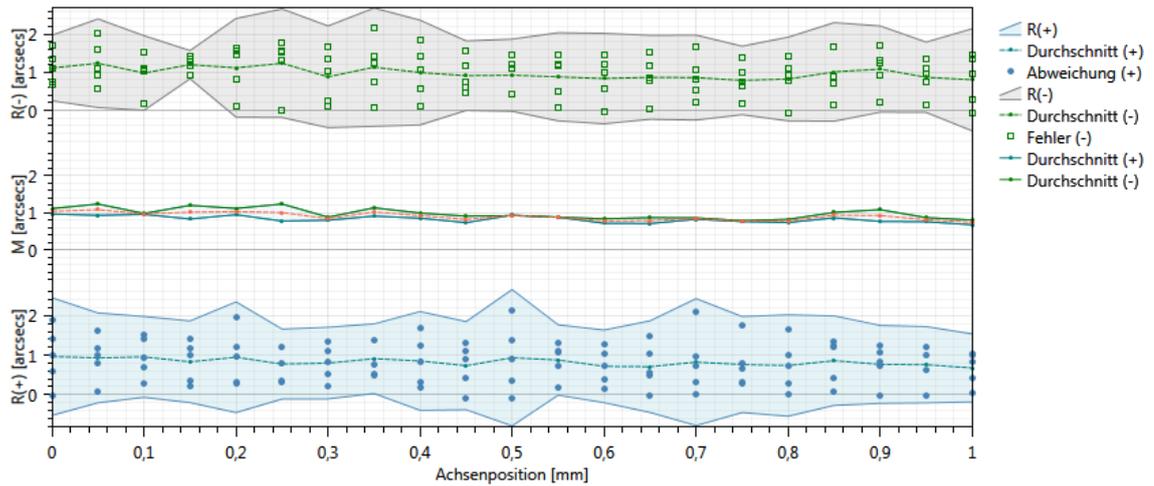
Z-Achse, Y/Z-Ebene, Messlänge 1 mm

File: Z_Achse_Rot_1mm_Pos1_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

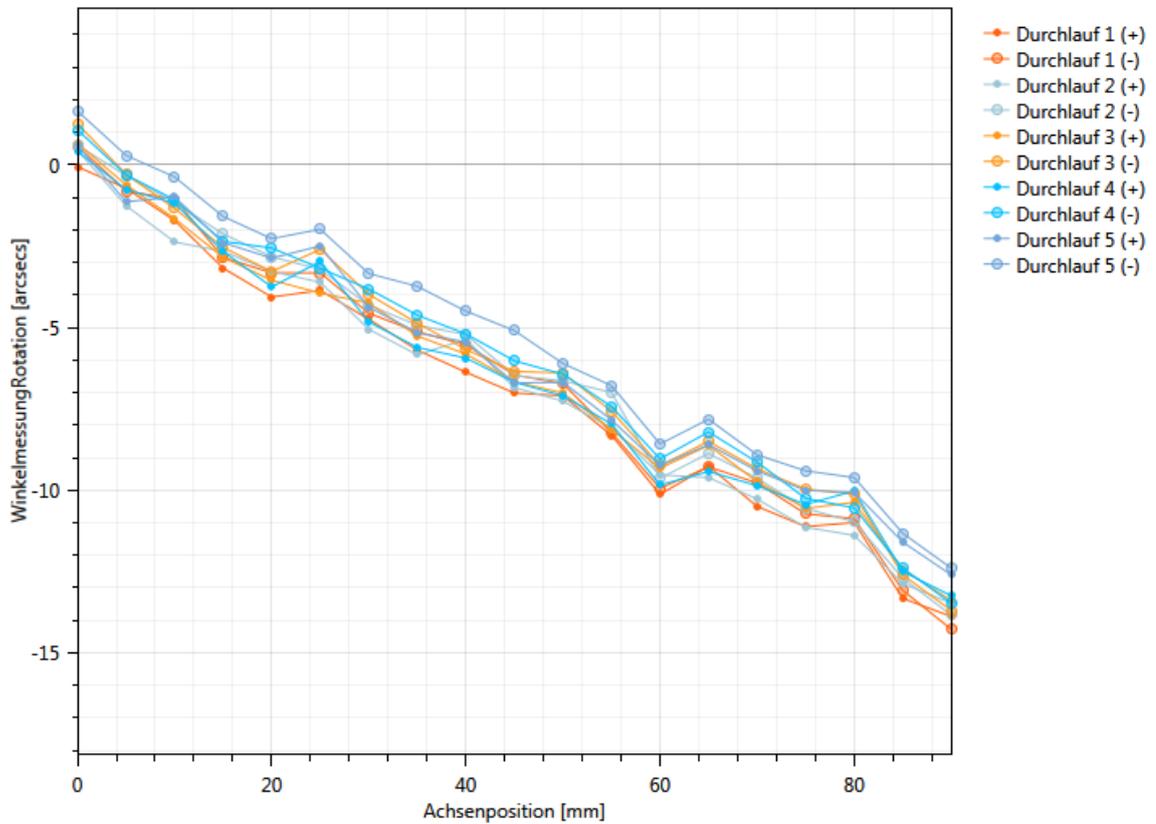


Name	(+) [arcsecs]	(-) [arcsecs]	Bidir [arcse	Name	Wert [arcsecs]
Positionierfehler (A)	3,5	3,2	3,5	Umkehrbewegung (B)	0,5
Reproduzierbarkeit der P	3,5	3,1	3,5	Mittleres Umkehrspiel	-0,2
Systematischer Positioni	0,3	0,4	0,6	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	0,3

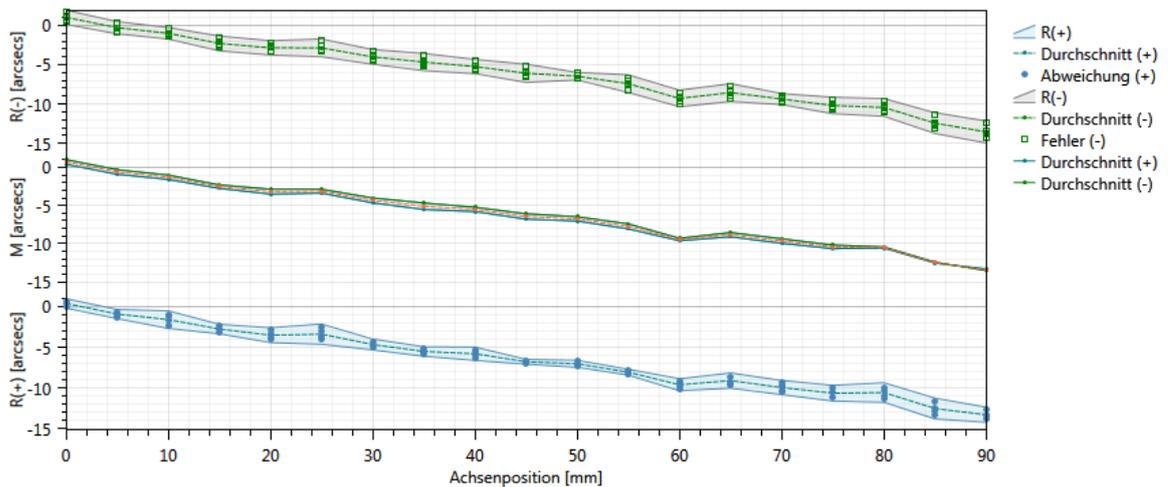
Z-Achse, Y/Z-Ebene, Messlänge 90 mm

File: Z_Achse_Rot_90mm_Pos1_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

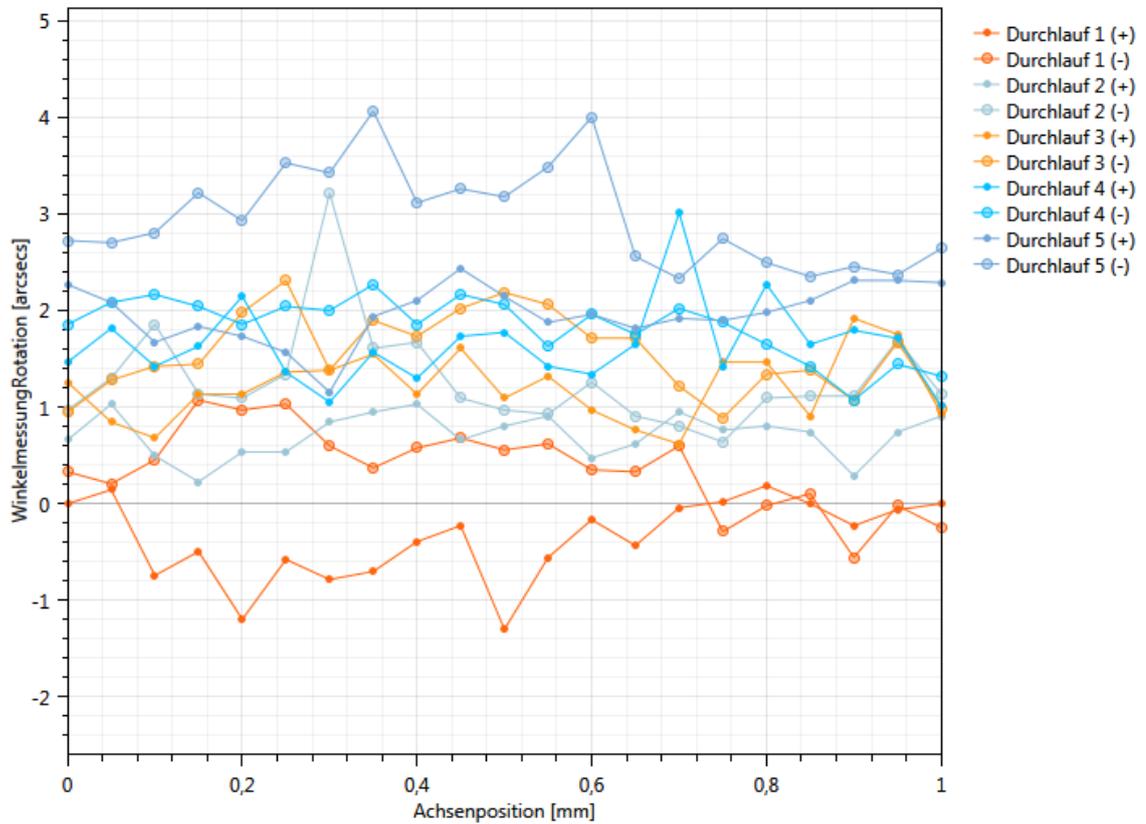


Name	(+) [arcsec]	(-) [arcsecs]	Bidir [arcse]	Name	Wert [arcsecs]
Positionierfehler (A)	15,2	16,9	16,9	Umkehrbewegung (B)	0,9
Reproduzierbarkeit der P	2,6	2,8	2,9	Mittleres Umkehrspiel	-0,5
Systematischer Positioni	13,7	14,6	14,6	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	14,1

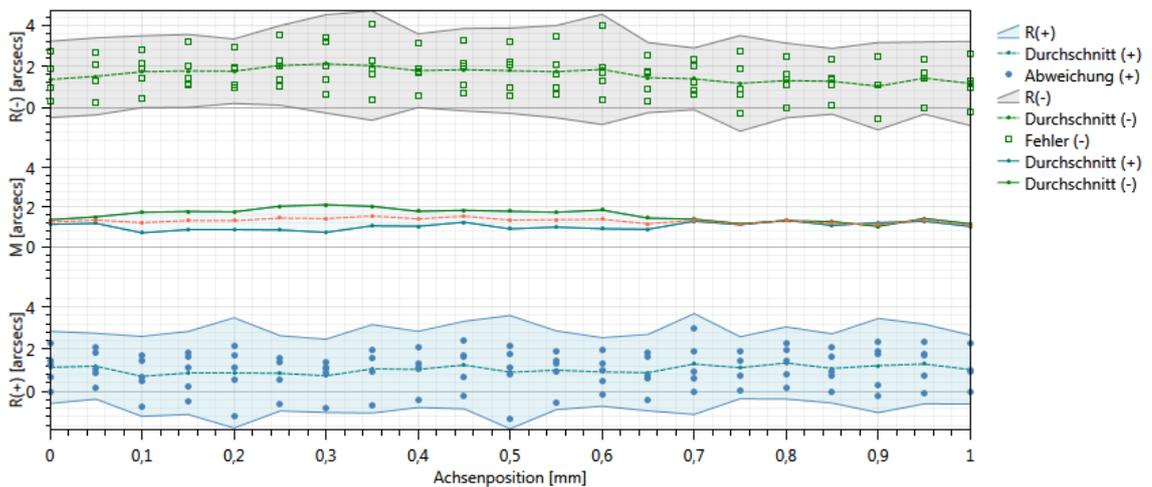
Z-Achse, X/Z-Ebene, Messlänge 1 mm

File: Z_Achse_Rot_1mm_Pos2_ZX_Ebene_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:

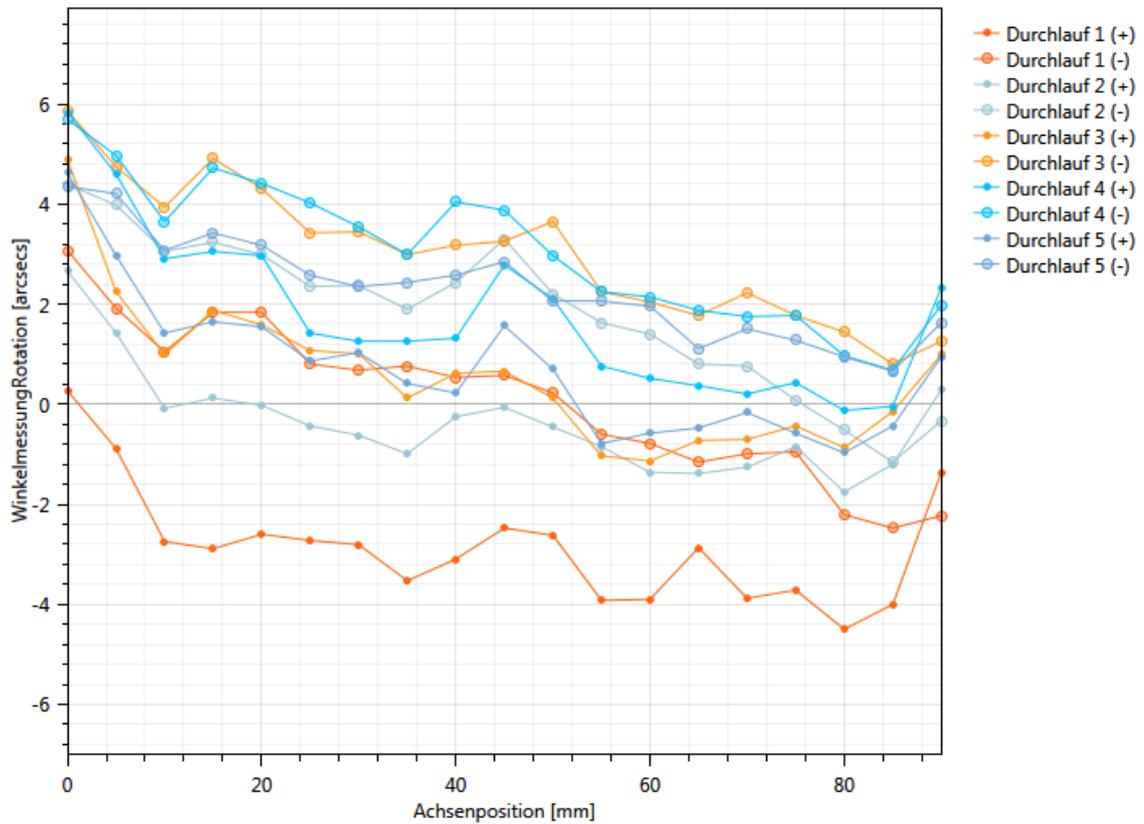


Name	(+) [arcsec]	(-) [arcsecs]	Bidir [arcse]	Name	Wert [arcsecs]
Positionierfehler (A)	5,5	5,9	6,5	Umkehrbewegung (B)	1,4
Reproduzierbarkeit der P	5,4	5,4	5,7	Mittleres Umkehrspiel	-0,6
Systematischer Positioni	0,6	1,1	1,4	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	0,5

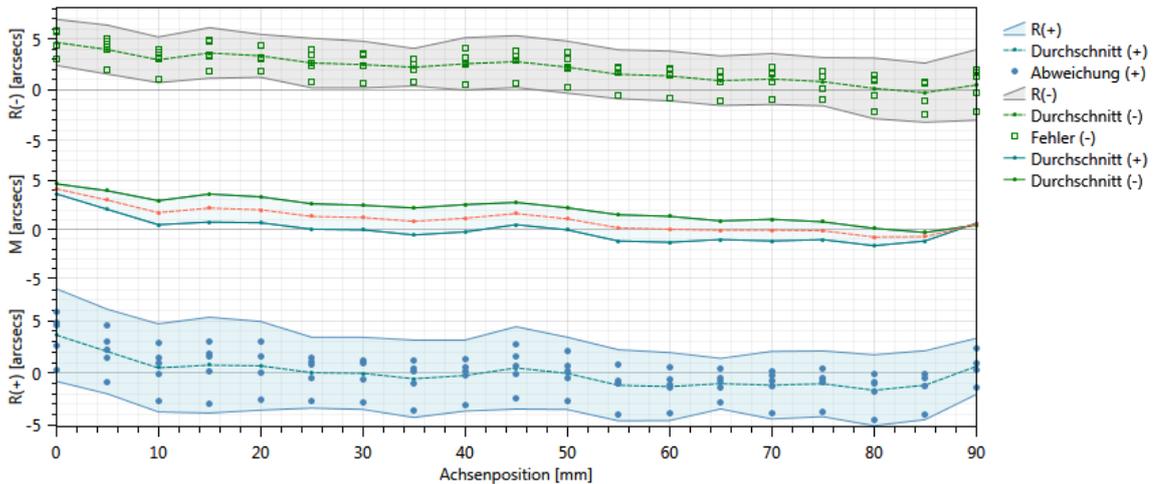
Z-Achse, X/Z-Ebene, Messlänge 90 mm

File: Z_Achse_Rot_90mm_Pos2_ZX_Ebene_#1

Rohdaten:



Auswertung nach ISO230-2 2014:



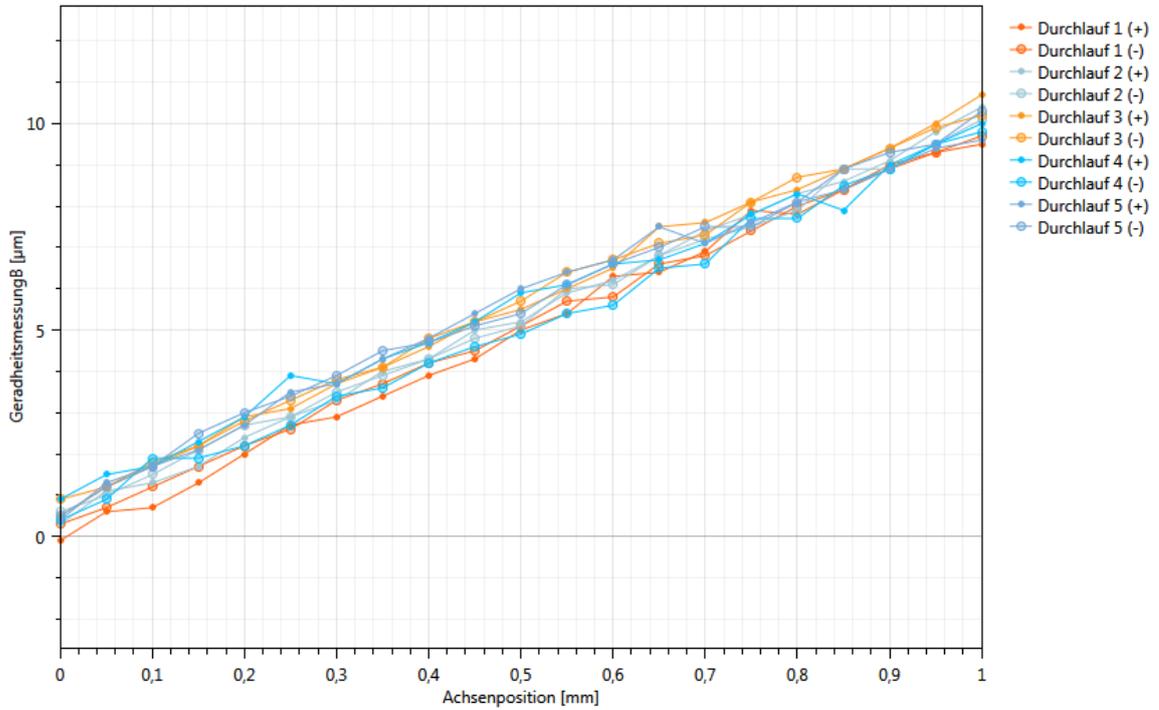
Name	(+) [arcsec]	(-) [arcsecs]	Bidir [arcse]	Name	Wert [arcsecs]
Positionierfehler (A)	13,1	10,2	13,1	Umkehrbewegung (B)	2,9
Reproduzierbarkeit der P	9,2	7,0	9,9	Mittleres Umkehrspiel	-2,1
Systematischer Positioni	5,3	5,0	6,3	Bereich des mittleren bidirektionalen Positionierfehlers	4,9

Geradheit:

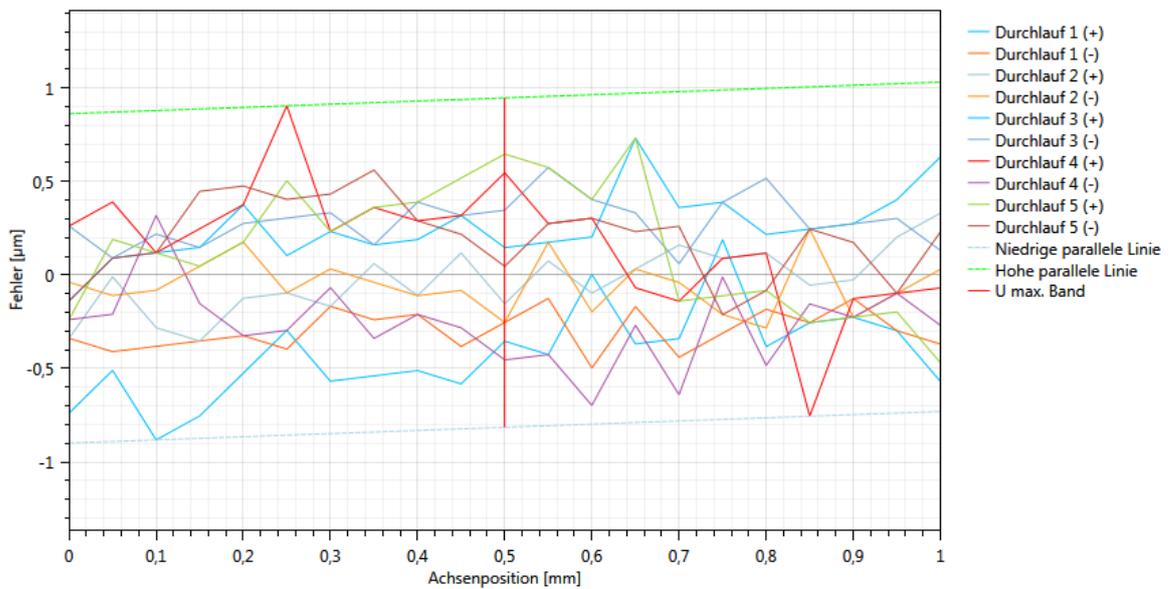
X-Achse, X/Y-Ebene, Messlänge 1 mm

File: X_Achse_Ger_1mm_hor_#1

Rohdaten:

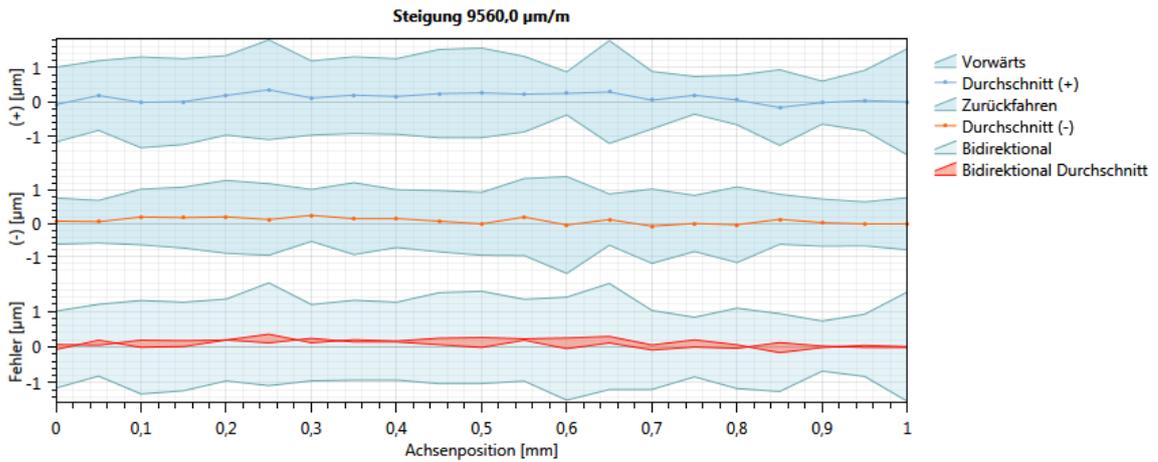


Auswertung nach VDI 2617 (1989):



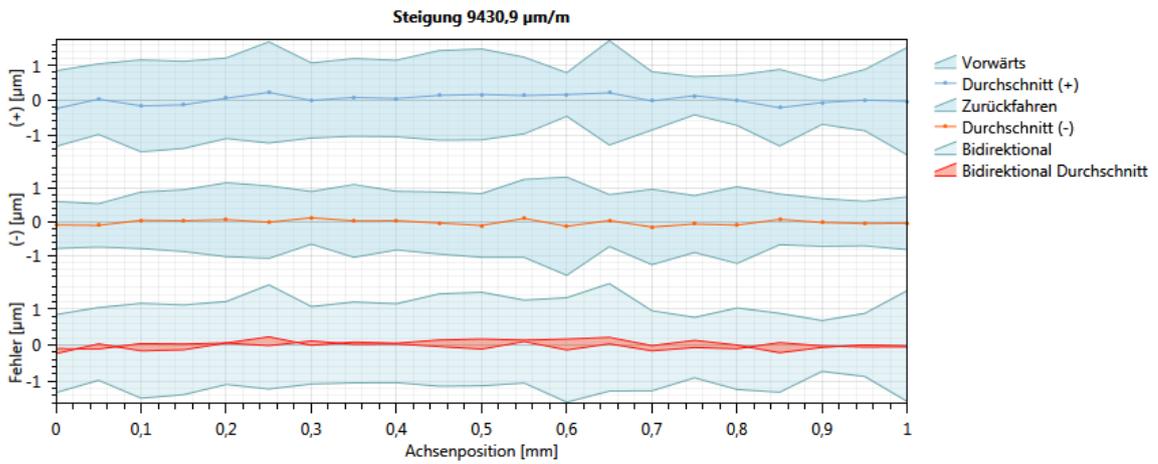
Name	Wert [µm]
U Max.	1,8

Auswertung nach Renishaw 2012 - Gerade durch Endpunkte:



Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	3,3
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	3,1
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	3,1
Mittleres Umkehrspiel	0,0
Geradheitsabweichung	0,5

Auswertung nach Renishaw 2012 – Summe der kleinsten Fehlerquadrate:

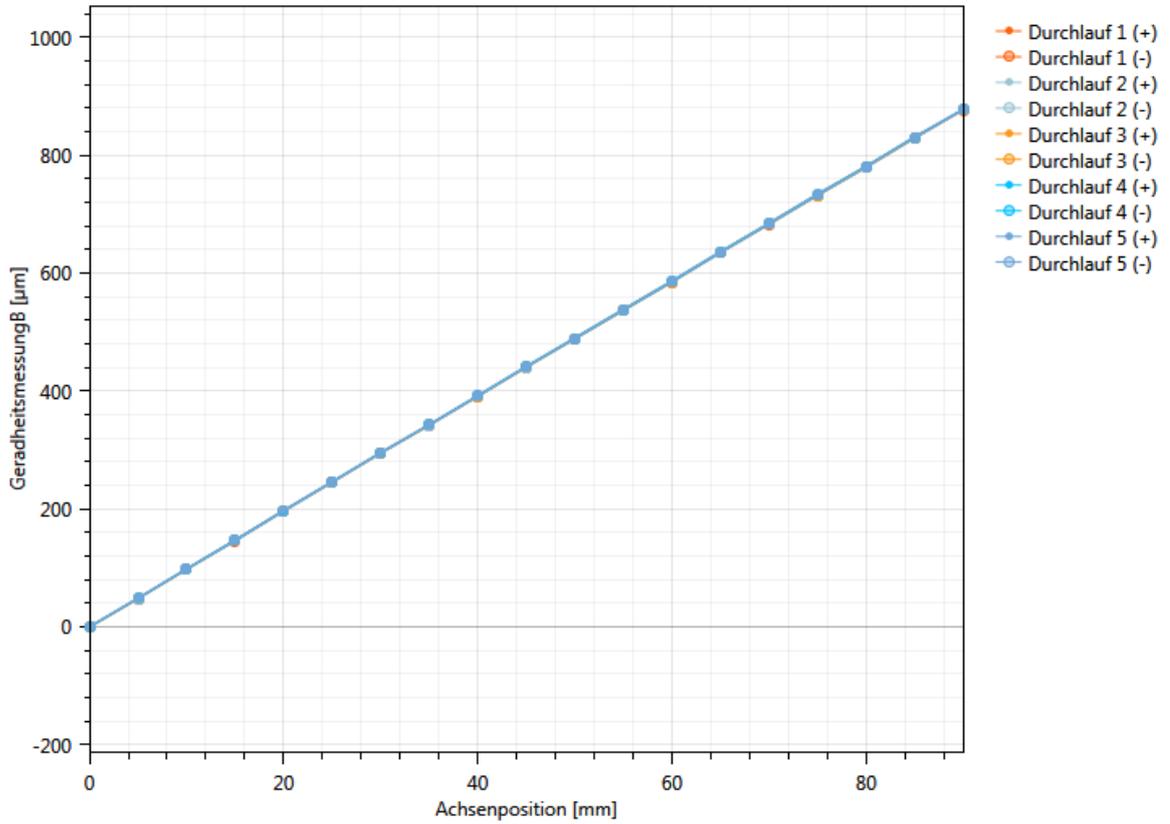


Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	3,3
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	3,1
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	3,1
Mittleres Umkehrspiel	0,0
Geradheitsabweichung	0,5

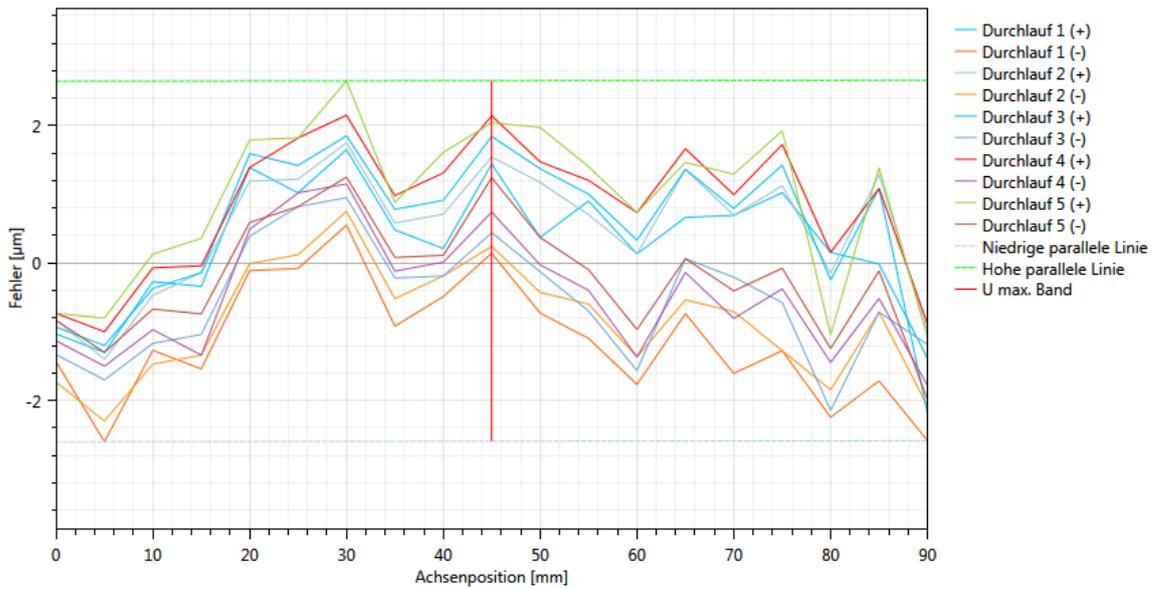
X-Achse, X/Y-Ebene, Messlänge 90 mm

File: X_Achse_Ger_90mm_hor_#1

Rohdaten:

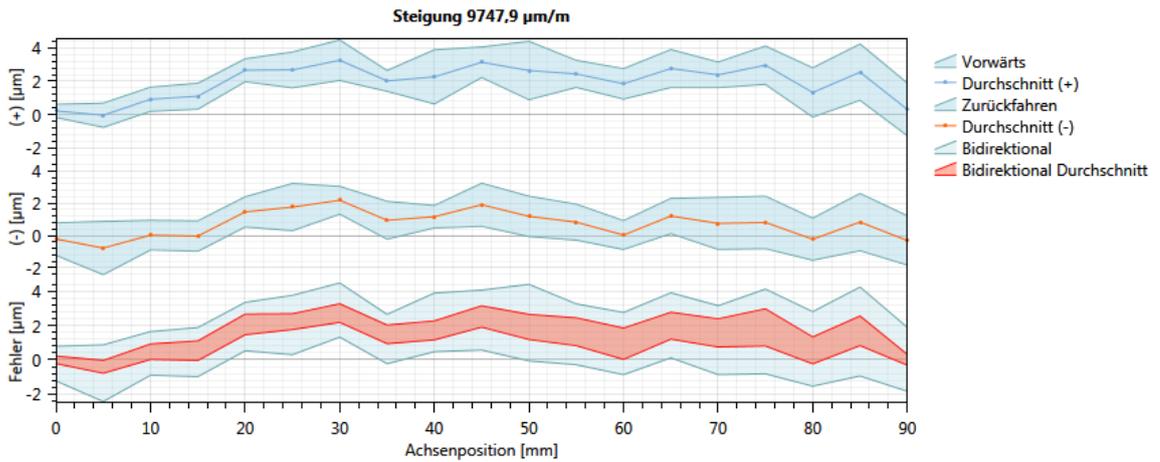


Auswertung nach VDI 2617 (1989):



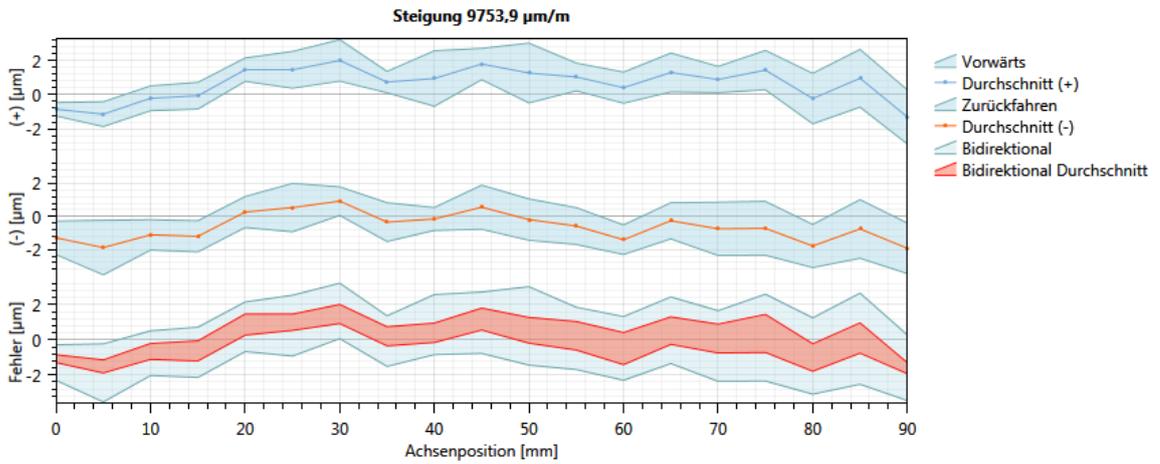
Name	Wert [µm]
U Max.	5,2

Auswertung nach Renishaw 2012 - Gerade durch Endpunkte:



Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	6,9
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	3,5
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	5,2
Mittleres Umkehrspiel	1,3
Geradheitsabweichung	4,0

Auswertung nach Renishaw 2012 – Summe der kleinsten Fehlerquadrate:

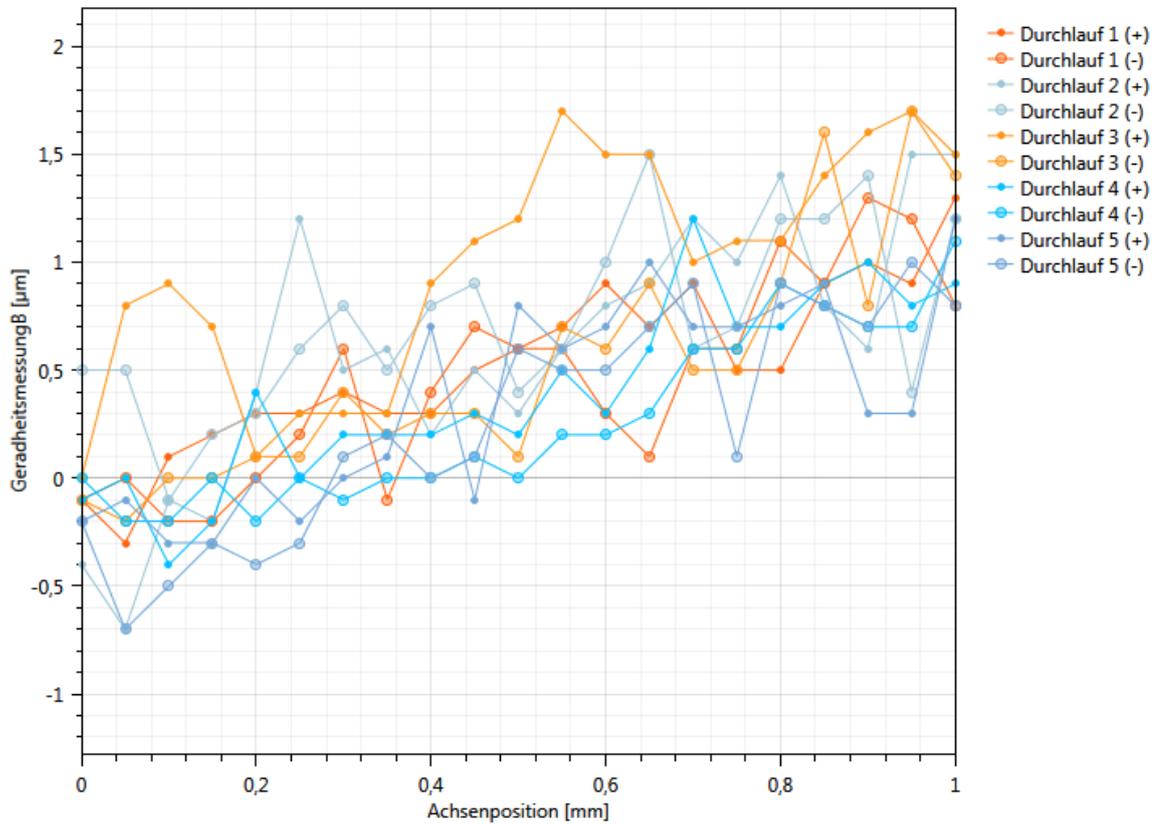


Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	6,8
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	3,5
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	5,2
Mittleres Umkehrspiel	1,3
Geradheitsabweichung	3,9

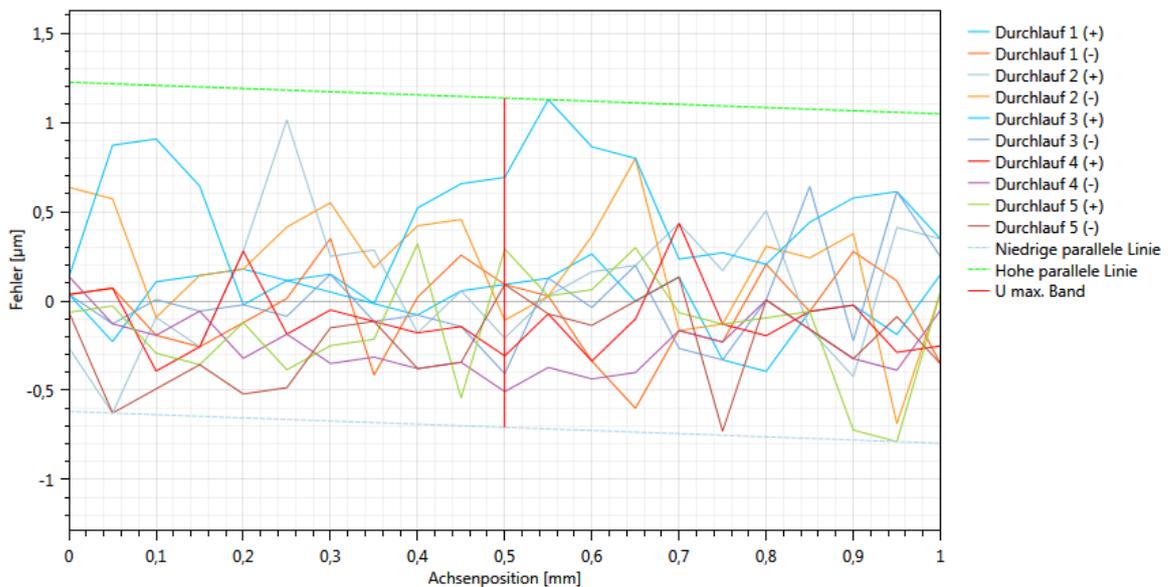
X-Achse, X/Z-Ebene, Messlänge 1 mm

File: X_Achse_Ger_1mm_vert_#1

Rohdaten:

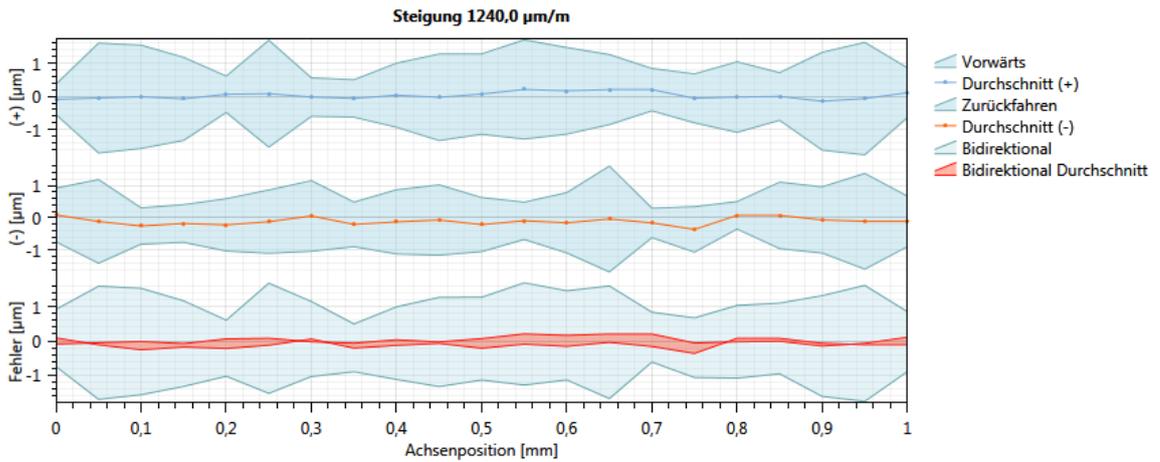


Auswertung nach VDI 2617 (1989):



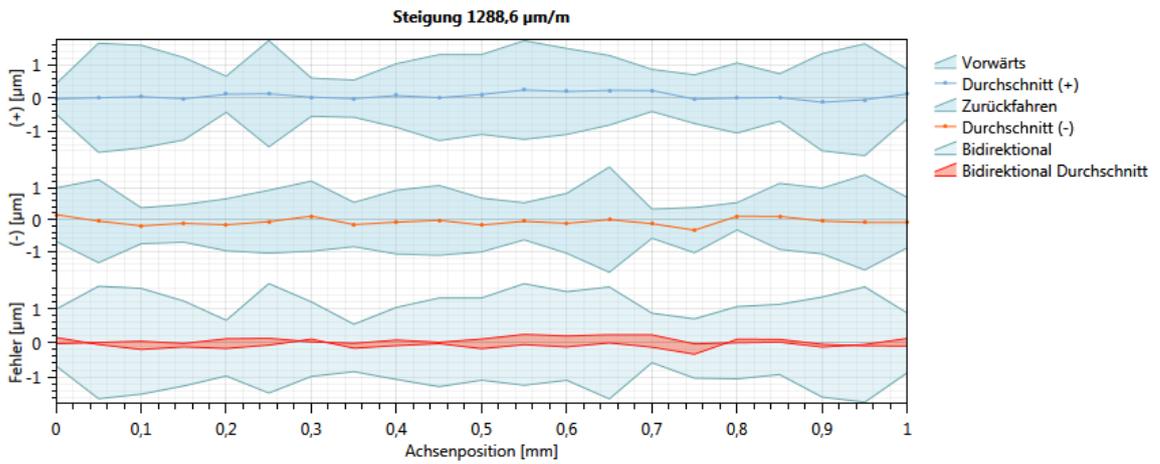
Name	Wert [µm]
U Max.	1,8

Auswertung nach Renishaw 2012 - Gerade durch Endpunkte:



Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	3,5
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	3,4
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	3,4
Mittleres Umkehrspiel	0,1
Geradheitsabweichung	0,6

Auswertung nach Renishaw 2012 – Summe der kleinsten Fehlerquadrate:

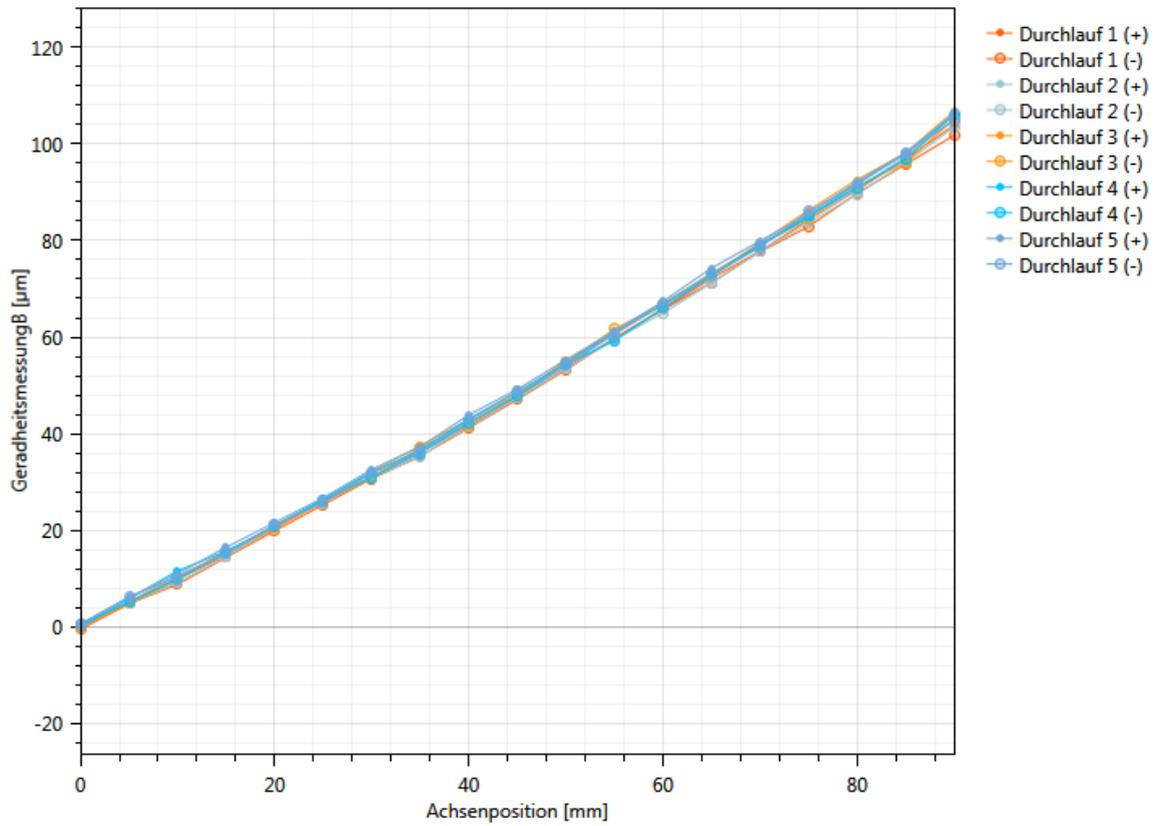


Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	3,5
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	3,4
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	3,4
Mittleres Umkehrspiel	0,1
Geradheitsabweichung	0,6

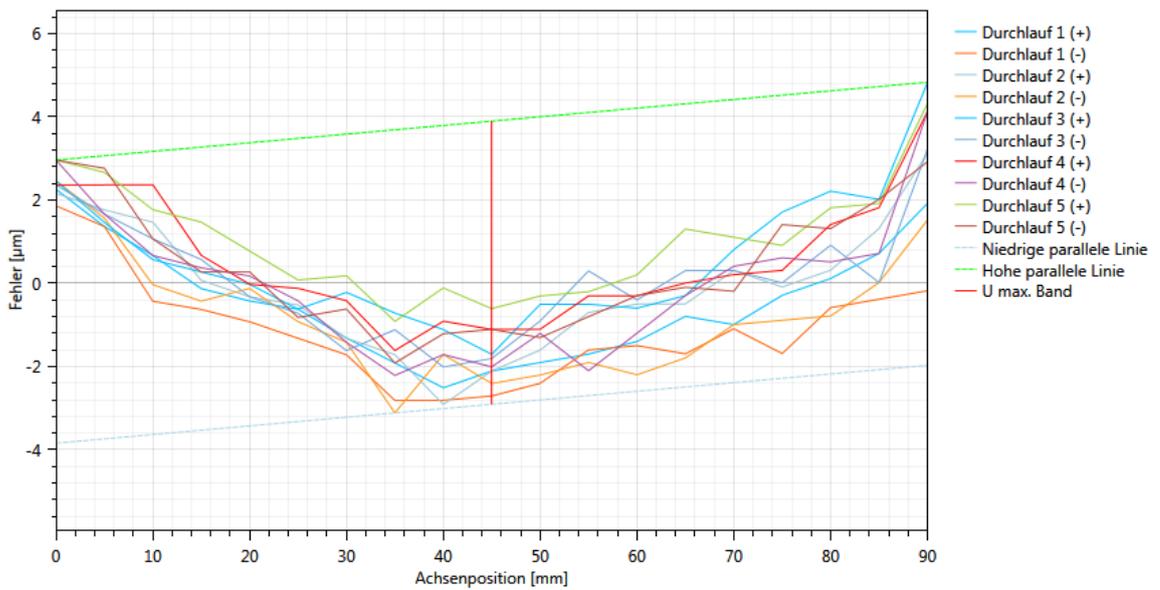
X-Achse, X/Z-Ebene, Messlänge 90 mm

File: X_Achse_Ger_90mm_vert_#2

Rohdaten:

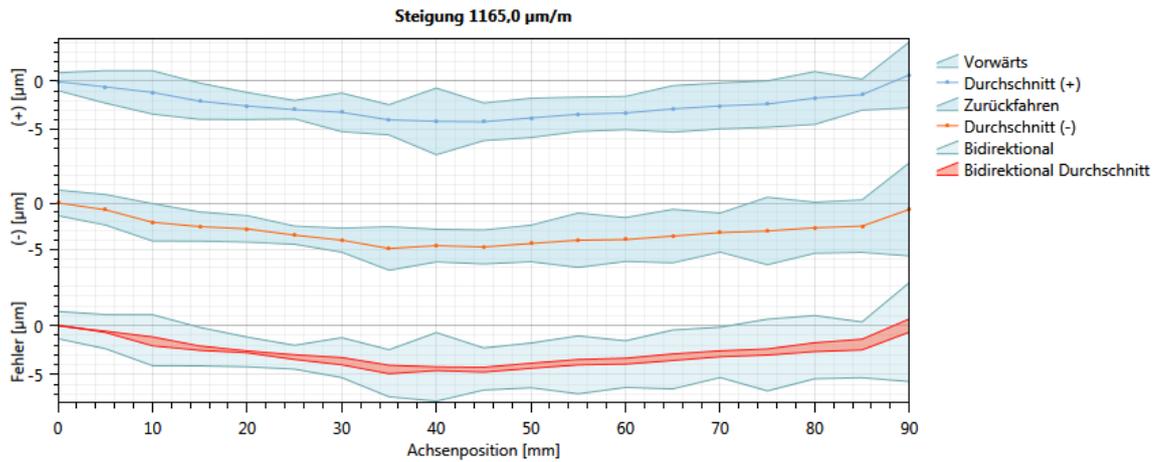


Auswertung nach VDI 2617 (1989):



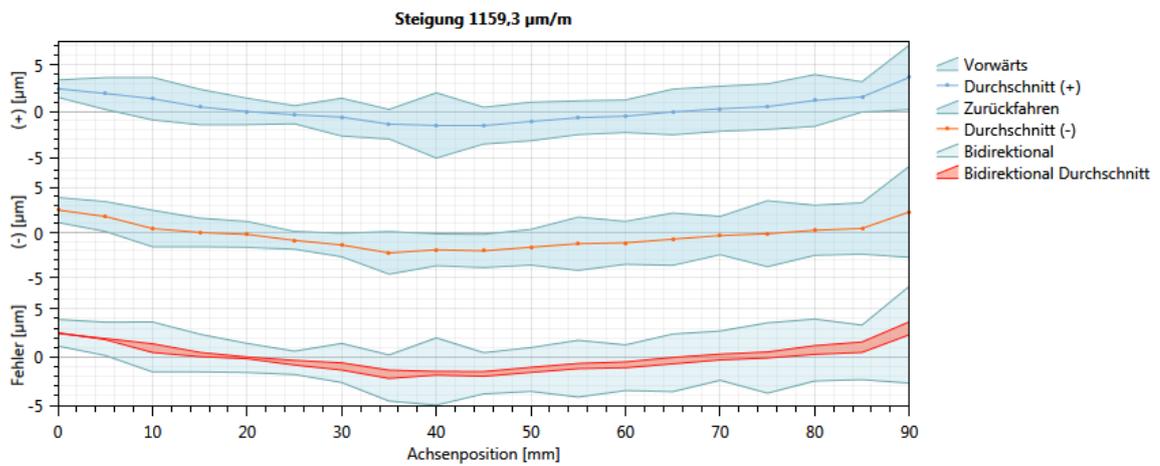
Name	Wert [µm]
U Max.	6,8

Auswertung nach Renishaw 2012 - Gerade durch Endpunkte:



Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	12,1
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	10,1
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	10,1
Mittleres Umkehrspiel	0,6
Geradheitsabweichung	5,6

Auswertung nach Renishaw 2012 – Summe der kleinsten Fehlerquadrate:

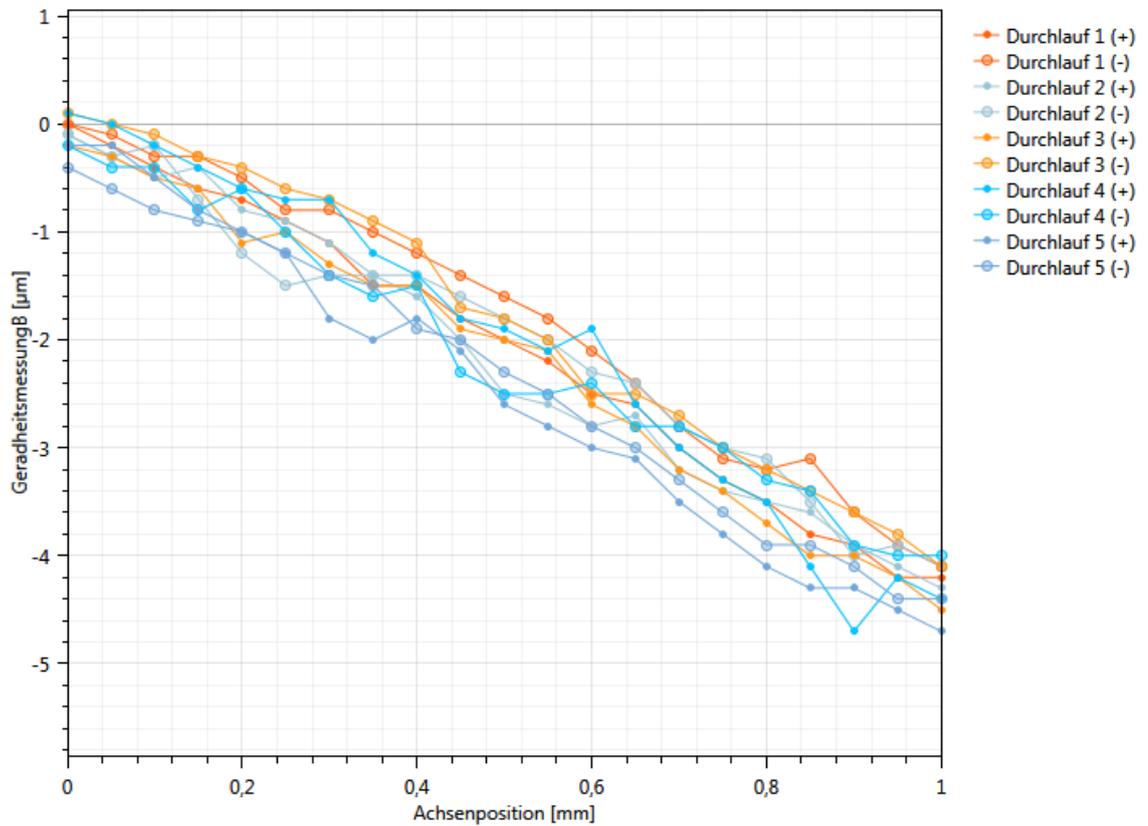


Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	12,4
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	10,1
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	10,1
Mittleres Umkehrspiel	0,6
Geradheitsabweichung	5,9

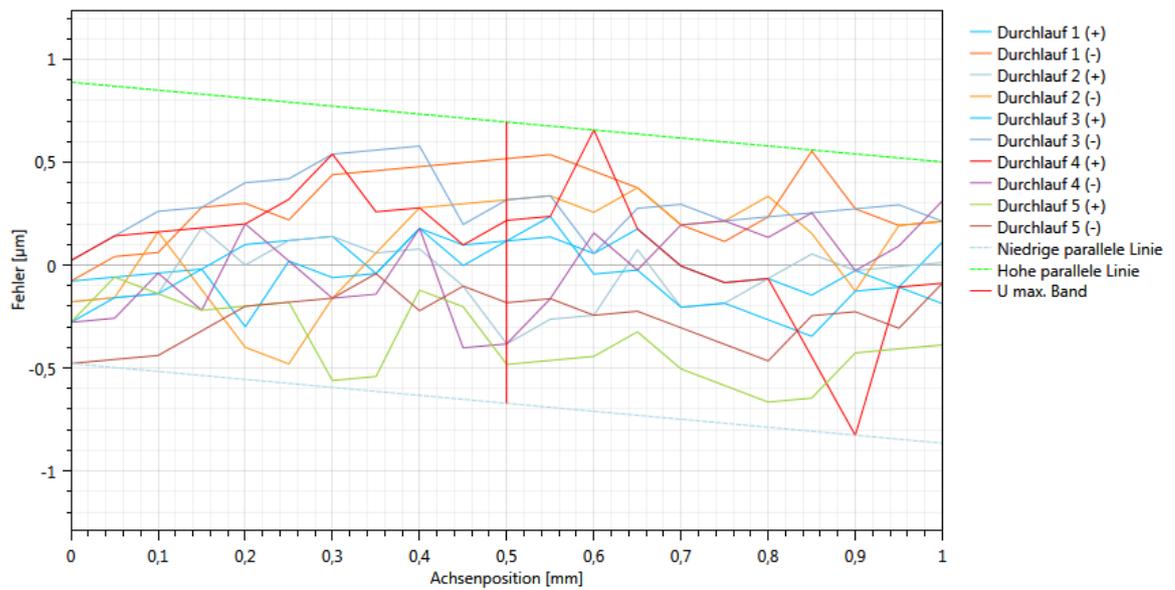
Y-Achse, X/Y-Ebene, Messlänge 1 mm

File: Y_Achse_Ger_1mm_Pos1_#1

Rohdaten:

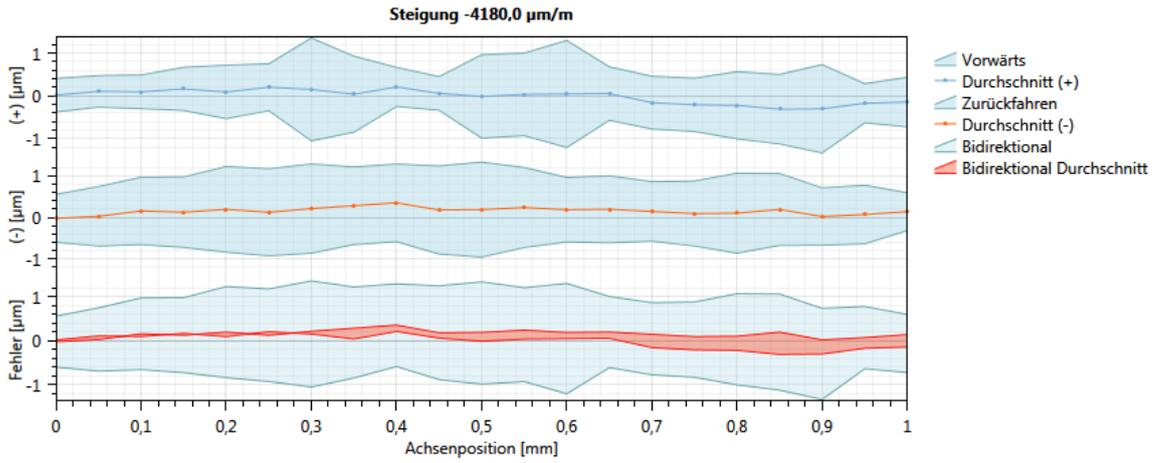


Auswertung nach VDI 2617 (1989):



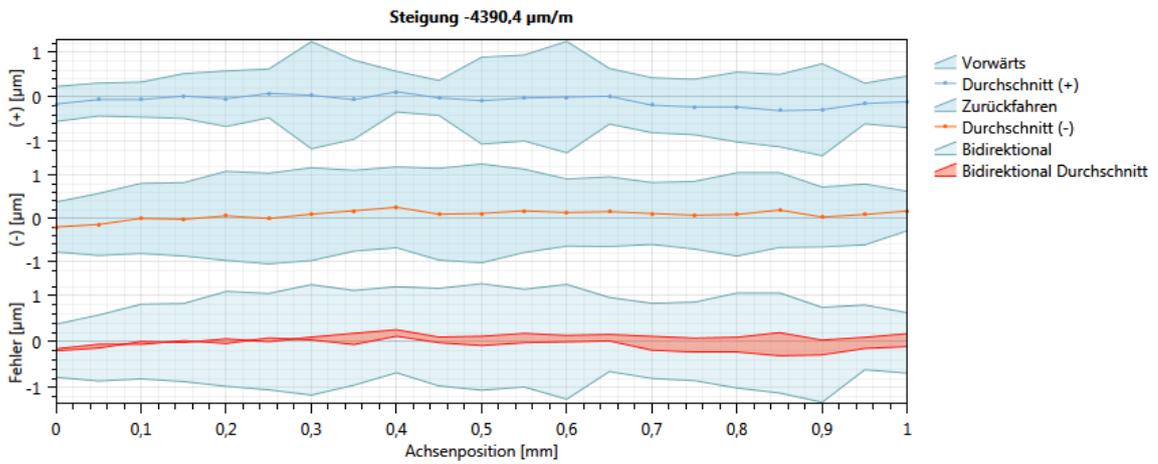
Name	Wert [µm]
U Max.	1,4

Auswertung nach Renishaw 2012 - Gerade durch Endpunkte:



Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	2,7
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	2,5
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	2,5
Mittleres Umkehrspiel	-0,2
Geradheitsabweichung	0,7

Auswertung nach Renishaw 2012 – Summe der kleinsten Fehlerquadrate:

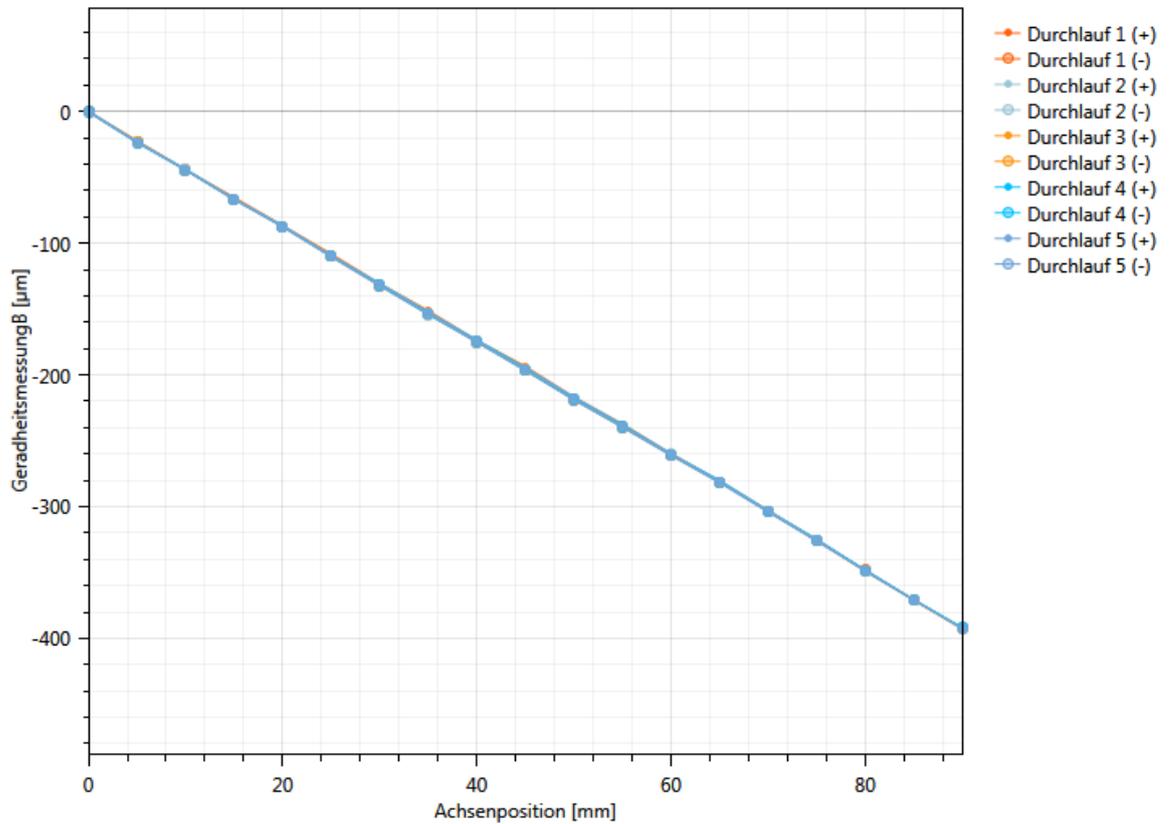


Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	2,6
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	2,5
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	2,5
Mittleres Umkehrspiel	-0,2
Geradheitsabweichung	0,6

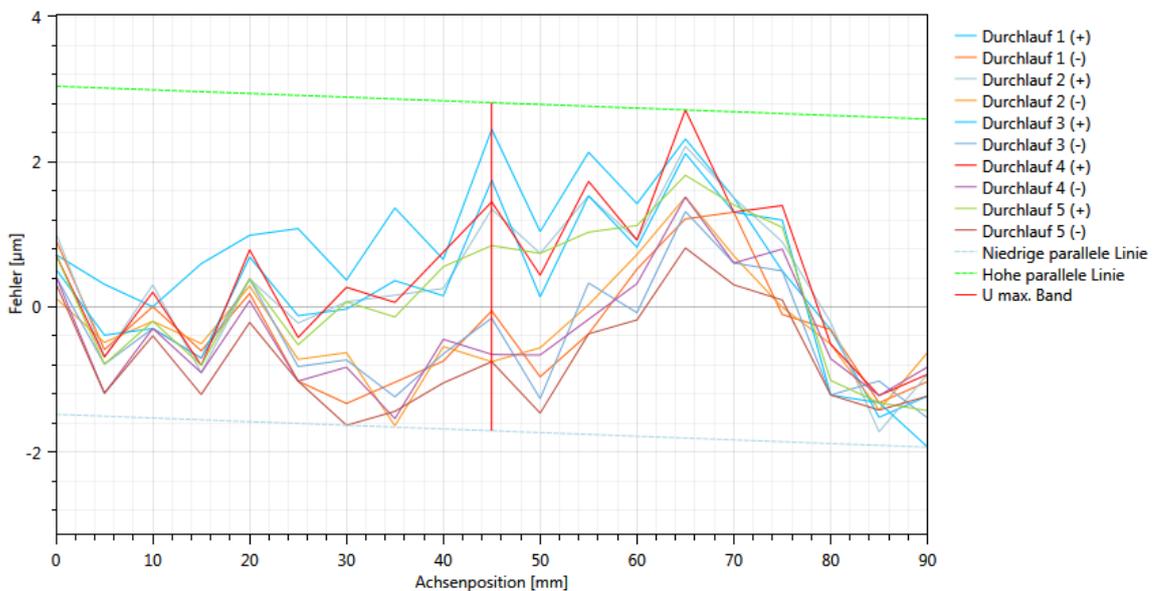
Y-Achse, X/Y-Ebene, Messlänge 90 mm

File: Y_Achse_Ger_90mm_Pos1_#1

Rohdaten:

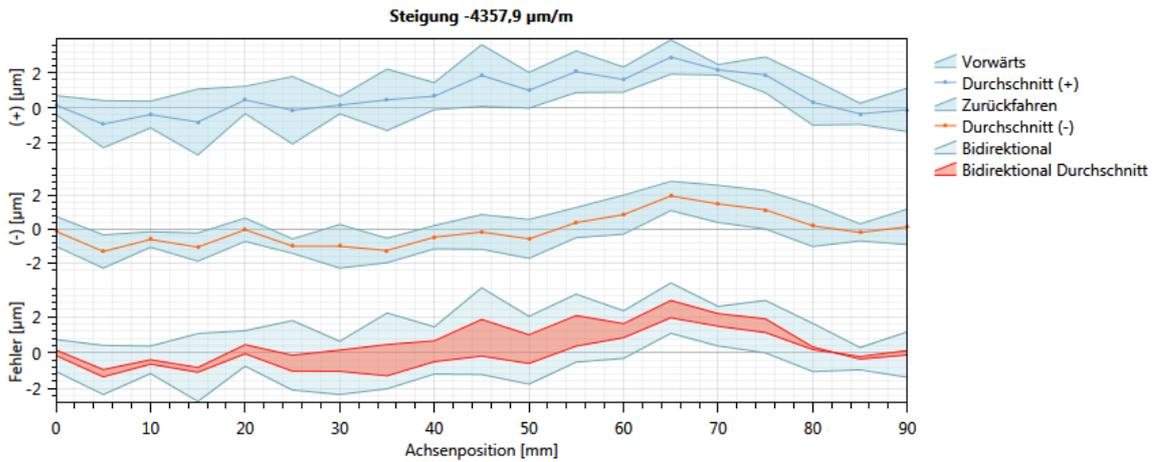


Auswertung nach VDI 2617 (1989):



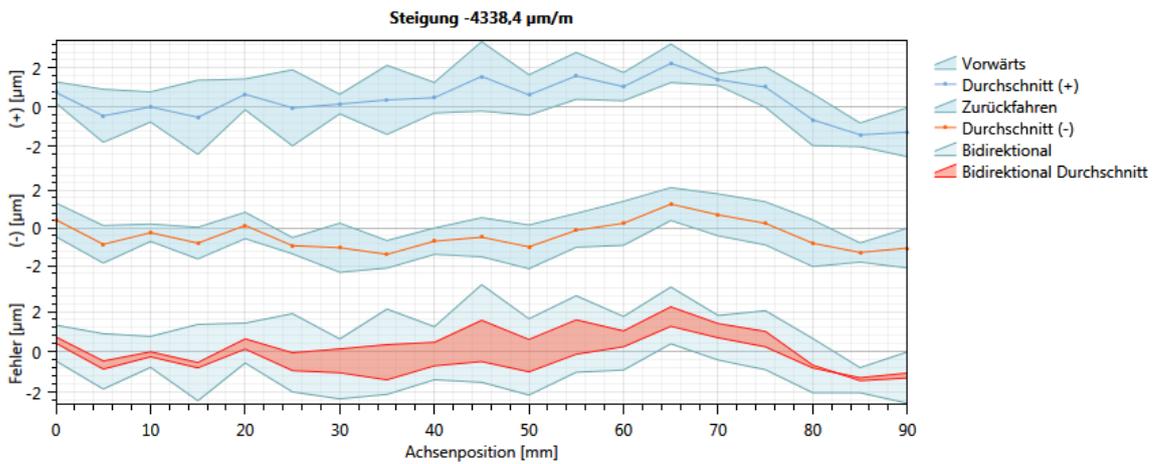
Name	Wert [µm]
U Max.	4,5

Auswertung nach Renishaw 2012 - Gerade durch Endpunkte:



Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	6,6
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	3,9
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	4,8
Mittleres Umkehrspiel	0,8
Geradheitsabweichung	4,3

Auswertung nach Renishaw 2012 – Summe der kleinsten Fehlerquadrate:

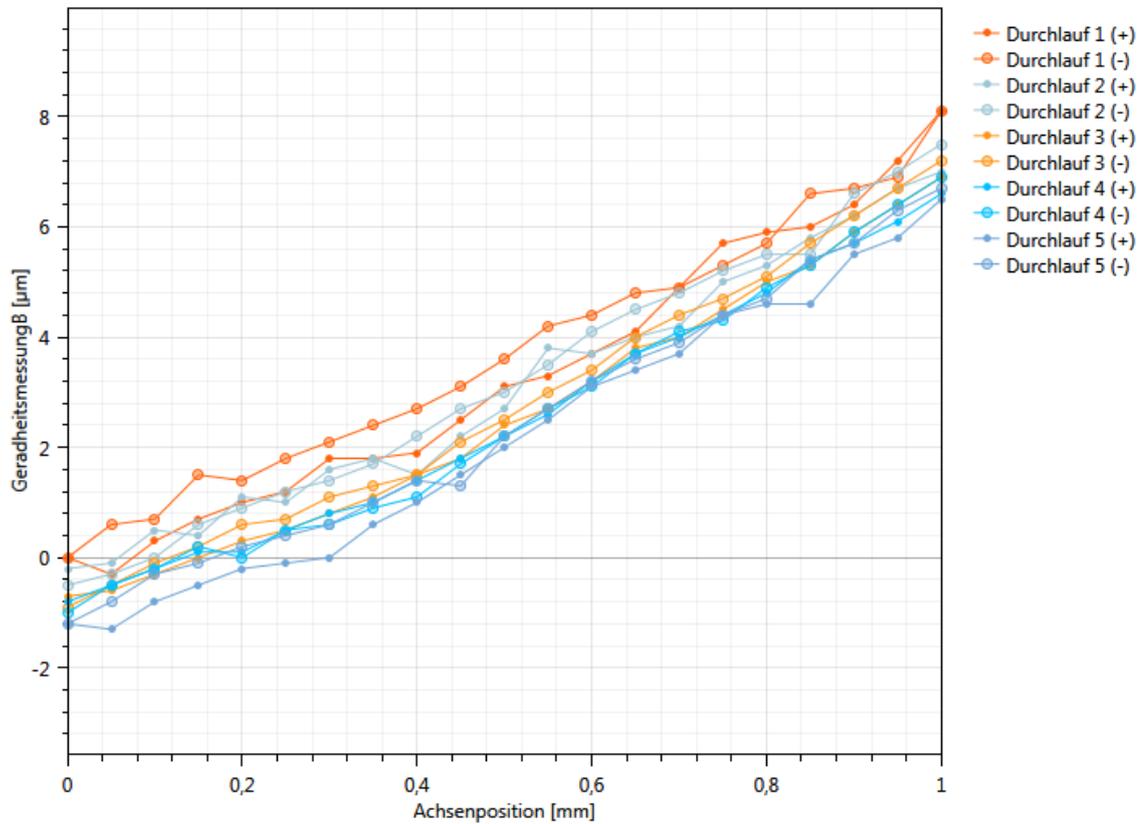


Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	5,9
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	3,9
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	4,8
Mittleres Umkehrspiel	0,8
Geradheitsabweichung	3,7

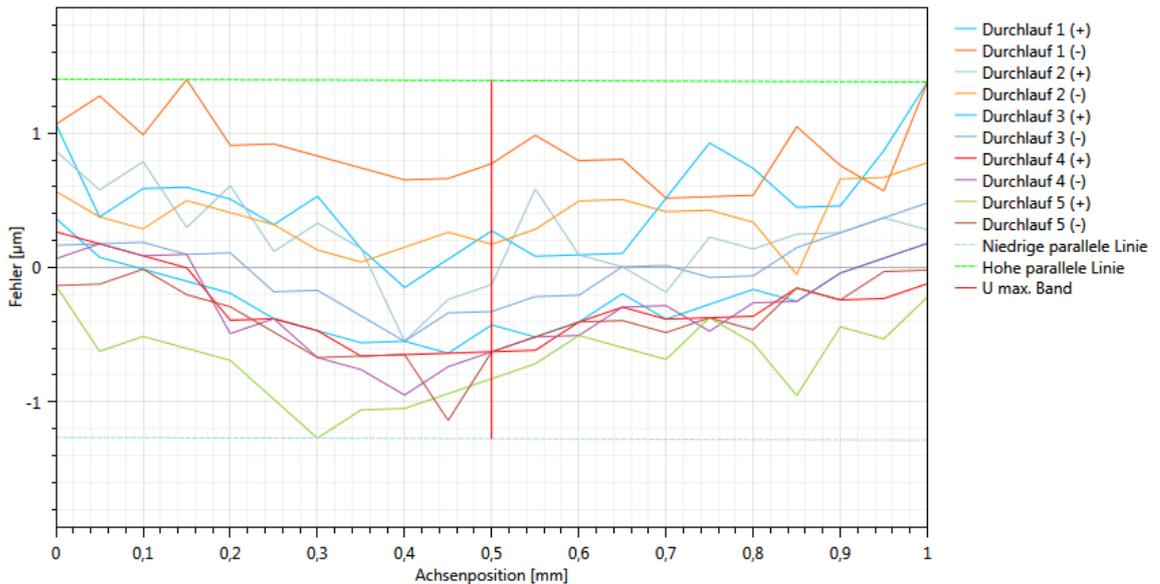
Y-Achse, Y/Z-Ebene, Messlänge 1 mm

File: Y_Achse_Ger_1mm_vert_#2

Rohdaten:

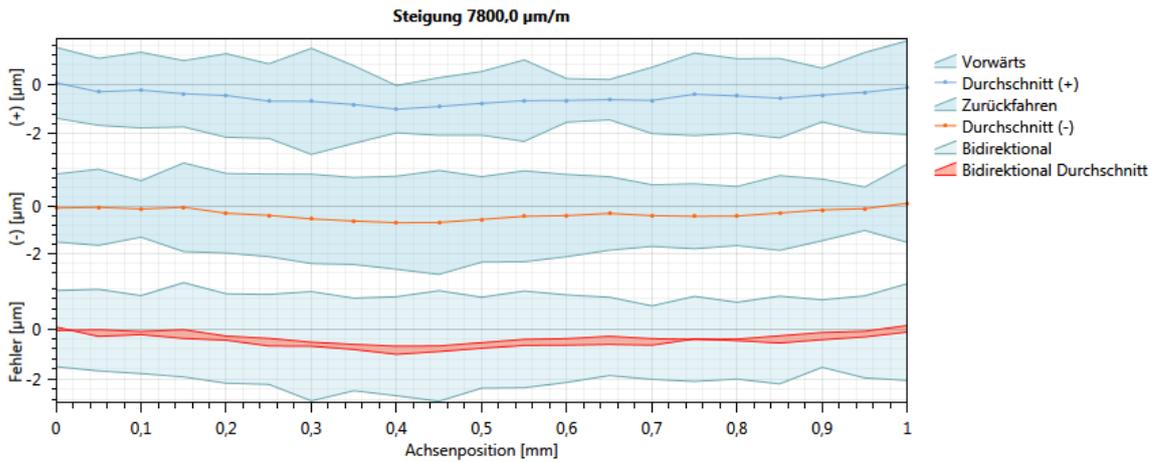


Auswertung nach VDI 2617 (1989):



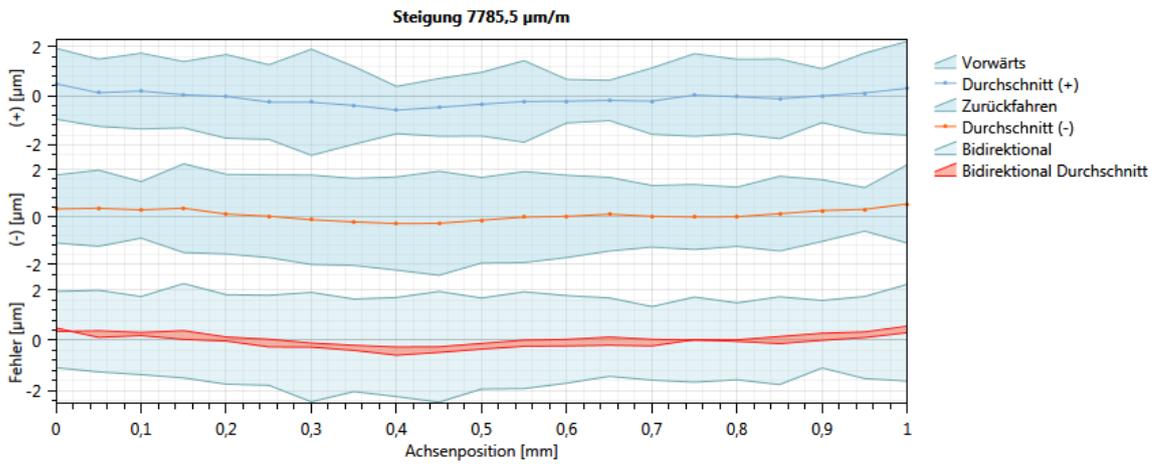
Name	Wert [µm]
U Max.	2,7

Auswertung nach Renishaw 2012 - Gerade durch Endpunkte:



Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	4,7
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	4,4
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	4,4
Mittleres Umkehrspiel	-0,2
Geradheitsabweichung	1,1

Auswertung nach Renishaw 2012 – Summe der kleinsten Fehlerquadrate:

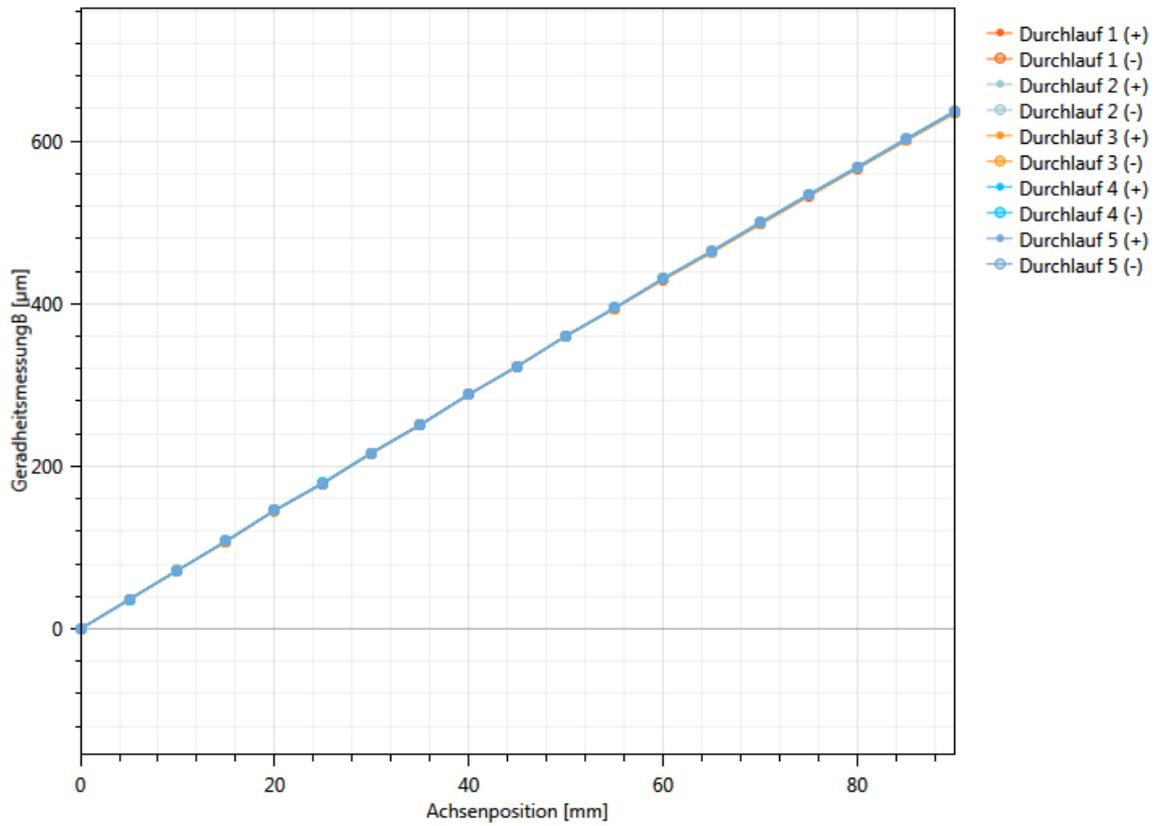


Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	4,7
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	4,4
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	4,4
Mittleres Umkehrspiel	-0,2
Geradheitsabweichung	1,1

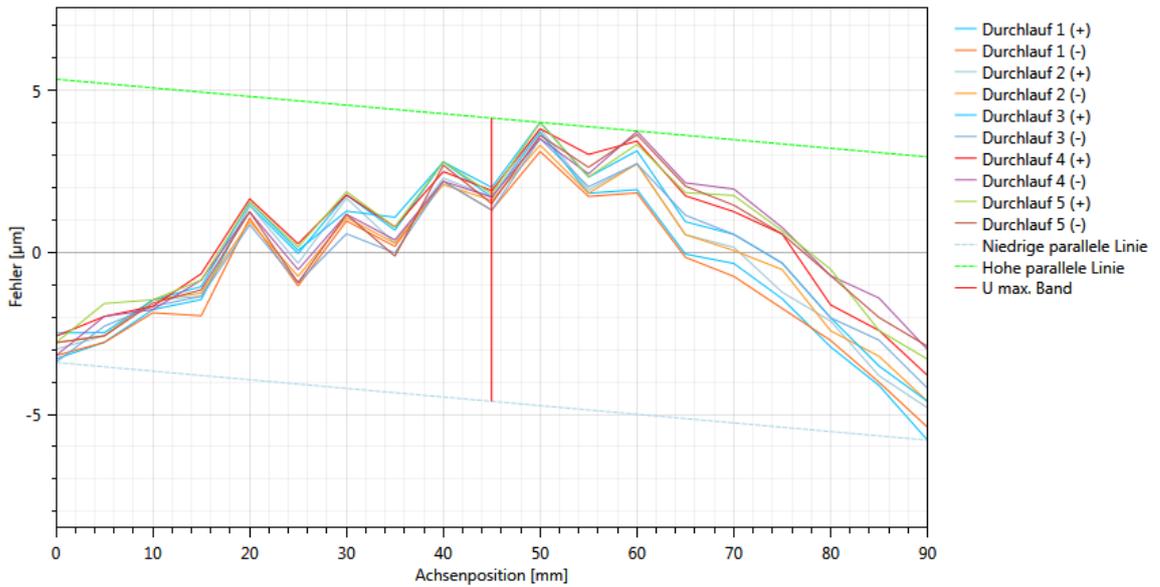
Y-Achse, Y/Z-Ebene, Messlänge 90 mm

File: Y_Achse_Ger_90mm_vert_#2

Rohdaten:

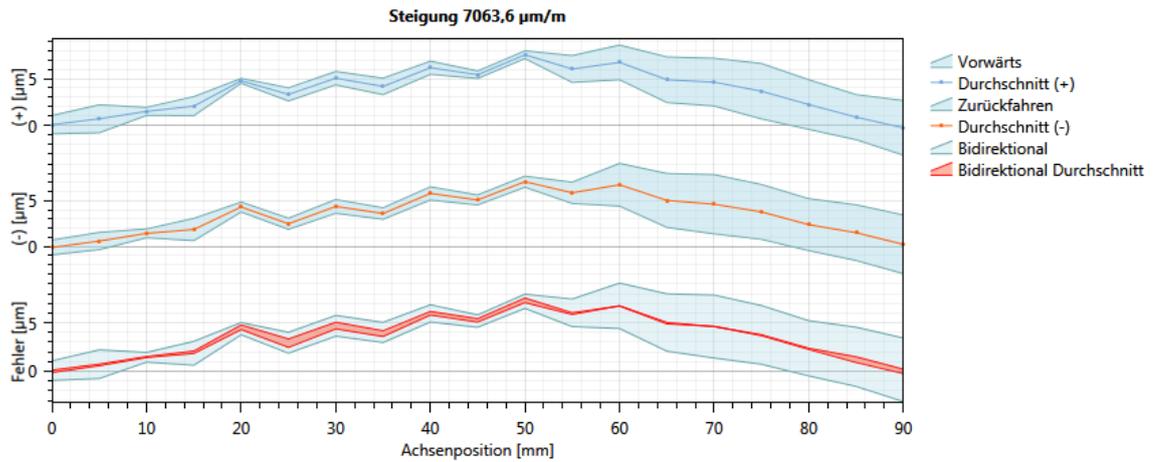


Auswertung nach VDI 2617 (1989):



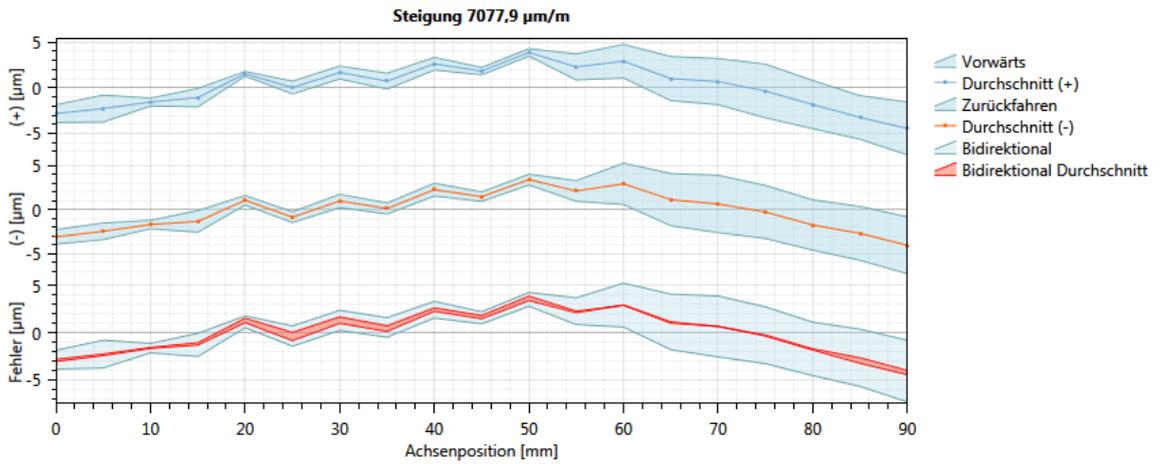
Name	Wert [µm]
U Max.	8,8

Auswertung nach Renishaw 2012 - Gerade durch Endpunkte:



Name	Wert [μm]
Genauigkeit (A)	12,2
Wiederholgenauigkeit in eine Richtung	6,5
Bidirektionale Wiederholgenauigkeit	6,5
Mittleres Umkehrspiel	0,2
Geradheitsabweichung	7,8

Auswertung nach Renishaw 2012 – Summe der kleinsten Fehlerquadrate:



Anhang IX

Versuchsplan ECM Machining

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
01.09.2016	1	W 500 μ m undefiniert	W-Folie 0,05 mm	2,15 M NaOH	-300	5000	400	6	1500	-	500	-1500	-	-	F1
02.09.2016	2	W 500 μ m undefiniert	W-Folie 0,05 mm	2,15 M NaOH	-300	5000	400	6	1500	-	500	-1500	-	-	F1
02.09.2016	3	W 500 μ m undefiniert	W-Folie 0,05 mm	2,15 M NaOH	-300	5000	400	6	1500	-	500	-1500	-	-	F1
05.09.2016	4	W 500 μ m undefiniert	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-300	6000	400	5	1500	-	500	-1500	-	-	F8
12.09.2016	5	W 500 μ m zylindrisch (neu, gezwickt)	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	1500	6000	200	8	500	1100	5000	-5000	-	-	F8
12.09.2016	6	W 500 μ m zylindrisch (neu, gezwickt)	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	2500	6000	200	8	500	1100	5000	-5000	-	-	F11
14.09.2016	7	W 500 μ m zylindrisch (neu, gezwickt)	W-Platte 0,25 mm	2,15 M NaOH	-300	6000	400	5	1000	1800	500	-1500	-	-	F8
16.09.2016	8	W 500 μ m zylindrisch (nach Bohrmuster_2)	W-Platte 0,25 mm	2,15 M NaOH	5000/ 7000	6000	200	(8)	1000	1800	5000	-5000	-	-	-
16.09.2016	9	W500 μ m angespitzt (siehe Nr.8)	W-Platte 0,25 mm	2,15 M NaOH	-300	6000	400	5	1000	1800	500	-1500	-	-	F8

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
20.09.2016	10	W500 μ m angespitzt (siehe Nr.8)	W-Platte 0,25 mm	2,15 M NaOH	-100	8000 (7600)	600	6	2000	1800	5000	-5000	-	-	F8
21.09.2016	11	W500 μ m undefiniert	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	5000	-5000	-	-	F9
21.09.2016	12	W500 μ m abgeflacht (Nr.11)	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	9999	-9999	-	-	F9
27.09.2016	13	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1000	7200	800	2	2000	1800	500	-500	-	-	F6
27.09.2016	14	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1000	7000	600	4	2000	1800	500	-500	-	-	F6
27.09.2016	15	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	6000	600	4	2000	1800	500	-500	-	-	F6
28.09.2016	16	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	4	2000	1800	9999	-9999	1 U/s	0,05	F6
03.10.2016	17	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	4	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,05	F6
03.10.2016	18	W200(?) μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	6000	600	4	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,05	F6
03.10.2016	19	W100(?) μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	5500	600	4	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,05	F6
03.10.2016	20	W70 μ m nicht extra abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-300	6000	400	5	1000	1800	500	-1500	-	-	F8

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
03.10.2016	21	W70 μ m nicht extra abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-300	4000	400	5	1000	1800	500	-1500	-	-	F8
05.10.2016	22	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	4	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,05	F6
					-500	5000	600	4	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,05	F6
07.10.2016	23	W500 μ m gezwickt	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	9999	-9999			F9
07.10.2016	24	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	4	2000	1800	9999	-9999	0,2 U/s	0,05	F6
07.10.2016	25	W300 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	6000	600	4	2000	1800	9999	-9999	0,2 U/s	0,05	F6
10.10.2016	26	W300 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	6000	600	4	2000	1800	9999	-9999	0,2 U/s	0,05	F6
24.10.2016	27	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-100	6000	900	8	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,05	F6
31.10.2016	28	W500 μ m	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-100	6000	900	8	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,015	F6
31.10.2016	29	W500 μ m	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	4	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,05	F6
03.11.2016	30	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,01	F6
					-1000	8000	800	4						0,025	F6
					-500	6000	800	4						0,025	F6

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
03.11.2016	30	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	5500	600	4	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,025	F6
					-500	6000	600	4						0,025	F6
					-500	5500	700	4						0,025	F6
					-500	5500	700	4						0,02	F6
					-500	5500	700	4						0,02	F6
					-500	5500	700	4						0,025	F6
03.11.2016	31	W500 μ m	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	div	div	div	div	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,025	F6
04.11.2016	32	W500 μ m	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	div	div	div	div	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,025	F6
09.11.2016	33	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	div	div	div	div	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,025	F6
09.11.2016	34	Durchmesserred. Ergebnis von Vers. 33	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-300	4000	400	5	2000	1800	500	-1500	-	-	F6
09.11.2016	35	Durchmesserred. Ergebnis von Vers. 33	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-300	4000	400	5	2000	1800	500	-1500	-	-	F6
10.11.2016	36	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	div	div	div	div	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	-	F6
					-500	6000	700	4	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,03	F6
					-500	5500	700	4	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,02	F6

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
10.11.2016	37	Letzer Rest von Versuch 36	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	5500	700	4	2000	1800	9999	-9999	0,5 U/s	0,02	F6
14.11.2016	38	Ergebnis von Versuch 37	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	9999	-9999	-	-	F9
14.11.2016	39	Ergebnis von Versuch 37	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	9999	-9999	-	-	F9
14.11.2016	40	Ergebnis von Versuch 37	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	9999	-9999	-	-	F9
14.11.2016	41	Ergebnis von Versuch 37	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	9999	-9999	-	-	F9
16.11.2016	42	Ergebnis von Versuch 37	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	9999	-9999	-	-	F9
16.11.2016	43	Ergebnis von Versuch 37	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	4000	500	5	2000	1800	500	-1500	-	-	
16.11.2016	44	Ergebnis von Versuch 37	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	9999	-9999	-	-	F10
18.11.2016	45	Ergebnis von Versuch 37	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	9999	-9999	-	-	F10
18.11.2016	46	Ergebnis von Versuch 45	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-100	4000	500	5	2000	1800	500	-1500	-	-	F9
18.11.2016	47	Ergebnis von Versuch 45	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-100	3800	450	4	2000	1800	500	-1500	-	-	F9
21.11.2016	48	Ergebnis von Versuch 45	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	2000	-2000	-	-	F10
21.11.2016	49	Ergebnis von Versuch 48	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-1300	8000	800	2	2000	1800	2000	-2000	-	-	F10

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
21.11.2016	50	Ergebnis von Versuch 49	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	5000	700	4	2000	1800	9999	-9999	-	-	F2
23.11.2016	51	Ergebnis von Versuch 49	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	5000	700	4	2000	1800	9999	-9999	1	-	F2
23.11.2016	52	Ergebnis von Versuch 49	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	5000	700	4	2000	1800	9999	-9999	0,2	-	F2
23.11.2016	53	Ergebnis von Versuch 49	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	5000	700	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	-	F2
25.11.2016	54	Ergebnis von Versuch 49	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	5000	700	4	2000	1800	9999	-9999	-	-	F2
25.11.2016	55	Ergebnis von Versuch 49	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-500	5000	700	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	-	F2
25.11.2016	55	Ergebnis von Versuch 49	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-300	5200	500	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	0,01	F2
					-300	5000	500	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	0,01	F2
28.11.2016	56	Ergebnis von Versuch 49	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-300	5000	500	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	0,01	F2
28.11.2016	57	Ergebnis von Versuch 49	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-300	5000	500	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	0,01	F2
					-300	5200	500	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	0,01	F2
					-300	5200	500	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	0,01	F2
					-300	5000	500	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	0,01	F2
					-300	4800	500	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	0,01	F2
28.11.2016	58	Ergebnis von Versuch 57	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-100	3500	500	4	2000	1800	500	-1500	0,5	0,01	F10
30.11.2016	59	Ergebnis von Versuch 57	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-100	3500	500	4	2000	1800	500	-1500	0,5	0,01	F10

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
02.12.2016	60	Ergebnis von Versuch 57	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-100	3500	500	4	2000	1800	500	-1500	0,5	0,01	F10
05.12.2016	61	Ergebnis von Versuch 60	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-100	4300	500	4	2000	1800	500	-1500	0,5	0,01	F10
05.12.2016	62	Ergebnis von Versuch 60	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-100	4300	500	4	2000	1800	500	-1500	0,5	0,01	F10
19.12.2016	63	Ergebnis von Versuch 60	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-200	2800	800	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	0,015	F9
19.12.2016	64	Ergebnis von Versuch 63	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-200	2500	600	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	0,015	F9
21.12.2016	65	Ergebnis von Versuch 63	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-200	3500	600	4	2000	1800	500	-1500	0,5	0,025	F9
					-200	2600-2800	600-800	4	2000	1800	500	-1500	0,5	0,015	F9
21.12.2016	66	Ergebnis von Versuch 65	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-100	2500	600	4	2000	1800	500	-1500	0,5	0,015	F9
21.12.2016	67	Spannzange 2	W-Platte 1 mm	2,15 M NaOH	-200	3000	600	4	2000	1800	500	-1500	-	0,015	F9
23.01.2017	68	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 3 mm	2,15 M NaOH	-300	6500	600	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,02	F9
					-200	4500	600	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,02	F9
					-200	3500	500	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,015	F9
25.01.2017	69	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 3 mm	2,15 M NaOH	-200	4200	600	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,015	F9
					-200	3500	600	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,02	F9
					-200	3000	600	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,01	F9
					-200	2500	500	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,01	F9
					-200	2200	500	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,01	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
25.01.2017	70	W500 μ m abgeflacht	W-Platte 3 mm	2,15 M NaOH	-200	4500	500	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,015	F9
					-200	3300	500	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,01	F9
					-200	2800	500	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,01	F9
					-200	2600	500	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,01	F9
					-200	2300	500	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,008	F9
					-200	2600	500	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,008	F9
26.01.2017	71	W500 μ m	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-200	2100	500	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,003	F9
					-200	3300	200	4	2000	1800	9999	-9999	-	0,003	F9
					-300	3500	200	4	2000	1800	9999	-9999	0,2	0,005	F9
31.01.2017	72	W500 μ m	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	4000	200	8	2000	1800	9999	-9999	0,3	0,005	F9
31.01.2017	73	W500 μ m	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	3500	150	8	2000	1800	9999	-9999	0,6	0,005	F9
31.01.2017	74	W500 μ m	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	3800	180	8	2000	1800	9999	-9999	0,4	0,0025	F9
31.01.2017	75	W500 μ m	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-200	2800	500	4	2000	1800	9999	-9999	0,5	0,008	F9
01.02.2017	76	W1000 μ m	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-200	5500	600	4	2000	1800	9999	-9999	0,6	0,02	F9
					-100	4500	400	8	2000	1800	9999	-9999	0,6	0,005	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
01.02.2017	77	W500 μ m	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	4500	400	8	1000	1800	9999	-9999	0	0	F9
					-100	3500	230	8	1000	1800	9999	-9999	0	0	F9
02.02.2017	78	Pyra von Vers. 77	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	3400	230	8	1000	1800	9999	-9999	0	0	F9
03.02.2017	79	Abgestumpfte Pyra von Vers. 78	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	3400	230	8	1000	1800	9999	-9999	-	0	F9
06.02.2017	80	Abgestumpfte Pyra von Vers. 79	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	3400	300	4	1000	1800	9999	-9999	-	0	F9
					-100	3100	230	4	1000	1800	9999	-9999	-	0	F9
					-100	3100	230	4	1000	1800	9999	-9999	-	0	F9
06.02.2017	81	Pyramide von Versuch 80	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	2800	200	4	1000	1800	1500	-1500	-	0,005	F1
06.02.2017	82	Pyramide von Versuch 80	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	2900	180	4	1000	1800	1500	-1500	-	0,1	F2
07.02.2017	83	Pyramide von Versuch 80	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	1900	500	8	1000	1800	1500	-1500	-	0,005	F9
07.02.2017	84	Pyramide von Versuch 83	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	2900	180	8	1000	1800	1500	-1500	-	0,1	F2
					-100	3200	150	8	1000	1800	1500	-1500	-	0,1	F2
					-100	4300	100	8	1000	1800	1500	-1500	-	0,1	F2
					-100	1900	500	8	1000	1800	1500	-1500	-	0,1	F2

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
08.02.2017	85	Pyramide von Versuch 83	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	2900	180	8	1000	1800	1500	-1500	-	0,1	F2
08.02.2017	85	Pyramide von Versuch 83	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	3200	150	8	1000	1800	1500	-1500	-	0,1	F2
					-100	4600	100	8	1000	1800	1500	-1500	-	0,03	F2
					-100	2000	500	8	1000	1800	1500	-1500	-	0,1	F2
09.02.2017	86	Pyramide von Versuch 83	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	3800	100	8	800	1800	500	-200	-	0,002	F9
					-100	4500	100	8	1000	1800	500	-500	-	0,0015	F9
					-100	4000	100	8	800	1800	500	-500	-	0,002	F9
					-100	4600	100	8	1000	1800	500	-500	-	0,0015	F9
13.02.2017	87	Pyramide von Versuch 83	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	3 M NaOH	-100	6000	100	8	800	1800	500	-500	-	0,0015	F9
					-100	6000	100	8	800	1800	500	-500	-	0,0015	F9
					-100	6000	100	8	800	1800	500	-500	-	0,0015	F9
					-100	6000	100	8	800	1800	500	-500	-	0,0015	F9
13.02.2017	88	Pyramide von Versuch 83	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	3 M NaOH	-100	4000	100	8	800	1800	500	-500	-	0,0015	F9
					-100	4500	100	8	800	1800	500	-500	-	0,0015	F9
					-100	4300	100	8	800	1800	500	-500	-	0,0015	F9
					-100	4500	100	8	800	1800	500	-500	-	0,0015	F9
14.02.2017	89	Pyramide von Versuch 83	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	3 M NaOH	-100	6500	100	6	800	1800	500	-500	-	0,0015	F2
					-100	6500	100	6	800	1800	500	-500	-	0,0015	F2

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
14.02.2017	90	Pyramide von Versuch 89	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	3 M NaOH	-100	2900	180	8	800	1800	1500	-1500	-	0,0015	F2
					-100	3200	150	8	800	1800	1500	-1500	-	0,0015	F2
					-100	4600	100	8	800	1800	1500	-1500	-	0,0015	F2
					-100	1900	500	8	800	1800	1500	-1500	-	0,0015	F2
14.02.2017	91	Pyramide von Versuch 89	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	3 M NaOH	-100	6500	100	6	800	1800	500	-500	-	0,0015	F1
					-100	6500	100	6	800	1800	500	-500	-	0,0015	F1
					-100	6500	100	6	800	1800	500	-500	-	0,0015	F1
					-100	6500	100	6	800	1800	500	-500	-	0,0015	F1
14.02.2017	92	Pyramide von Versuch 91	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	3 M NaOH	-100	2600	180	8	(124)	1800	1500	-1500	-	0,0015	F2
					-100	3000	150	8	(114)	1800	1500	-1500	-	0,0015	F2
					-100	4000	100	8	(151)	1800	1500	-1500	-	0,0015	F2
					-100	1900	500	8	(114)	1800	1500	-1500	-	0,0015	F2
15.02.2017	93	Pyramide von Versuch 91	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	6000	80	12	1500	1800	500	-500	-	0,0025	F9
					-100	6000	80	12	1500	1800	500	-500	-	0,0015	F9
					-100	6000	80	12	1500	1800	500	-500	-	0,0025	F9
16.02.2017	94	W500 μ m	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	4000	500	8	(148)	1800	1500	-1500	-	0,03	F9
					-100	4000	500	8	(148)	1800	1500	-1500	-	0,03	F9
					-100	4000	500	8	(148)	1800	1500	-1500	-	0,03	F9
					-100	4000	500	8	(148)	1800	1500	-1500	-	0,03	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
16.02.2017	95	Pyramide von Versuch 94	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	6000	100	12	1500	1800	500	-500	-	0,0025	F9
					-100	6000	100	12	1500	1800	500	-500	-	0,0025	F9
					-100	4500	100	12		1800	500	-500	-	0,0025	F9
					-100	4000	100	12	1500	1800	500	-500	-	0,0025	F9
17.02.2017	96	grob abgetragene Pyramide von Versuch 95	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2,15 M NaOH	-100	6000	100	12	1500	1800	500	-500	-	0,002	F9
					-100	6000	100	12	1500	1800	500	-500	-	0,002	F9
					-100	6000	100	12	1500	1800	500	-500	-	0,002	F9
					-100	6000	100	12	1500	1800	500	-500	-	0,002	F9
21.02.2017	97	nachbearbeiten der Pyramide aus Versuch 96	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	90	12	1500	1800	500	-500	-	0,0015	F9
23.02.2017	98	nachbearbeiten der Pyramide aus Versuch 96	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	90	12	1500	1800	500	-500	-	0,0015	F9
24.02.2017	99	W1000 μ m	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	90	12	1500	1800	500	-500	-	0,0015	F9
27.02.2017	100	W1000 μ m	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	200	12	1500	1800	2000	-2000	0,05	0,01	F9
					-100	6000	100	12	1500	1800	2000	-2000	0,05	0,003	F9
27.02.2017	101	Kegel aus Versuch 100	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	3000	100	12	1500	1800	1500	-1500	0,05	0,003	F1
					-100	3500	120	12	1500	1800	1500	-1500	0,05	0,003	F1
					-100	4000	110	12	1000	1800	1500	-1500	0,05	0,003	F1
					-100	3600	100	12	1000	1800	1500	-1500	0,05	0,003	F1

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
28.02.2017	102	Kegel aus Versuch 100	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	100	12	1500	1800	1500	-1500	0,05	0,003	F1
28.02.2017	103	Kegel aus Versuch 102	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	3000	100	12	1500	1800	1500	-1500	0,05	0,01	F7
01.03.2017	104	Kegel aus Versuch 102	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	400	12	1800	1800	9999	-9999	0,5	0,015	F7
					-100	8000	200	12	1500	1800	2000	-2000	0,1	0,01	F7
02.03.2017	105	Kegel aus Versuch 104	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	200	12	1500	1800	3000	-3000	0,05	0,002	F9
03.03.2017	106	Kegel aus Versuch 104	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	140	12	1500	1800	3000	-3000	0,1	0,004	F9
06.03.2017	107	Kegel aus Versuch 104	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	150	12	1500	1800	3000	-3000	0,05	0,002	F9
06.03.2017	108	Kegel aus Versuch 107	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	2600	100	12	1500	1800	80	-80	0	0,02	F9
					-100	2600	100	12	1500	1800	80	-80	0	0,02	F9
					-100	2800	100	12	1500	1800	80	-80	0	0,02	F9
06.03.2017	109	Kegel aus Versuch 108	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	150	12	1500	1800	80	-80	0	0,02	F9
06.03.2017	110	Kegel aus Versuch 109	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	3000	120	12	1000	1800	80	-80	0	0,01	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
06.03.2017	111	Kegel aus Versuch 110	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	5600	100	12	800	1800	3000	-3000	0	0,001	F0
07.03.2017	112	Kegel aus Versuch 111	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	3000	100	12	1000	1800	150	-150	0	0,005	F5
13.03.2017	113	Kegel aus Versuch 112	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	3000	100	12	1000	1800	150	-150	0	0,007	F5
14.03.2017	114	Kegel aus Versuch 113	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-150	3100	100	12	800	1800	120	-120	0	0,008	F5
16.03.2017	115	Kegel aus Versuch 114	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2 M NaOH	-100	6300	150	12	1200	1800	3000	-3000	0	0,005	F5
17.03.2017	116	Kegel aus Versuch 115	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2 M NaOH	-100	3500	110	12	1000	1800	120	-120	0	0,006	F5
20.03.2017	117	W1000 μ m	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2 M NaOH	-100	6000	500	12	100	1800	1500	-1500	0	0,03	F9
					-100	5000	300	12	100	1800	1500	-1500	0	0,01	F9
30.03.2017	118	Keil aus Versuch 117	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	2 M NaOH	-100	6000	230	12	1200	1800	1500	-1500	0	0,001	F9
03.04.2017	119	Keil aus Versuch 118	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	200	12	1200	1800	1500	-1500	0	0,001	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
06.04.2017	120	Keil aus Versuch 119	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	4000 (4555)	150	12	1200	1800	200	-200	0	0,01	F5
					-100	4300 (5000)	100	6	4000	1800	500	-500	-	0,02	F5
10.04.2017	121	Keil aus Versuch 120	W-Platte 3 mm geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000 (6430)	120	6	500	1800	1500	-1500	0	0,0005	F9
11.04.2017	122	Keil aus Versuch 118	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	230	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,0005	F9
11.04.2017	123	Keil aus Versuch 121	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	4300 (4900)	100	6	1200	1800	500	-500	-	0,015	F5
12.04.2017	124	Keil aus Versuch 122	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	4300 (4900)	100	6	1200	1800	500	-500	-	0,015	F5
12.04.2017	125	Keil aus Versuch 122	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	4300 (4900) - 5000 (5649)	100	6	1200	1800	500	-500	-	0,015	F5
14.04.2017	126	Keil aus Versuch 125	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000	200	12	1500	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
					-100	5800 (6774)	180	12	1500	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
14.04.2017	127	Keil aus Versuch 126	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	4800(5482)	100	6	1200	1800	500	-500	-	0,015	F5

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
19.04.2017	128	Keil aus Versuch 127	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	5300 (5750)	180	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
					-100	5000 (5473)	175	12	1200	1800	1500	-1500		0,001	F9
19.04.2017	129	Keil aus Versuch 128	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	4600 (5480)	100	6	1200	1800	300	-300	-	0,015	F5
21.04.2017	130	Keil aus Versuch 129	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	5300 (5750)	180	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
21.04.2017	131	Keil aus Versuch 130	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	4600 (4911)	100	6	1200	1800	300	-300	-	0,015	F5
24.04.2017	132	Keil aus Versuch 131	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	5300 (5750)	220	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
26.04.2017	133	Keil aus Versuch 132	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	5700 (6532)	200	6	1200	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
26.04.2017	134	Keil aus Versuch 133	W-Platte 3 mm winkelig geschliffen 15°	1 M NaOH	-100	6000 (6581)	400	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,03	F9
28.04.2017	135	Keil aus Versuch 133	W-Platte 3 mm winkelig poliert 22,5° (flach)	1 M NaOH	-100	6000 (6230)	500	6	1200	1800	1500	-1500	-	0,02	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
02.05.2017	136	Keil aus Versuch 133	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	6000 (6230)	500	6	2000	1800	1500	-1500	-	0,02	F9
					-100	6000 (6278)	180	6	1200	1800	1500	-1500	-	0,0025	F9
03.05.2017	137	Keil aus Versuch 133	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5500 (5766)	200	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
					-100	5800 (6050)	130	4	800	1800	1500	-1500	-	0,002	F9
05.05.2017	138	Rohling, W Zylinder 1 mm	1.2343 Stahl 5 mm stark	2 M NaOH	-100	5500 (6100)	300	4	1000	1800	1500	-1500	-	0,005	F9
					-100	5700 (5799)	300	4	1000	1800	1500	-1500	-	0,005	F9
08.05.2017	139	Rohling, W Zylinder 1 mm	1.2343 Stahl 5 mm stark	3 M NaOH	-100	4500 (5480)	200	4	2000	1800	2000	-2000	-	0,001	F9
					-100	3500 (4500)	250	6	3000	1800	2500	-2500	-	0,002	F9
					-1000	8000 (7550)	100	4	500	1800	1500	-1500	-	0,002	F9
					-400	6000 (6800)	1000	4	200	1800	1500	-1500	-	0,002	F9
09.05.2017	140	Rohling, W Zylinder 1 mm	1.2343 Stahl 5 mm stark	2 M NaNO ₃	-100	7000 (7800)	1000	2	2000	1800	2000	-2000	-	0,002 / 0,005	F9
10.05.2017	141	Rohling, W Zylinder 1 mm	1.2343 Stahl 5 mm stark	2 M NaNO ₃	200	6000	350	4	1500	1800	1500	-1500	-	0,003	F9
					-200	8000 (7200)	1000	4	2000	1800	1500	-1500	-	0,005	F9
12.05.2017	142	Rohling, W Zylinder 1 mm	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-200	3500 (3900)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
					-100	3500 (3900)	100	4	500	1800	1500	-1500	-	0,005	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
12.05.2017	142	Rohling, W Zylinder 1 mm	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-100	4000 (4450)	100	2	1500	1800	2500	-2500	-	0,01	F9
15.05.2017	143	Rohling, W Zylinder 1 mm	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-100	3500 (4100)	200	4	1500	1800	3000	-3000	-	0,01	F9
15.05.2017	144	Rohling, W Zylinder 1 mm	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-300	3000 (3660)	400	4	3000	1800	3000	-3000	-	0,01	F9
16.05.2017	145	Keil aus Versuch 137	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	4000 (4570)	200	4	1500	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
					-50	3000 (3600)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,002	F9
					-50	3000 (3600)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,002	F9
16.05.2017	146	Keil aus Versuch 137	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	3000 (3600)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,002	F9
17.05.2017	147	Keil aus Versuch 137	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	3000 (3600)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,002	F9
					-50	3000 (3600)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,01	F9
					-50	3000 (3600)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,015	F9
					-50	3000 (3600)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,012	F9
					-50	3000 (3600)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,01	F9
					-50	3000 (3600)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,008	F9
					-50	3000 (3600)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,006	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
17.05.2017	148	Keil aus Versuch 137	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	3000 (3600)	150	2	500	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
					-50	3200 (3850)	120	2	500	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
					-50	3400	100	2	500	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
					-50	3600 (4250)	100	2	500	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
18.05.2017	149	Keil aus Versuch 137	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5300 (5800)	150	4	1200	1800	1500	-1500	-	0,005	F9
					-100	5300 (5775)	180	6	1200	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
					-100	5300 (5775)	180	6	1200	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
					-100	5300 (5775)	180	6	1200	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
					-100	5900 (6025)	150	6	1200	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
23.05.2017	150	Keil aus Versuch 149	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5300 (5750)	200	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
					-50	5500 (5900)	180	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,001	F9
					-100	5000 (5400)	150	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,002	F9
					-100	5000 (5400)	175	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,002	F9
23.05.2017	151	Keil aus Versuch 150	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5000 (5400)	150	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,0015	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
23.05.2017	152	Keil aus Versuch 151	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5000 (5400)	175	12	1500	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
23.05.2017	153	Keil aus Versuch 152	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5000 (5400)	175	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,0015	F9
23.05.2017	154	Keil aus Versuch 153	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4600 (5086)	100	6	1200	1800	300	-300	-	0,015	F9
24.05.2017	155	Keil aus Versuch 154	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5000 (5400)	175	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,0015	F9
24.05.2017	156	Keil aus Versuch 155	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4600 (5086)	100	6	1200	1800	300	-300	-	0,015	F9
29.05.2017	157	Keil aus Versuch 155	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4600 (5086)	100	6	1200	1800	300	-300	-	0,015	F9
30.05.2017	158	Keil aus Versuch 155	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5000 (5400)	175	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,0015	F9
30.05.2017	159	Keil aus Versuch 158	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4600 (5086)	100	6	1200	1800	300	-300	-	0,015	F9
31.05.2017	160	Keil aus Versuch 159	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4600 (4700)	150	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,0012	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
31.05.2017	161	Keil aus Versuch 160	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4400 (4730)	150	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,0012	F9
31.05.2017	162	Keil aus Versuch 161	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	3400 (4000)	100	2	500	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
					-50	3200 (3370)	80	2	500	1800	2000	-2000	-	0,01	F9
02.06.2017	163	Keil aus Versuch 161	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	3700 (3990)	100	2	500	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
06.06.2017	164	Keil aus Versuch 161	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	3000 (3600)	150	2	500	1800	9000	-9000	-	0,004	F9
		Keil aus Versuch 161	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	4000 (4200)	100	2	500	1800	9000	-9000	-	0,005	F9
06.06.2017	165	Keil aus Versuch 161	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	3400 (3630)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
					-50	3400 (3630)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
07.06.2017	166	Keil aus Versuch 161	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4600 (4760)	200	12	1200	1800	1200	-1200	-	0,008	F9
					-100	4600 (4760)	150	12	1200	1800	1200	-1200	-	0,0012	F9
					-100	4600 (4760)	200	12	1200	1800	1200	-1200	-	0,008	F9
08.06.2017	167	Keil aus Versuch 166	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4600 (4760)	200	12	1200	1800	1200	-1200	-	0,008	F9
					-100	4600 (4760)	200	12	1200	1800	1200	-1200	-	0,008	F9
					-100	4600 (4760)	150	12	1200	1800	1200	-1200	-	0,003	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
Maschinengenaugigkeitsuntersuchung															
12.07.2017	168	Rohling, W Zylinder 5 mm	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	6000 (6700)	600	6	1000	1800	6000	-6000	-	0,03	F9
					-100	5000 (5000)	1000	2	1000 /3500	1800	9999	-9999	-	0,01	F9
14.07.2017	169	Rohling, W Zylinder 5 mm	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5000 (5000)	1000	2	1000 /3500	1800	9999	-9999	-	0,01	F9
17.07.2017	170	Keil aus Versuch 168	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	6000 (6024)	200	12	2000	1800	3000	-3000	-	0,003	F9
18.07.2017	171	Keil aus Versuch 168	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	6000 (6000)	200	4	1200	1800	3000	-3000	-	0,0015	F9
					-100	5500 (5500)	200	4	1200	1800	3000	-3000	-	0,0015	F9
					-100	5800 (5800)	200	4	1200	1800	3000	-3000	-	0,0015	F9
19.07.2017	172	Keil aus Versuch 168	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5800 (5800)	200	4	1200	1800	3000	-3000	-	0,0015	F9
20.07.2017	173	Keil aus Versuch 172	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,3 M C6H5Na3O7- 2 H2O	-100	7000 (7000)	400	4	1500	1800	2000	-2000	-	0,005	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
20.07.2017	174	Keil aus Versuch 172	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,3 M C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇ -2 H ₂ O	-100	7000 (7000)	500	2	2000	1800	2000	-2000	-	0,01	F9
20.07.2017	175	Keil aus Versuch 172	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,3 M C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇ -2 H ₂ O	-100	5000 (5000)	1000	2	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
20.07.2017	176	Keil aus Versuch 172	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,3 M C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇ -2 H ₂ O	-100	8000 (8000)	500	2	1500	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
20.07.2017	177	Keil aus Versuch 172	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,3 M C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇ -2 H ₂ O	-100	7000 (7000)	400	4	1500	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
21.07.2017	178	Keil aus Versuch 172 (stark abgeflacht)	1.2343 Stahl 5 mm stark	1 M NaNO ₃ + 0,01M C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇ * 2 H ₂ O	-100	8000 (8000)	1000	2	2500	1800	2000	-2000	-	0,01	F9
22.07.2017	179	Keil aus Versuch 172 (stark abgeflacht)	1.2343 Stahl 5 mm stark	1 M NaNO ₃ + 0,01M C ₆ H ₅ Na ₃ O ₇ * 2 H ₂ O	-500	8000 (8000)	1000	2	2500	1800	2000	-2000	-	0,02	F9
24.07.2017	180	Keil aus Versuch 172 (stark abgeflacht)	1.2343 Stahl 5 mm stark	20% NaCl	-200	6000 (6000)	300	4	2000	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
					-100	3500 (3500)	300	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
26.07.2017	181	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-100	2300 (2300)	100	2	500	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
					-100	2200 (2200)	100	2	500	1800	2000	-2000	-	0,004	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
26.07.2017	181	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-100	2200 (2200)	100	2	500	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
					-100	2200 (2200)	100	2	500	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
					-100	2200 (2200)	100	2	500	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
27.07.2017	182	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,5 M H ₂ SO ₄	-50	2500 (2500)	100	4	500	1800	3000	-3000	-	0,005	F9
27.07.2017	183	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,5 M H ₂ SO ₄	-50	2800 (2800)	100	4	500	1800	3000	-3000	-	0,005	F9
27.07.2017	184	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,5 M H ₂ SO ₄	-50	3200 (3200)	100	4	500	1800	3000	-3000	-	0,005	F9
27.07.2017	185	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,5 M H ₂ SO ₄	-50	2500 (2500)	150	4	500	1800	3000	-3000	-	0,005	F9
28.07.2017	186	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,5 M H ₂ SO ₄	-50	2000 (2000)	100	4	500	1800	3000	-3000	-	0,002	F9
28.07.2017	187	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,5 M H ₂ SO ₄	-20	1700 (1700)	100	2	500	1800	3000	-3000	-	0,002	F9
31.07.2017	188	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	2000 (2000)	100	4	500	1800	3000	-3000	-	0,002	F9
31.07.2017	189	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	2000 (2000)	150	4	500	1800	3000	-3000	-	0,003	F9
31.07.2017	190	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	1700 (1700)	200	4	300	1800	3000	-3000	-	0,003	F9
01.08.2017	191	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	2000 (2000)	100	4	500	1800	3000	-3000	-	0,002	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
01.08.2017	192	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	2000 (2000)	80	4	2000	1800	3000	-3000	-	0,002	F9
01.08.2017	193	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	3000 (3000)	50	4	500	1800	3000	-3000	-	0,002	F9
01.08.2017	194	Keil aus Versuch 166	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	3500 (3500)	100	2	500	1800	4500	-4500	-	0,003	F9
03.08.2017	195	Keil aus Versuch 166, abgeschliffen mit P 2000	1.2343 Stahl 5 mm stark, nach Versuch 194 feucht abgewischt	0,5 M H ₂ SO ₄ , f	-50	2000 (2000)	100	4	500	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
03.08.2017	196	Keil aus Versuch 195	1.2343 Stahl 5 mm stark, nach Versuch 194 feucht abgewischt	0,5 M H ₂ SO ₄ , f	-50	3500 (3500)	100	2	500	1800	3000	-3000	-	0,004	F9
04.08.2017	197	Keil aus Versuch 195	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	6000 (6000)	150	4	1200	1800	3000	-3000	-	0,005	F9
07.08.2017	198	Keil aus Versuch 195	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	6000 (6000)	150	4	1200	1800	3000	-3000	-	0,005	F9
07.08.2017	199	Keil aus Versuch 195	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4700 (4700)	150	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,002	F9
08.08.2017	200	Keil aus Versuch 195	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4700 (4700)	150	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,002	

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
10.08.2017	201	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, frisch poliert	0,2 M H ₂ SO ₄	-100	3000 (3000)	100	2	500	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
10.08.2017	202	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, frisch poliert	0,2 M H ₂ SO ₄	-100	2500 (2500)	100	2	500	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
10.08.2017	203	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, frisch poliert	0,2 M H ₂ SO ₄	-100	2000 (2000)	80	2	500	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
10.08.2017	204	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, frisch poliert	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	2800 (2800)	80	2	300	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
11.08.2017	205	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, frisch poliert	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	3600 (3600)	150	2	500	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
11.08.2017	206	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, frisch poliert	0,2 M H ₂ SO ₄	-50	3000 (3140)	200	2	500	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
16.08.2017	207	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, handgeschliffen (p2000)	1 M HCl	-100	2000 (2150)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
16.08.2017	208	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 207	1 M HCl	-100	3000 (3160)	130	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
16.08.2017	209	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 207	1 M HCl	-100	3200 (3350)	100	4	600	1800	3000	-3000	-	0,003	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
16.08.2017	210	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 207	1 M HCl	-100	2500 (2650)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
16.08.2017	211	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 210	1 M HCl	-100	2000 (2150)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
16.08.2017	212	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 211	1 M HCl	-100	2000 (2150)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
16.08.2017	213	Keil aus Versuch 200, mit Wattestäbchen abgewischt	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 211	1 M HCl	-100	2000 (2150)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
17.08.2017	214	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 210	1 M HCl	200	2000 (2150)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,004	F9
17.08.2017	215	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 211	1 M HCl	-100	2000 (2150)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
					-100	2500 (2690)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,006	F9
					-100	2500 (2690)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,008	F9
					-100	2500 (2690)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,01	F9
					-100	2500 (2690)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,013	F9
					-100	2500 (2690)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,02	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
17.08.2017	216	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 211	1 M HCl	-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
					-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
					-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
					-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
					-50	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
18.08.2017	217	Keil aus Versuch 200	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 211	1 M HCl	-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
					-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
					-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,003	F9
05.09.2017	218	Keil aus Versuch 217	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil), neu	1 M NaOH	-100	5500 (5630)	150	5	1200	1800	3000	-3000	-	0,004	F9
					-100	5500 (5630)	150	5	1200	1800	3000	-3000	-	0,004	F9
06.09.2017	219	Keil aus Versuch 218	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil), neu	1 M NaOH	-100	5500 (5640)	150	6	1200	1800	3000	-3000	-	0,003	F9
					-100	4500 (4653)	150	6	1200	1800	3000	-3000	-	0,003	F9
06.09.2017	220	Keil aus Versuch 218	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1°(steil), neu	1 M NaOH	-100	4400 (4570)	150	6	1200	1800	3000	-3000	-	0,001	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
07.09.2017	221	Keil aus Versuch 218	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil), neu	1 M NaOH	-100	4800 (4980)	150	6	1200	1800	3000	-3000	-	0,0012	F9
					-100	4800 (4980)	150	6	1200	1800	3000	-3000	-	0,002	F9
					-100	4800 (4980)	150	6	1200	1800	3000	-3000	-	0,002	F9
07.09.2017	222	Keil aus Versuch 218	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil), neu	1 M NaOH	-100	4800 (4980)	150	6	1200	1800	3000	-3000	-	0,0015	F9
11.09.2017	223	Keil aus Versuch 222	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
					-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,007	F9
					-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,01	F9
					-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
					-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F9
11.09.2017	224	Keil aus Versuch 222	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F5
12.09.2017	225	Keil aus Versuch 222	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F5

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
12.09.2017	226	Keil aus Versuch 222	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,01	F5
12.09.2017	227	Keil aus Versuch 222	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F5
13.09.2017	228	Keil aus Versuch 222	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F5
14.09.2017	229	Keil aus Versuch 222	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2000 (2200)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,005	F5
					-100	2300 (2523)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,01	F5
18.09.2017	230	Keil aus Versuch 222	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2000 (2220)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,008	F5
18.09.2017	231	Keil aus Versuch 222	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2000 (2220)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,008	F5
19.09.2017	232	Keil W 5 mm (aus Versuch 180)	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5000 (5189)	200	2	1200	1800	3000	-3000	-	0,003	F9
					-100	5000 (5189)	200	2	1200	1800	3000	-3000	-	0,003	F9
					-100	4800 (4980)	180	2	1200	1800	3000	-3000	-	0,001	F9
20.09.2017	233	Keil W 5 mm (aus Versuch 180)	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5000 (5200)	200	2	1200	1800	3000	-3000	-	0,0025	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
21.09.2017	234	Keil W 5 mm (aus Versuch 180)	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	5000 (5200)	200	2	1200	1800	3000	-3000	-	0,0025	F9
22.09.2017	235	Keil W 5 mm (aus Versuch 180)	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4000 (4200)	250	2	1500	1800	3000	-3000	-	0,0025	F9
26.09.2017	236	Keil W 5 mm (aus Versuch 235)	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2100 (2400)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,01	F9
					-100	2100 (2400)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,013	F5
					-100	2100 (2400)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,02	F5
26.09.2017	237	Keil W 5 mm (aus Versuch 235)	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2500 (2800)	150	4	1000	1800	2000	-2000	-	0,004	F5
27.09.2017	238	D 1 mm, neu	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4500 (4700)	350	4	1000	1800	3000	-3000	-	0,01	F9
28.09.2017	239	Keil aus Versuch 238	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4300 (4500)	280	4	1000	1800	3000	-3000	-	0,005	F9
29.09.2017	240	Keil aus Versuch 238	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4200 (4400)	130	2	1000	1800	3000	-3000	-	0,0015	F9

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
02.10.2017	241	Keil aus Versuch 238	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4200 (4400)	130	2	1000	1800	3000	-3000	-	0,0015	F9
					-100	4400 (4700)	120	12	1200	1800	1500	-1500	-	0,0012	F9
03.10.2017	242	Keil aus Versuch 238	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	3500 (3780)	250	4	1000	1800	3000	-3000	-	0,01	F9
04.10.2017	243	Keil aus Versuch 238	W-Platte 3 mm winkelig poliert 14,1° (steil)	1 M NaOH	-100	4400	150	6	1000	1800	3000	-3000	-	0,0015	F9
05.10.2017	244	Keil aus Versuch 243	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2500	150	4	1000	1800	3000	-3000	-	0,0015	F5
09.10.2017	245	Keil aus Versuch 243	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-50	3000 (3560)	200	2	1200	1800	4000	-4000	-	0,01	F5
10.10.2017	246	Keil aus Versuch 243	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2700 (3200)	150	4	1000	1800	3500	-3500	-	0,005	F5
16.10.2017	247	Keil aus Versuch 243	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	1 M HCl	-100	2700 (3100)	150	4	2600	1800	3000	-3000	-	0,005	F5
18.10.2017	248	Keil aus Versuch 243, gereinigt	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	0,5 M HCl	-100	2500 (3000)	150	4	2000	1800	3000	-3000	-	0,01	F5
24.10.2017	249	Keil aus Versuch 243, gereinigt	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	0,5 M HCl	-100	2500 (2944)	150	4	2000	1800	3000	-3000	-	0,005	F5

Datum	Nr.	Werkzeug	Werkstück	Elektrolyt	T	A	P	ppr	konstanter Strom I [μ A]	konstante Spannung G [mV]	OS	US	Spindeldrehzahl	Schrittweite VOR	Vorschub Bohren
25.10.2017	250	Keil aus Versuch 243, gereinigt	1.2343 Stahl 5 mm stark	0,5 M HCl	-100	2400 (2840)	150	4	300 - 500	1800	2500	-2500	-	0,01	F5
31.10.2017	251	Keil aus Versuch 243, gereinigt	1.2343 Stahl 5 mm stark, aus Versuch 217	2 M HCl	-100	2500 (2900)	160	4	1000	1800	2500	-2500	-	0,005	F5
					-100	2300 (2700)	180	4	1000	1800	3200	-3200	-	0,005	F5
15.11.2017	252	Aufgeklebtes Plättchen (Laserbearbeitet), unbenutzt	Plättchen aus 1.2343, geläppt, poliert, neu	1 M HCl	-100	2000 (2400)	150	4	1000	1800	3500	-3500	-	0,003	F5
					-100	2000 (2400)	150	4	1000	1800	3500	-3500	-	0,001	F5
17.11.2017	253	Aufgeklebtes Plättchen (Laserbearbeitet), aus Versuch 252	Plättchen aus 1.2343 (Versuch 252)	1 M HCl	-100	2200 (2400)	200	4	1500	1800	3000	-3000	-	0,003	F5
27.11.2017	254	Stempel_klein aus 1.2343	Plättchen aus 1.2343 (Versuch 252)	1 M HCl	-100	2000 (2400)	500	2	2000	1800	4000	-4000	-	0,002	F5