



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Hassan El Marouk

Zerspanende Herstellung von Bipolarplatten-Prototypen für mobile PEM-Brennstoffzellen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Hassan El Marouk

**Zerspanende Herstellung von
Bipolarplatten-Prototypen für mobile
PEM-Brennstoffzellen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau und Produktion
in der Studienrichtung Produktionstechnik und -management
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Christian Müller

Zweitprüfer: Thomas Hänert

Abgabedatum: 28.02.2023

Zerspanende Herstellung von Bipolarplatten-Prototypen für mobile PEM-Brennstoffzellen

Von Hassan El Marouk

Stichwörter

Bipolarplatte, Flowfields, Fräsen, Werkzeugverschleiß, NC-Programmierung

Kurzreferat

Aufgrund der globalen Klimaveränderungen gewinnt die Nutzung von Brennstoffzellen als Energiequelle für Elektromotoren immer mehr an Bedeutung. Brennstoffzellen sind eine umweltfreundliche und effiziente Alternative zu Verbrennungsmotoren, da sie keine schädlichen Emissionen produzieren. Die Kernkomponenten der Brennstoffzellen sind Bipolarplatten, die aus Materialien wie Graphit, Titanlegierungen oder Edelstahl hergestellt werden können. Die Fertigung dieser Bipolarplatten ist jedoch aufgrund ihrer nutzförmigen Strukturen, die die elektrochemische Reaktion ermöglichen, eine Herausforderung. Um die Effizienz der spanenden Bearbeitung dieser Funktionsgeometrien zu verbessern, werden Bauteile hergestellt, um die kritischen Bearbeitungsschritte zu ermitteln. Dies ermöglicht es, Potenziale und Grenzen der spanenden Bearbeitung zu identifizieren und zu optimieren, um eine wirtschaftliche Herstellung der Bipolarplatten zu erreichen. Die Optimierung der Fertigungstechnologie für Bipolarplatten ist nicht nur eine Herausforderung, sondern auch eine wichtige Maßnahme im Kampf gegen den Klimawandel. Durch die steigende Nachfrage nach Brennstoffzellen und Elektromotoren wird die Herstellung von Bipolarplatten mit spanenden Verfahren immer wichtiger. Eine verbesserte Fertigungstechnologie trägt nicht nur zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen bei, sondern unterstützt auch die Entwicklung von nachhaltigen Energiequellen und trägt somit zur Bekämpfung des Klimawandels bei.

Diese Arbeit befasst sich mit der Durchführung und an Bipolarplatten taugliche und nicht ganz so einfach zu zerspanende Materialien für PEM-Brennstoffzellen. Dabei liegt das Augenmerk auf schnelles und effizientes Herstellen der Flowfields mittels Fräsen, um eine mögliche wirtschaftlich reife Massenproduktion dieser Bipolarplatten zu realisieren. So kann als Ergebnis geliefert werden, dass durch Optimierungen an den Zerspanprozess, das Zerspanen durchaus mit der konventionellen Methode mithalten kann.

Machining Manufacturing of Bipolar Plate Prototypes for Mobile PEM Fuel Cells

By Hassan El Marouk

Key Words

Bipolar Plate, Flowfields, Milling, Tool Wear, NC programming

Abstract

Due to global climate change, the use of fuel cells as a power source for electric motors is becoming increasingly important. Fuel cells are an environmentally friendly and efficient alternative to combustion engines as they do not produce harmful emissions. The core components of fuel cells are bipolar plates, which can be made from materials such as graphite, titanium alloys, or stainless steel. However, manufacturing these bipolar plates is a challenge due to their groove-like structures that enable electrochemical reactions. To improve the efficiency of machining these functional geometries, parts are manufactured to identify critical machining steps. This enables the identification and optimization of potentials and limits of machining to achieve cost-effective manufacturing of bipolar plates. Optimizing the manufacturing technology for bipolar plates is not only a challenge, but also an important measure in the fight against climate change. With the increasing demand for fuel cells and electric motors, the production of bipolar plates using machining processes is becoming more important. Improved manufacturing technology not only contributes to reducing greenhouse gas emissions but also supports the development of sustainable energy sources and thus contributes to combating climate change. This work focuses on the implementation of suitable materials for PEM fuel cell bipolar plates that are not easy to machine. The goal is to quickly and efficiently produce flow fields using milling to realize a possible economically mature mass production of these bipolar plates. As a result of process optimization, it can be delivered that machining can keep up with the conventional method.

Vorwort

Die Herstellung von Bipolarplatten-Prototypen für mobile PEM-Brennstoffzellen mittels zerspanender Fertigung ist von hoher Bedeutung für die Energietechnik und ein wichtiger Schritt in Richtung einer nachhaltigen Energieversorgung. Die Genauigkeit, mit der komplexe Bauteile aus verschiedenen Werkstoffen hergestellt werden können, macht die zerspanende Fertigung zu einem idealen Verfahren für die Brennstoffzellentechnik, in der Bipolarplatten eine zentrale Rolle in der Stromerzeugung spielen. Die Herstellung von Bipolarplatten-Prototypen erfordert umfangreiches technisches Know-how und eine optimale Abstimmung der Prozessparameter, um den hohen Anforderungen an Geometrie und Oberflächengüte gerecht zu werden. Für diese Arbeit wurden Werkzeug, Werkstück und Parameter für die spanende Bearbeitung der Bipolarplatten an dem Bearbeitungszentrum von einem Vertreter eines deutschen Werkzeugherstellers, dessen Name nicht weiter in dieser Arbeit aufgeführt wird, bereitgestellt. Einen großen Dank geht an den Vertreter der Firma für die Materialien und der Hilfe bei offenen Fragen und Problemen. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Christian Müller, wissenschaftlicher Leiter der Zentralen Laborwerkstatt und stellvertretender Studiengangskoordinator Produktionstechnik und -management im Department Maschinenbau und Produktion an der HAW Hamburg, für seine wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit und seinem stetigen Interesse sowie die gewinnbringenden Ratschläge. Herrn Thomas Hänert danke ich für Annahme als Zweitprüfer und der wertvollen Tipps während der Zeit des Hackerangriffes auf die Infrastruktur der Hochschule. Herrn Mario Matschull möchte ich für die Einarbeitung an dem CNC-Bearbeitungszentrum, der fachlichen und strukturellen Betreuung danken. Zudem soll ein großer Dank an die Mitarbeiter des Instituts für Produktionstechnik des Departments Maschinenbau und Produktion für die hilfreiche und vertraute Zusammenarbeit gerichtet sein. Ich möchte gerne meine aufrichtige Dankbarkeit an Prof. Dr. Fiedler ausdrücken. In schwierigen Zeiten hat Prof. Dr. Fiedler mich auf eine Weise unterstützt, die ich nie vergessen werde. Seine Worte und seine Haltung haben mir die notwendige Motivation gegeben, um weiterzumachen und mein Bestes zu geben. Sein Engagement und seine Unterstützung haben mir geholfen, meine Fähigkeiten und Kenntnisse zu verbessern und meine Ziele zu erreichen. Ich möchte gerne meine Dankbarkeit und Anerkennung an meine Familie und Freunde ausdrücken. Ohne ihre unermüdliche Unterstützung und Ermutigung wäre es mir nicht möglich gewesen, diese Arbeit zu schreiben. Auch Sie haben mich durch schwierige Zeiten begleitet, mich motiviert und inspiriert, um mein Bestes zu geben und meine Ziele zu erreichen. Ihre Geduld und ihre Unterstützung haben mich dazu ermutigt, weiterzumachen und hart zu arbeiten, um mein Ziel zu erreichen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Aufbau der Arbeit	1
2 Einführung in das Wissensgebiet	2
2.1 Funktionsaufbau einer PEM-Brennstoffzelle	2
2.2 Anforderungen an das Bipolarplattenmaterial	4
2.2.1 Elektrische Widerstände.....	4
2.2.2 Verarbeitbarkeit	4
2.2.3 Chemische Resistenz.....	5
2.2.4 Thermische Leitfähigkeit	5
2.2.5 Formstabilität.....	5
2.2.6 Gasdichtheit.....	6
2.2.7 Gewicht und Volumen.....	6
2.2.8 Ökonomische und ökologische Anforderungen	6
2.3 Bipolarplatten aus graphitbasiertem Compound	7
2.4 Werkstoffe für Bipolarplatten	8
2.5 Auswahl des Bipolarplattenwerkstoffs	10
2.6 Grundlagen zur Berechnung der Schnittparameter.....	14
2.7 Geometriewahl des Werkstücks	17
3 Praktische Umsetzung	18
3.1 Einrichtungen, Geräte und Aufbau	19
3.2 Versuchsdurchführung.....	20
4 Auswertung mit Interpretation	26
4.1 Schlussfolgerung und Ausblick.....	30
5 Literaturverzeichnis	32
6 Anhang	33
6.1 Berechnung der Schnittparameter	33
6.2 NC-Programmierung	34
6.3 Fräserzustand vor der Nutzung	35
6.4 Fräswerkzeuge nach der Nutzung	36
6.5 Werkstücke nach dem Prozess.....	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle	3
Abbildung 2: Werkstoffe mit akzeptabler Säurebeständigkeit	11
Abbildung 3: Werkstoffe mit exzellenter Säurebeständigkeit.....	12
Abbildung 4: 3D-Konstruktion der Bipolarplatte.....	17
Abbildung 5: Schneidendarstellung des Fräswerkzeug 1	19
Abbildung 6: Draufsicht der Bipolarplatte mit Hauptmaßen	20
Abbildung 7: Programm für die CNC-Steuerung	22
Abbildung 8: Konturdarstellung der Bipolarplatte mit Hauptbemaßungen.....	23
Abbildung 9: Verbesserter Programmcode	24
Abbildung 10: Fräswerkzeug 9 unter dem Mikroskop.....	24
Abbildung 11: Eintauchweg des Fräasers 0.....	26
Abbildung 12: Fräswerkzeug 0 nach der Bearbeitung	26
Abbildung 13: Hauptverfahrbahn des Fräasers 2.....	27
Abbildung 14: Fräsbild erzeugt durch den Fräser 3.....	28
Abbildung 15: Fräser 4 nach dem Zerspanprozess.....	28
Abbildung 16: Flowfield des Fräasers 8.....	29
Abbildung 17: Oberflächenqualität durch Fräser 8.....	30
Abbildung 18: Oberflächenqualität durch Fräser 4.....	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile verschiedener Bipolarplattenmaterialien	9
Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung von 1.4301	13
Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften des 1.4301 bei 20 °C.....	13
Tabelle 4: Physikalische Eigenschaften des 1.4301 bei 20 °C.....	13
Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung von 1.4435	13
Tabelle 6: Mechanische Eigenschaften des 1.4435 bei 20 °C.....	14
Tabelle 7: Physikalische Eigenschaften des 1.4435 bei 20 °C.....	14

Darstellung 1: NC-Programmierung.....	34
Darstellung 2: Fräser mit unsymmetrischem Schneiden	35
Darstellung 3: Seitenansicht des Fräsers.....	35
Darstellung 4: Scherbruch des Fräsers 1	36
Darstellung 5: Scherbruch des Fräsers 2	37
Darstellung 6: Bruch des Fräsers 3	38
Darstellung 7: Werkzeugverschleiß des Fräsers 7	39
Darstellung 8: Schneidkopf des Fräsers 8 nach der Flowfieldherstellung.....	40
Darstellung 9: Nut des Eintauchweges des Fräsers 1	40
Darstellung 10: Nut des Bearbeitungsweges des Fräsers 2.....	41
Darstellung 11: Nutstrukturen des Fräsers 3.....	41
Darstellung 13: Schnittkantenansicht vom Flowfield des Fräsers 8	42
Darstellung 12: Nut erzeugt durch den Fräser 7	42

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung	Einheit
K_{vc}	Korrekturfaktor Schnittgeschwindigkeit	
K_{sch}	Korrekturfaktor Schneidstoff	
K_{ver}	Korrekturfaktor Verschleiß	
K_{γ}	Korrekturfaktor Spanwinkel	
γ_0	Basiswinkel (Stahl 6°)	°
γ_{tat}	Tatsächlicher Spanwinkel des Werkzeugs	°
.prt	Teile-Datei aus einer 3D-CAD-Konstruktion	
σ	Elektrische Leitfähigkeit	S/m
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
α	Eintauchwinkel	°
κ	Einstellwinkel	°
φ_s	Eingriffswinkel	°
ΔU	Spannungsverlust	V

A	Fläche	cm ²
a _e	Schnittbreite	mm
Al	Aluminium	
a _p	Schnitttiefe	mm
b	Spanbreite	mm
BPP	Bipolarplatte	
CAD	Computergestütztes Konstruieren	
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	%
D	Durchmesser	mm
DXF	Drawing Exchange Format, Datenaustauschformat	
e ⁻	Elektron	
f	Vorschub	mm
F _c	Schnittkraft	N
FEM	Finite-Elemente-Methode	
f _z	Zahnvorschub	mm
GDL	Gasdiffusionslage	
h	Spandicke	mm
H	Dicke, Höhe	mm
H ⁺	Proton	
H ₂	Wasserstoff	
H ₂ O	Wasser / Reaktionswasser	
HSS	Schnellarbeitsstahl	
IKZ	Innere Kühlmittelzufuhr	
J	Flächenspezifische Stromdichte	A/m ²
K	Korrekturfaktor	
k _{c1.1}	Spezifische Schnittkraft	N/mm ²

L	Länge des Eintauchweges	Mm
m	Gewicht	Kg
m_c	Werkstoffkonstante	
MEA	Membran-Elektroden-Einheit	
MMS	Minimalmengenschmierung	
n	Drehzahl	1/min oder U/min
N	Stickstoff	
NC	Nummerische Steuerung	
O ₂	Sauerstoff	
P	Leistung	W
p	Druck	Pa oder bar
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran	
Q	Zeitspanvolumen	cm ³ /min
R	Widerstand	Ω
S _a	Sicherheitsabstand	Mm
Si	Silizium	
Ti	Titan	
V _c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
v _f	Vorschubgeschwindigkeit	mm/min
VHM	Vollhartmetall	
Z _w	Anzahl der Zähne	
κ	Einstellwinkel	°
ρ	Spezifischer Widerstand	mΩ · cm ²

1 Einleitung

Treibhausgase haben einen wesentlichen Einfluss auf den Klimawandel. Maßnahmen gegen diese führen zur Umstrukturierung der Energiegewinnung, zu wirkungsvollerer Energiespeicherung und zur Reduzierung des Energieverbrauchs, mit dem Ziel, die CO₂-Emissionen zu senken. Die Polymerelektrolytmembran-, kurz PEM-Brennstoffzelle gilt als Hoffnungsträger für die elektrische Mobilität. Ein wesentlicher Bestandteil der Brennstoffzelle stellen die Bipolarplatten dar, die als Stromabnehmer, Gasverteiler und zur Regulierung der Wärme dienen. Derzeit werden solche Bipolarplatten durch Spritzgießen aus graphitbasierter Compounds hergestellt und weiterverarbeitet. Alternativ finden Titanlegierungen und bestimmte Edelmehle Verwendung. Diese Bipolarplatten verfügen über feine, nutförmige Strukturen, den sogenannten Flowfields. Den hohen Anforderungen an Werkzeug und das zu zerspanende Material geschuldet, haben sich zerspanende Herstellungsverfahren kaum durchgesetzt.

Diese Bachelorarbeit umfasst die Auswahl geeigneter Werkstoffe bei gegebenen Anforderungen an das Material wie Korrosionsbeständigkeit oder Thermischer Leitfähigkeit. Weiterführend wird eine NC-Programmierung für die Flowfields der Bipolarplatten, die mittels Fräsen erzeugt werden, eingerichtet, so dass eine Auswertung nach Verschleiß des Werkzeuges, eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Hinblick auf die Bearbeitungszeit als auch den Werkzeugkosten sowie der Vergleich zur etablierten Herstellmethode der Graphitcompounds vollzogen wird.

1.1 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 widmet sich dem Aufbau und der Funktion von PEM-Brennstoffzellen und dem Vergleich von metallischen und Graphitcompounds basierten Bipolarplatten. Die Anforderungen an das Bipolarplattenmaterial werden ausgelegt, wonach zwei geeignete Materialien gewählt werden, für die die erforderlichen Parameter für den Zerspanungsprozess ermittelt werden. Kapitel 3 befasst sich mit der NC-Programmierung, mit der Vorbereitung und Durchführung der Fräsversuche an Probenmaterial und gewählten Werkstoffen und mit der Qualität der Fräswerkzeuge, die unter einem Mikroskop abläuft. Im Laufe des Kapitels 4 werden die Fräsversuche nach den Zerspankriterien wie Verschleiß, Standzeit und Werkzeugbruch ausgewertet. Die Ergebnisse werden hinsichtlich Werkzeugkosten und

Bearbeitungszeit auf einer wirtschaftlich sinnvollen Herstellung bewertet und eventuelle Verbesserungen gegenüber der etablierten Herstellungsmethode mittels Graphitcompounds abgeschätzt.

2 Einführung in das Wissensgebiet

Brennstoffzellen sind von außen gesehen kaum anders als Batterien. Dennoch sollen diese Energieerzeuger die nachhaltige Zukunft fördern und emissionsfrei arbeiten. Dabei unterscheidet man zwischen Hochtemperatur- und Niedertemperatur-Brennstoffzellen. Wie die Namen hindeuten lassen, handelt es sich zum einen um Brennstoffzellen, die in einem höheren Temperaturbereich arbeiten, meist 600 °C bis 1000 °C, während Niedertemperatur-Brennstoffzellen in Bereichen von 50 °C bis 200 °C Ihre Leistung bieten [Lipinski, 2021]. Hochtemperatur-Brennstoffzellen sind für den stationären Einsatz in Gebäuden geeignet. Da sie Strom und reichlich Wärme erzeugen, kann beispielsweise die Abwärme für Heizzwecke genutzt werden [Frahm, 2023]. Der Wirkungsgrad der Hochtemperatur-Brennstoffzellen liegt bei 60%, während bei der Niedertemperatur-Brennstoffzelle es je nach Arbeitspunkt zwischen 35% und 70% schwankt. Unter diesen Niedertemperatur-Brennstoffzellen findet sich die PEM-Brennstoffzelle wieder. Aufgrund der niedrigen Betriebstemperatur haben Niedertemperatur-Brennstoffzellen eine lange Lebensdauer. Auch der Wartungsaufwand ist gering. Der elektrische Wirkungsgrad ist geringer und PEM-Brennstoffzellen benötigen hochreinen Wasserstoff. Dennoch eignet sich diese Brennstoffzellenart aufgrund der deutlich niedrigeren Arbeitstemperatur besonders für den mobilen Gebrauch, z.B. für Elektroautos.

2.1 Funktionsaufbau einer PEM-Brennstoffzelle

Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen sind energetische Wandlermodule, die unter Zufuhr von den chemischen Elementen Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) elektrische und thermische Energie erzeugen. Inmitten der PEM-Brennstoffzelle werden die Reaktionselemente von der Polymermembran (kurz MEA) voneinander getrennt. Diese Membran ist mit zwei Elektroden beschichtet und lässt nur positiv geladene Teilchen passieren. Beidseitig wird die Polymermembran von einer Gasdiffusionslage (kurz GDL) eingefasst, wodurch die Gase filigran verteilt an die Elektrode ankommen und reguliert einen optimalen Verlauf der Reaktion.

Die Nutstrukturen der elektrisch leitfähigen Bipolarplatte, die Flowfields, übernehmen das gleichmäßige Verteilen der Prozessgase über der Oberfläche der MEA, sorgen für die Abfuhr

der entstandenen Wärme und ermöglichen den elektrischen Kontakt zu einer reaktiven Anliegerzelle. Die nachfolgende Abbildung zeigt das Funktionsprinzip der PEM-Brennstoffzelle.

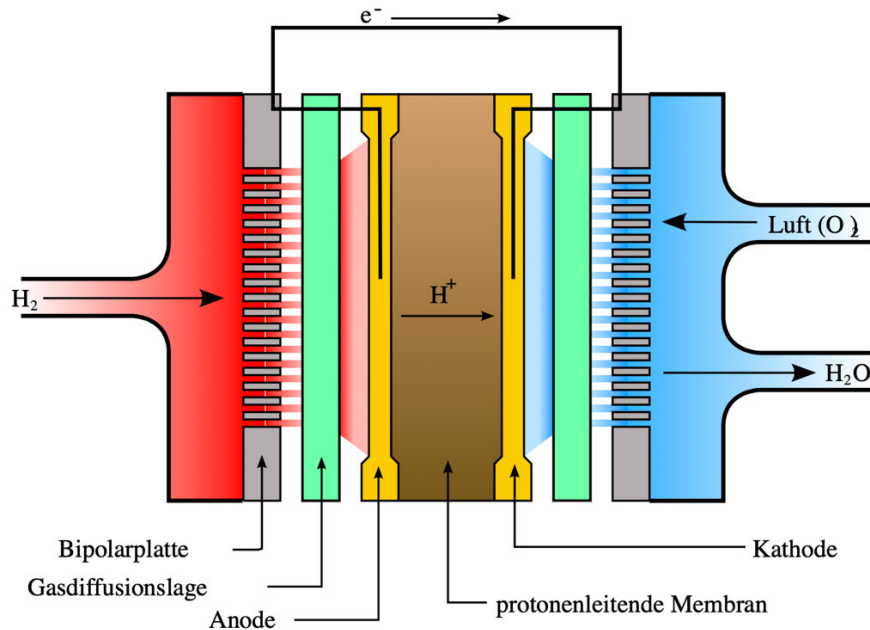
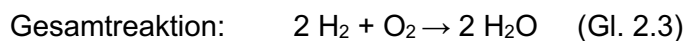
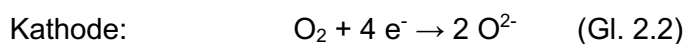
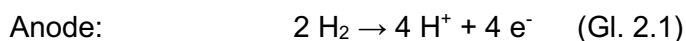


Abbildung 1: Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle
 Quelle: Frahm, 2022, <https://www.heizungsfinder.de>

Der Elektrolyt ist von zwei Elektroden beschichtet. Die Anode führt Brennstoff, die Kathode Luft zu. Die Elektroden sind mit Platin vernetzt, welches dazu führt, dass der Brennstoff auf der Anodenseite seine zwei Elektronen (e^-) verliert und oxidiert zu Protonen (H^+). Diese Protonen wandern durch die halbdurchlässige, meist aus Nafion bestehende Membran, auf die Kathodenseite. Die ausgetretenen Elektronen (e^-) wandern aufgrund der Potentialdifferenz über den äußeren Stromkreis zur Kathode und erzeugt damit elektrische Arbeit. Der Sauerstoff (O_2) wird durch die Elektronen (e^-) reduziert. Durch die Aufnahme der Protonen (H^+) entsteht unter Abgabe von Wärme Wasser (H_2O) [Siqens GmbH, 2021]. Zusammengefasst entstehen an der MEA folgende Reaktionen:



2.2 Anforderungen an das Bipolarplattenmaterial

Bipolarplatten haben die wohl wichtigste Rolle einer Brennstoffzelle. Sie sollen das Reaktionsgas gleichmäßig verteilen und die entstehende Wärme abtransportieren bei gleichzeitiger Vermeidung von Korrosion, Passivierungsschichten und Kühlregelung. Im Folgenden werden die Anforderungen an das Bipolarplattenmaterial aufgeführt, die aus der Dissertation von Herrn Dr.-Ing. Can Kreuz (S. 7-14) zur Verfügung gestellt wurden.

2.2.1 Elektrische Widerstände

Das Material soll einen geringen elektrischen Widerstand haben, damit die auf der Anodenseite freiwerdenden Elektronen leichter aufgrund der Potenzialdifferenz zur Kathodenseite wandern. Für das gleichmäßige Verteilen der Reaktionsgase entlang der Flowfields wird eine gute elektrische Leitfähigkeit an das Material gefordert. Für den benötigten geringen elektrischen Widerstand ist auch die Oberflächenqualität der Bipolarplatte, die angrenzende Gasdiffusionslage und die aufgetragene Presskraft maßgebend [Kreuz, 2008, S.8f]. Die Bipolarplatten von PEM-Brennstoffzellen zielen darauf ab, einen spezifischen Gesamtwiderstand von weniger als $100 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ zu erreichen, um übermäßige Spannungsverluste an der Bipolarplatte unter akzeptablen Betriebsbedingungen zu umgehen. Das folgende Beispiel zeigt bei einer flächenspezifischen Stromdichte von $450 \text{ mA}/\text{cm}^2$ und einem elektrischen Widerstand der Bipolarplatte von $80 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ sich folgender Spannungsverlust ergibt:

$$\Delta U = 80 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2 \cdot 450 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} = 36 \text{ mV} \quad (\text{Gl. 2.4})$$

Die Automobilindustrie benötigt Stromdichten von über $1000 \text{ mA}/\text{cm}^2$, sodass der elektrische Widerstand von bis zu $30 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ angestrebt wird, um einen hohen Spannungsverlust zu vermeiden. Auch die Langzeitstabilität der elektrischen Kontaktierung von Bedeutung, denn Korrosion der Plattenoberfläche oder passivierende Grenzschichten führen mit der Nutzungsdauer zu einer Beeinträchtigung der Brennstoffzellenleistung.

2.2.2 Verarbeitbarkeit

Die wichtigste Anforderung an das Material der Bipolarplatte ist in Bezug auf die mögliche Massenfertigung, eine möglichst einfache und preiswerte Verarbeitbarkeit. Die Geometrie der Bipolarplatte benötigt dünne, von beiden Seiten fein strukturierte Platten herzustellen, die für die Elementübertragung von essenzieller Bedeutung sind. Für Brennstoffzellen mit Leistungen

über 1000 W benötigt die Bipolarplatte eine aktive Fläche von mehreren 100 cm². In Kombination mit der Plattendicke und dem Nut-/Stegverhältnis von 0,5 bis 1 soll ein hoher Reifegrad des Massenproduktionsprozesses gegeben sein.

2.2.3 Chemische Resistenz

Die Zelltemperatur liegt zwischen 50 - 90 °C. Dabei herrscht aufgrund der Membran, die mit sauren Gruppen versehen ist, ein pH-Wert von 1 – 4 [Kreuz, 2008, S. 7f]. Die sehr feuchte Umgebung wird als sehr aggressiv bezeichnet. Obendrein besteht zwischen den Bipolarplatten ein elektrisches Potential, das ebenfalls die Freisetzung von Ionen erhöht. Das Bipolarplattenmaterial muss diesen Bedingungen ohne signifikante Verschlechterung des Materials durch Ionenfreisetzung während der Lebensdauer der Brennstoffzelle standhalten. Im Zellbetrieb könnte zwischen der Bipolarplatte und der Gasdiffusionslage eine passivierende Grenzschicht entstehen, welche Korrosion an der Plattenoberfläche verursacht, die unbedingt zu vermeiden ist.

2.2.4 Thermische Leitfähigkeit

Die Prozesswärme in der Bipolarplatte muss über das Kühlmedium homogen und effektiv abgeführt werden. So benötigt das Bipolarplattenmaterial eine hohe thermische Leitfähigkeit. Die thermischen Übergangswiderstände sind von der Beschaffenheit der Oberfläche und ihrer Struktur abhängig. Passivierende Grenzschichten, die ohnehin zu vermeiden sind, wirken sich auch negativ auf die Kühlleistung aus. Bilden sich während des Stackbetriebs allmählich Grenzschichten, die die Wärmeleitfähigkeit negativ beeinflussen, muss der Kühlregler entsprechend reagieren. Dies kann jedoch dazu führen, dass die definierten Betriebspunkte der Kühlleistung nicht mehr erreicht werden und die Brennstoffzelle ihre maximale Leistung nicht mehr oder nur noch kurzzeitig entfalten kann.

2.2.5 Formstabilität

Die mechanische Anforderung an das Material erfährt eine gleichmäßige, Flächendruckbelastung auf die aktiven Flächen der Zelle und Flächen- oder Liniendruckbelastungen an den Rändern der Bipolarplatte aufgrund der Dichtungskräfte. Die Randkräfte müssen deutlich kleiner ausfallen als die Kräfte im Inneren der Bipolarplatte [Kreuz, 2008, S.10]. Dieses Innere ist die Hauptbelastung der Bipolarplatte, die entlang dem Flowfield arbeitet. Auch die Betriebstemperatur spielt eine wichtige Rolle, denn das Material darf nicht anfangen zu kriechen, wodurch eine Veränderung in Kanalgeometrie bezweckt wird.

2.2.6 Gasdichtheit

Die Reaktionsgase Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) müssen gasdicht voneinander getrennt sein. Im Gasaustritt dürfen auch keine lückenbehafteten Stellen vorhanden sein. Die Herstellungsmethode muss also gegen Haarrisse, Lunker oder dergleichen entgegenwirken. Hier versteht sich unter dem Begriff Gasdichtheit die Diffusionseigenschaften des Materials, sprich die Gasaustritte durch das Material selbst. Die Bewertung der Gasdichtheit nach innen und außen hängt auch von den Dichtungen und dem Bipolarplattensystem ab.

2.2.7 Gewicht und Volumen

Ein wichtiger Optimierungsparameter stellt das Gewicht und das Volumen der Platte da. Dies wird im vollen Umfang durch den verwendeten Werkstoff und seiner Verarbeitung angegeben. Dennoch ist die Dicke der Bipolarplatte, vor allem die Restwandstärke zwischen den Nutstrukturen klein zu halten.

2.2.8 Ökonomische und ökologische Anforderungen

Nach der Einführung und der Entwicklung des Brennstoffzellenmarktes müssen große Mengen an Bipolarplatten als gleiche Bauteile hergestellt werden. Um den Markt einzuführen, ist jedoch eine massive Senkung der Kosten aller Komponenten, insbesondere der MEA, der Dichtung und der Bipolarplatte, unerlässlich. Neben kostengünstigen Verarbeitungsverfahren müssen insbesondere die Rohstoffkosten in €/kg oder €/kW berücksichtigt werden. Obwohl teure und aufwändige Sondermaterialien Vorteile bei den Eigenschaften oder der Verarbeitbarkeit bieten können, können die geforderten Zielkosten von 6 €/kW für Bipolarplatten nicht erreicht werden, wenn ihre Kosten bei Abnahme größerer Mengen nicht erheblich reduziert werden [Kreuz, 2008, S.11]. Weitere wichtige Faktoren sind das Verarbeitungsverfahren sowie die Anzahl und der Umfang der weiteren Prozessschritte zur Herstellung des fertigen Produkts. Eine kurze Prozesskette mit wenigen Verarbeitungsschritten führt zu geringerem Aufwand bei der Qualitätssicherung und ist leichter zu überwachen. Fügeverfahren und mechanische, chemische oder physikalische Oberflächenbehandlungen sind weitere Verarbeitungsschritte nach einem formgebenden Verfahren zur Herstellung der Bipolarplattenstruktur. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist eine ökologische Prozesskette, die möglichst keine oder nur sehr geringe Mengen an Schadstoffen produziert. Eine hohe Umweltverträglichkeit sollte sowohl bei der Herstellung der Rohstoffe als auch bei späteren Verarbeitungsschritten berücksichtigt werden. Partikelemissionen, chemische Sonderabfälle oder Teilprozesse mit sehr hohem

Energiebedarf sind hierbei zu nennen. Auch die Möglichkeit der Weiterverwendung der Bipolarplatten oder des Plattenmaterials sollte bereits in der Entwicklungsphase berücksichtigt werden, wobei dem Recycling der Platten ein höherer Stellenwert zukommen sollte als der thermischen Abfallentsorgung.

2.3 Bipolarplatten aus graphitbasiertem Compound

Die Herstellung von Bipolarplatten aus Graphitcompound mittels Spritzgießtechnik erfordert ein ausgewogenes Füllstoffgemisch und einen höheren Polymeranteil im Graphitcompound [Hartwig, Mäder, 2007, S. 12f]. Spritzgießen ist ein formgebendes Verarbeitungsverfahren, das seit vielen Jahrzehnten zur Massenherstellung von Kunststoffartikeln eingesetzt wird. Dabei wird das thermoplastische Ausgangsmaterial in Form von kleinen Kügelchen der Maschine zugeführt, im Spritzaggregat aufgeschmolzen und die notwendige Materialmenge aufdosiert [Kreuz, 2008, S. 17]. Die Vorkonditionierung des Ausgangsmaterials unter hohem Druck ermöglicht das Einspritzen in der Kavität, wo die Masse im temperierten Werkzeug zum fertigen Werkstück auskühlt. Die Verarbeitung von Graphitcompounds erfordert aufgrund des hohen Graphitanteils eine Anpassung des gesamten Prozesses. Der Spritzgießprozess mit Graphitcompounds unterscheidet sich in vielen Punkten gänzlich von einem reinen Kunststoff. Die hohen Materialviskositäten erfordern deutlich höhere Massedrucke sowie Einspritzleistungen, wobei die erreichbaren Fließwege begrenzt sind, insbesondere bei dem hohen Fließweg und Wandstärkenverhältnis von Bipolarplatten. Zur spritzgießtechnischen Verarbeitung können sowohl duroplastisch als auch thermoplastisch gebundene Compounds herangezogen werden. Die Verarbeitungsprozesse von duroplastisch und thermoplastisch gebundenen Compounds sind wie bei den reinen Kunststoffen. Thermoplastisch gebundene Graphitcompounds weisen jedoch klare Vorteile bei der spritzgießtechnischen Verarbeitung zu Bipolarplatten auf. Sie ermöglichen kurze Zykluszeiten, da das Material eine ausreichend hohe Fließfähigkeit aufweist, um ein vollständiges Füllen des Werkzeughohlraums sicherzustellen, ohne dabei auf eine Wechseltemperierung des Werkzeugs zurückzugreifen [Kreuz, 2008, S. 18f]. Da thermoplastische Kunststoffe eine gewisse Bindenahtfähigkeit besitzen, können auch thermoplastisch gebundene Compounds die Gasführungslöcher einer Bipolarplatte im Spritzgießverfahren darstellen. Die Herstellung von Bipolarplatten aus Graphitcompound mittels Spritzgießtechnik erfordert eine präzise Anpassung des Verarbeitungsprozesses an die Eigenschaften des Materials. Die Nutzung von thermoplastischen Graphit-Compounds ermöglicht kurze Zykluszeiten und eine hohe Formteilgüte, was sie zu einer vielversprechenden Wahl für die Massenproduktion von

Bipolarplatten macht. Die Aushärtezeit liegt zwischen 30 – 60 Sekunden bei einer Werkzeugtemperatur von ca. 165° bei einem Verdichtungsdruck von 460 Bar.

2.4 Werkstoffe für Bipolarplatten

Aufgrund der schwierigen Anforderungen bezüglich chemischer Beständigkeit und gleichzeitiger hoher elektrischer Leitfähigkeit ist die Auswahl an möglichen Materialien für Bipolarplatten begrenzt. Schon früh wurde Graphit aufgrund seiner hervorragenden chemischen Resistenz und chemischen Inertheit als geeignetes Material für Bipolarplatten erkannt. Die anspruchsvolle Verarbeitung, die Porosität und die hohe Sprödigkeit von Graphit-Bauteilen geben einen entscheidenden Nachteil für die Verwendung als Bipolarplattenmaterial. In den Anfangsjahren der Brennstoffzellen-Entwicklung wurden hauptsächlich gepresste, gasdichte Graphitplatten verwendet, die nur durch Spanabhebung bearbeitet werden können. Graphit bietet sich weiterhin als optimales Bipolarplattenmaterial an, da es eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit von etwa 680 S/cm und eine ebenso gute thermische Leitfähigkeit von ca. 168 W/m·K aufweist [Kreuz, 2008, S.12]. Allerdings ist die Verarbeitung von reinem Graphit sehr aufwändig und führt somit zu hohen Herstellungskosten für Graphit-Bipolarplatten. Die sehr gute Leistung von Graphit-Bipolarplatten dient jedoch als Referenz für die Beurteilung der Qualität von alternativen Materialien. In den letzten Jahren wurden verschiedene Materialien und Verarbeitungsverfahren untersucht. Zwei Hauptgruppen, nämlich die metallischen Bipolarplatten und die graphitbasierten Compoundsplatten, etablierten sich. Bei metallischen Bipolarplatten kann zwischen beschichteten und unbeschichteten Materialien unterschieden werden. Für die Anwendung in Brennstoffzellen erweisen sich austenitische und ferritische Edelstähle ohne Oberflächenbeschichtung als geeignet, um über längere Zeit den Umgebungsbedingungen einer Brennstoffzelle standzuhalten. Zusätzlich werden Untersuchungen mit verschiedenen Beschichtungen auf unterschiedlichen Substraten durchgeführt, wobei metallbasierte Beschichtungen (Edelmetalle, Metall-Karbide und Metall-Nitride) oder kohlenstoffbasierte Beschichtungen (Graphit, Graphit-Compounds und Diamond-like-Carbon) auf Aluminium, Titan, Nickel und Edelstahl aufgetragen wurden, um Korrosionen und Ionenauslösungen zu vermeiden. Compound bezeichnet einen Kunststoff, der durch Zugabe und Vermischung mit weiteren Füllstoffen neue Materialeigenschaften gegenüber dem ursprünglichen Kunststoff aufweist. Für die Anwendung als Bipolarplattenmaterial enthält der graphitbasierte Füllstoff jedoch einen so hohen Anteil, dass der Massenanteil des Kunststoffs erheblich geringer ausfällt. Solche Materialgemische werden als hochgefüllte Compounds bezeichnet. Unter den

graphitbasierten Compounds wird im Wesentlichen zwischen duroplastischen und thermoplastischen Bindern unterschieden. Duroplaste sind Kunststoffe, die nach einmaliger Aushärtung nicht mehr erweicht. Das Ziel der Compounds mit einem hohen Füllstoffanteil an Graphit besteht darin, die typischen Eigenschaften von Graphit zu erhalten. Durch den geringen Kunststoffanteil können jedoch zusätzliche Eigenschaften hinzugefügt werden, die für die Anwendung als Bipolarplatten-Material erforderlich sind. Dazu gehören höhere Biegefestigkeit, geringere Spröbruchneigung und Gasdichtigkeit. Duroplaste und Thermoplaste können als Binder für die Graphitcompounds verwendet werden. Duroplaste sind Kunststoffe, die nach der Aushärtung nicht mehr verformt werden können. Dies macht das Recycling von duroplastisch gebundenen Compounds schwierig, wenn nicht unmöglich. Duroplaste haben jedoch den Vorteil, dass sie Temperaturen von 200 °C ohne Veränderung der Eigenschaften oder Geometrie standhalten können. Thermoplaste sind Kunststoffe, die beliebig oft, bis zum Zersetzen der Polymerkette, aufgeschmolzen und in eine neue Form gebracht werden können. Ihr Nachteil liegt in der geringeren Warmformbeständigkeit im Vergleich zu Duroplasten oder den hohen Materialkosten und der anspruchsvollen Verarbeitung von Hochtemperatur-Thermoplasten. Je nach Binderanteil können Compounds aus Graphit und anderen Zusatzstoffen wie Leitrußen, Kohle- oder Glasfasern und speziellen Additiven zur besseren Verarbeitung des Compounds bestehen. Die folgende Tabelle zeigt die Befürwortung und die Widersprechung einiger Materialien.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile verschiedener Bipolarplattenmaterialien

Material	Preis	Verarbeitbarkeit	Bulkwiderstand	Kontaktübergangswiderstand	Dichte	Gaspermeabilität	Korrosionsbeständigkeit	Biegefestigkeit	Warmformbeständigkeit
Edelstahl	++	++	++	-	--	--	--	++	++
Titan	--	--	++	-	--	--	+	++	++
Graphit, rein	--	--	++	++	+/-	0	++	--	++
Glas-kohlenstoff	+	--	+	+	+	--	++	--	++
Duroplast-Compound	+	++	+	+	+	0	++	++	++
Thermoplast-Compound	++	++	+	+	++	0	++	+	+/-

Pro und Contra der verschiedenen Materialien stellen die Faktoren Kosten und Verarbeitbarkeit die beiden wichtigsten Kriterien dar. Aus diesem Grund konzentrieren sich die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Bipolarplatten-Materialien und Verarbeitungsprozesse

fast ausschließlich auf dünnwandige Edelstahlfolien (mit geeigneter Beschichtung) sowie auf duroplastische oder thermoplastische Compounds [Kreuz, 2008, S14]. Diese Materialien haben das höchste Potenzial für eine kosteneffiziente Massenfertigung von Bipolarplatten.

2.5 Auswahl des Bipolarplattenwerkstoffs

Das übliche Material für metallische Bipolarplatten ist Titan. Jedoch birgt Titan einige Nachteile mit sich. Durch den Anstieg des Kontaktwiderstands und Versprödung durch die Wasserstoffaufnahme erscheint eine negative Veränderung. Die Zunahme des Kontaktwiderstandes von Bipolarplatten aus Titan erfolgt über das Wachstum von Passivierungsschichten an der Metalloberfläche. Durch das Auftragen von einer 1 μ m dicken Goldschicht auf die Titan-Bipolarplatten kann der Zellwiderstand von 0,4W auf 0,18W verringert werden. Da dieser Aufwand mit zu hohen Kosten verbunden ist, soll nun im Folgenden kostengünstigere Alternativen sowohl beim Materialpreis als auch bei den Verarbeitungsprozessen gefunden werden.

Die Werkstoffauswahl wurde mithilfe der Software „Granta EduPack“ auf Level 3 ermittelt. Dort sind 4181 Materialien vertreten. Da die Flowfields der Bipolarplatten im zerspanenden Prozess hergestellt werden, eignen sich metallische Materialien sehr gut hierfür. Wichtig für das Bipolarplattenmaterial ist die Korrosionsbeständigkeit. Dort helfen die Materialien Chrom und Molybdän. Theoretisch kann ein Anteil von min. 10% Chrom die Korrosionsbeständigkeit fordern [Langemann, 2016, S. 21]. In der Praxis sind es mindestens 12%, da dort die Passivierungsschicht von Chrom aktiviert wird. Durch die Auswahl an min. 12% Chromgehalt verbleiben noch 336 Materialien.

Titan hat ein Elastizitätsmodul von 116.000 MPa. Werkstoffe, die sowohl mehr Zähigkeit als auch Härte besitzen, werden gesucht. So wurde als zweiter Filter eine Mindestanforderung des Elastizitätsmoduls von 116.000 MPa gefordert. Dadurch verbleiben noch 326 Materialien.

Die Arbeitstemperaturen bei der Niedertemperatur-Brennstoffzelle liegen zwischen 50 – 90 °C. Die Mindesttemperatur von 50 °C begrenzt die möglichen Werkstoffe nicht weiter. Der flächenspezifische Gesamtwiderstand soll die 100 m Ω ·cm² nicht überschreiten, um große Spannungsverluste zu umgehen. Dadurch verbleiben noch 266 Materialien zur Auswahl.

Die Zellspannung kann bis zu 2,2V hoch werden [Langemann, 2016, S. 12], weswegen ein Bereich des Galvanischen Potenzials von -2,2V bis 2,2V gewählt wurde. Hierdurch verbleiben 263 Materialien.

Die Anforderung an die elektrische Leitfähigkeit soll mindestens 100 S/cm betragen. Dadurch verbleiben noch 23 Materialien.

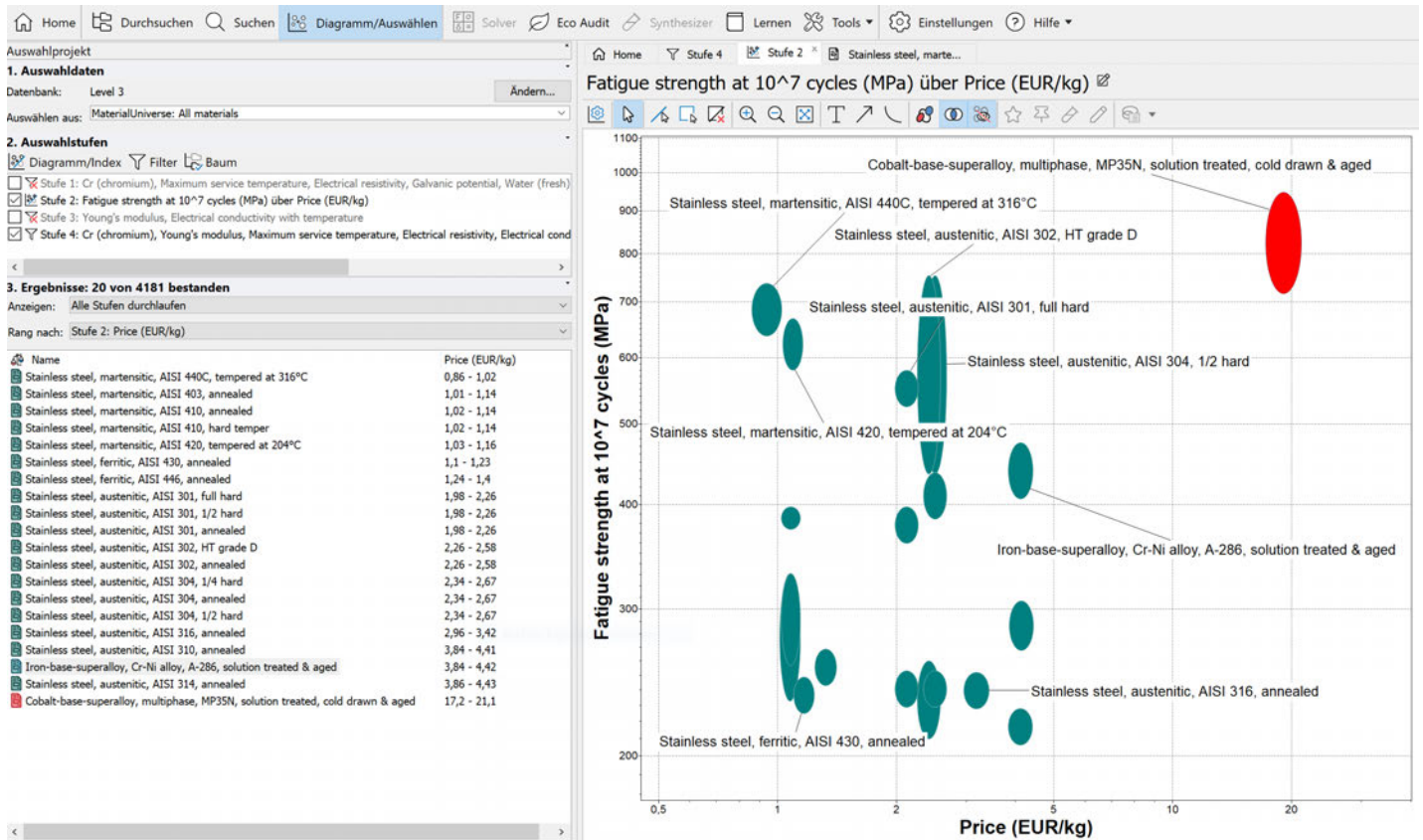


Abbildung 2: Werkstoffe mit akzeptabler Säurebeständigkeit

Die Bipolarplatte soll chemisch resistent bei einem pH-Wert von 1-4 sein. Auch gegen Wasser soll die Beständigkeit hervorragend sein. Aufgrund der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird das folgende Diagramm in der Ansicht Dauerfestigkeit über den Preis dargestellt.

Wird die Einstellung in Granta EduPack genehmigt, die starken Säuren mit einem pH-Wert <4 haben, ins Verfahren einbezogen, um einen besseren Schutz zu gewährleisten, so ergeben sich noch 20 Materialien.

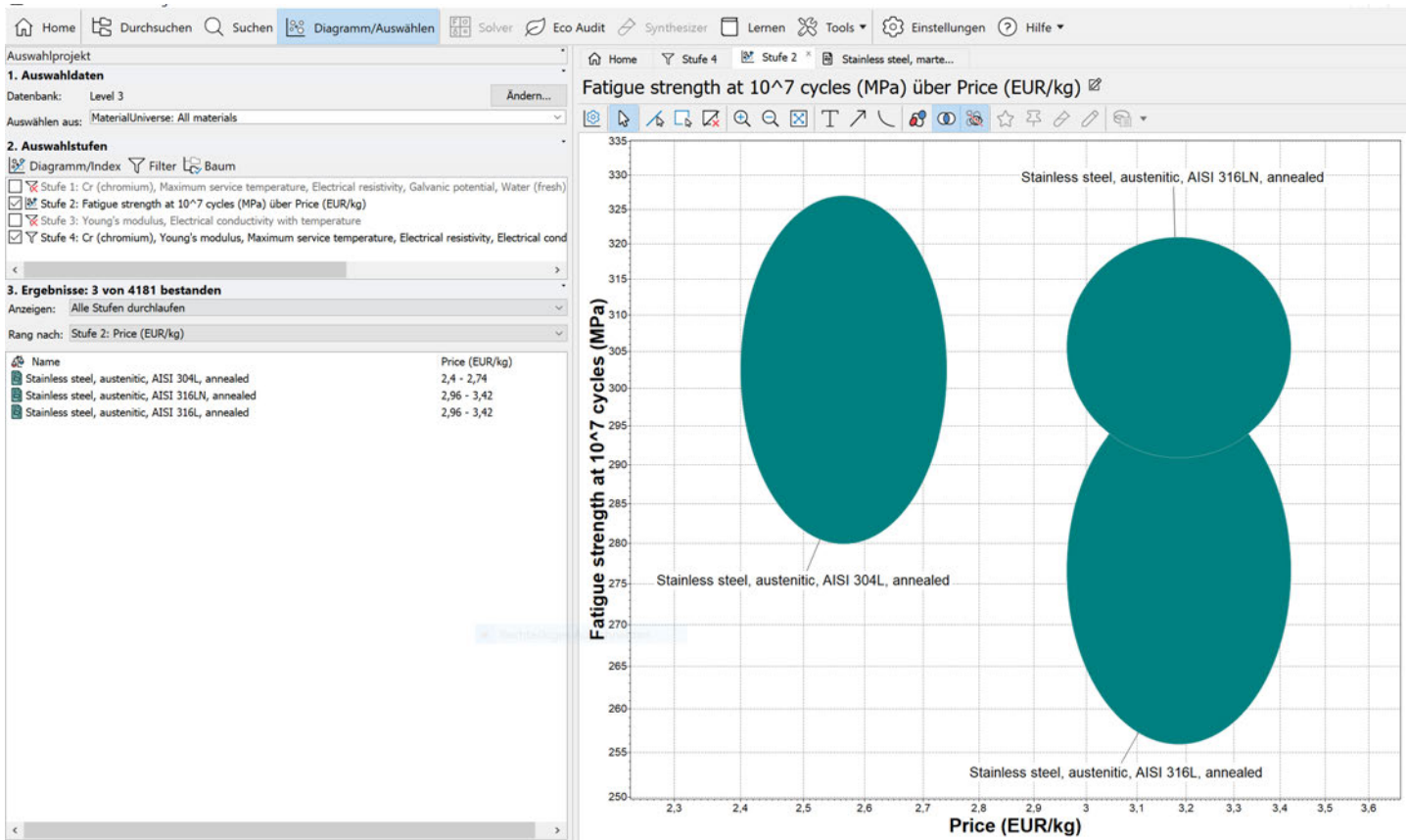


Abbildung 3: Werkstoffe mit exzellenter Säurebeständigkeit

Stellt man die Beständigkeit auf exzellente, also wo es keine Minderung bezüglich der Bipolarplattenleistung über einen längeren Zeitraum (>20.000 Stunden), so bleiben lediglich 3 Materialien zur Auswahl.

Der AISI 304L entspricht nach DIN dem X2CrNi19-11. Dieser wurde kalt oder warm gefertigt und gegläht. Der AISI 316LN entspricht nach DIN dem X3CrNiMoN17-13-3. Dieser wurde ebenfalls gegläht. Zuletzt ist der AISI 316L nach DIN dem X2CrNiMoN17-12-2 entsprechend. Dieser wurde ebenfalls gegläht. Dieses Material ohne Beschichtung würde für das Herstellen von Bipolarplatten reichen, dennoch hilft eine Goldbeschichtung zur Reduzierung des Oberflächenwiderstandes um über 50%, was sich dann in der Lebensdauer zeigt.

Für die Fräsversuche werden die austenitisch korrosionsbeständigen Edelstähle nach DIN 1.4301 oder X5CrNi18-10 und nach DIN 1.4435 oder X2CrNiMo18-14-3 verwendet. In den folgenden Tabellen sind die wichtigsten Eigenschaften dieser Werkstoffe aufgelistet.

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung von 1.4301

	C (Kohlenstoff)	Mn (Mangan)	Si (Silicium)	P (Phosphor)	S (Schwefel)	Cr (Chrom)	Ni (Nickel)	N (Stickstoff)
min.	-	-	-	-	-	17,5	8,0	-
max.	0,07	2,0	1,0	0,045	0,030	19,5	10,5	0,1

Die Korrosionsbeständigkeit dieses Werkstoffes ist gut bei mittleren mechanischen Eigenschaften und mittlerer Zerspanbarkeit. Bei der Zerspannung verfestigt sich die Werkstoffgüte.

Tabelle 3: Mechanische Eigenschaften des 1.4301 bei 20 °C

Härte HB	Dehngrenze $R_{p0,2}$ N / mm ²	Zugfestigkeit R_m N / mm ²	Dehnung A _{5,65}	Elastizitätsmodul kN / mm ²
≤ 215	≥ 190	500 - 700	≥ 45%	200

Die Anwendungsgebiete dieses Werkstoffes in der Chemie, im Apparatebau und auch in der Automobilindustrie Verwendung.

Tabelle 4: Physikalische Eigenschaften des 1.4301 bei 20 °C

Dichte kg/dm ³	Elektrischer Widerstand (ohm) mm ² /m	Magnetisierbarkeit	Wärmeleitfähigkeit W/m K	Spezifische Wärmekapazität J/kg K
7,9	0,73	sehr gering	15	500

Der Werkstoff 1.4435 ist einer gegen viele Korrosionsarten beständiger Edelstahl. Er wird aufgrund seiner Möglichkeit, gute Oberflächen zu erzeugen, häufig für Armaturen und medizinische Geräte verwendet.

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung von 1.4435

	C (Kohlenstoff)	Mn (Mangan)	Si (Silicium)	P (Phosphor)	S (Schwefel)	Cr (Chrom)	Ni (Nickel)	Mo (Molybdän)	N (Stickstoff)
min.	-	-	-	-	-	17,0	12,5	2,5	-
max.	0,03	2,0	1,0	0,045	0,030	19,0	15,0	3,0	0,1

Die Zerspanbarkeit des 1.4435 ist durchschnittlich bei mittleren mechanischen Eigenschaften. Jedoch sollte dieser Werkstoff theoretisch einfach zu zerspanen sein als der 1.4301, da der 1.4435 weniger Kohlenstoff besitzt.

Tabelle 6: Mechanische Eigenschaften des 1.4435 bei 20 °C

Härte HB	Dehngrenze Rp0,2 N / mm ²	Zugfestigkeit Rm N / mm ²	Dehnung A5,65	Elastizitätsmodul kN / mm ²
≤ 215	≥ 200	500 - 700	≥ 40%	200

Die Härte nach Brinell nimmt sich nicht viel beider Werkstoffe, dennoch ist der 1.4301 eine größere Dehnung als der 1.4435, was sich für etwas größere Temperaturen anders verhalten wird.

Tabelle 7: Physikalische Eigenschaften des 1.4435 bei 20 °C

Dichte kg/dm ³	Elektrischer Widerstand (ohm) mm ² /m	Magnetisierbarkeit	Wärmeleitfähigkeit W/m K	Spezifische Wärmekapazität J/kg K
8,0	0,75	gering	15	500

2.6 Grundlagen zur Berechnung der Schnittparameter

Zunächst wird für die Fräsversuche die erforderlichen Schnittparameter für den Bearbeitungsprozess ermittelt. Dabei liegt der Durchmesser des Fräasers bei 1mm.

Die Drehzahl des Fräasers errechnet sich durch

$$n = \frac{v_c \cdot 10^3 \text{ mm/m}}{D \cdot \pi} \left[\frac{1}{\text{min}} \right] \quad (\text{Gl. 2.1})$$

Weiterführend wird die der Vorschub pro Schneide und die Anzahl der Schneiden benötigt, um die Vorschubgeschwindigkeit zu errechnen.

Die Vorschubgeschwindigkeit errechnet sich mit der Gleichung

$$v_f = f_z \cdot z_w \cdot n \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Das Schrägeintauchen des Fräasers beim Nutenfräsen ins Volle soll mit einem vorgegebenen Eintauchwinkel von 3° geschehen, um die Spanabfuhr zu verbessern. Für die Eingabe im CNC-Bearbeitungszentrum ist die Länge L erforderlich, die der Fräser eintaucht, bis er seine

Schnitttiefe a_p erreicht hat. Da auch ein Sicherheitsabstand zwischen Werkstück und Werkzeug mit 1mm vorgegeben ist, muss dieser mitberücksichtigt werden.

Die Länge L errechnet sich durch die Formel

$$L = \frac{a_p + s_a}{\tan \alpha} [mm] \quad (\text{Gl. 2.3})$$

Für die Berechnung der Schnittkraft wird die Kienzle Gleichung [Dietrich, 2020, S. 1 verwendet.

Diese auftretende Schnittkraft entsteht beim Fräsen zwischen Werkstück und Werkzeug

$$F_c = K \cdot b \cdot h^{(1-m_c)} \cdot k_{c1.1} [N] \quad (\text{Gl. 2.4})$$

Die spezifische Schnittkraft $k_{c1.1}$ und der Spannungsdickenexponent m_c sind von dem Bauteilwerkstoff abhängig [Dietrich, 2020, S. 194ff].

Die Spannungsbreite ergibt sich aus

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa} [mm] \quad (\text{Gl. 2.5})$$

Aus der Spannungsbreite und Spannungsdicke kann die Schneidspanfläche ermittelt werden.

Die Spannungsdicke folgt sich aus

$$h = f_z \cdot \sin \kappa [mm] \quad (\text{Gl. 2.6})$$

Der Faktor K ist der Korrekturfaktor, der den Korrekturfaktor K_{v_c} für die Schnittgeschwindigkeit, den Korrekturfaktor für den Spanwinkel K_γ , K_{sch} für den Schneidstoff und K_{ver} für den Werkzeugverschleiß.

Das Produkt aller Korrekturfaktoren ergibt den Korrekturfaktor K

$$K = K_{v_c} \cdot K_\gamma \cdot K_{sch} \cdot K_{ver} \quad (\text{Gl. 2.7})$$

Bei einem Fräser mit 90° Schneide ist die Spannungsdicke gleich dem Vorschub pro Zahn. Der Einstellwinkel κ ist der Winkel zwischen Hauptschneide des Fräasers und der Vorschubrichtung.

Der Korrekturfaktor der Schnittgeschwindigkeit ist bei $v_c = 100$ m/min immer 1.

Für Schnittgeschwindigkeiten unter 100 m/min ist er durch diese Gleichung gegeben

$$K_{v_c} = \frac{2,023}{v_c^{0,153}} \quad (\text{Gl. 2.8})$$

Der Korrekturfaktor des Spanwinkels berücksichtigt den tatsächlichen Spanwinkel des Fräsers γ_{tat} , welcher mit dem Basisspanwinkel γ_0 , bei Stahlbearbeitung 6° , verrechnet wird.

Die Formel für den Korrekturfaktor des Spanwinkels ist

$$K_\gamma = 1 - \frac{\gamma_{tat} - \gamma_0}{100} \quad (\text{Gl. 2.9})$$

Bei VHM ist der Korrekturfaktor $K_{sch} = 1$, bei HSS 1,2 und 0,9 bei Keramikschnidstoff. Für ein neues Werkzeug ist der Korrekturfaktor $K_{ver} = 1$, wohingegen bei einem verschlissenen Schnittwerkzeug der Wert bei 1,5 liegt.

Da sich beim Stirn- bzw. Nutfräsen die Spanungsdicke während der Eingriffslänge zur Werkstückmitte hin ändert, wird mit der mittleren Spanungsdicke gerechnet.

Die Gleichung hierzu

$$h_m = \frac{\frac{360^\circ}{\pi} \cdot f_z \cdot \sin \kappa \cdot \frac{a_e}{D}}{\varphi_s} \quad [mm] \quad (\text{Gl. 2.10})$$

Der Eingriffswinkel beim Vollnutfräsen beträgt immer 180° . Für das Stirnfräsen wird die mittlere Spanungsdicke verwendet.

So ergibt sich die mittlere Schnittkraft aus

$$F_{cm} = K \cdot b \cdot h_m^{(1-m_c)} \cdot k_{c1.1} \quad [N] \quad (\text{Gl. 2.11})$$

Das Zeitspanvolumen stellt den Materialabtrag vom Zerspanen in Form von Spänen in einer bestimmten Zeit da [Walter, C-668].

Das Zeitspanvolumen ergibt sich aus

$$Q = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f}{10^3} \quad \left[\frac{cm^3}{min} \right] \quad (\text{Gl. 2.12})$$

2.7 Geometriewahl des Werkstücks

Im Laufe der Materialauswahl ist es notwendig, ein geeignetes Bipolarplatten-Design zu entwerfen und mit CAD zu konstruieren. Die aktive Fläche kann für eine portable oder mobil einsetzbare PEM-Brennstoffzelle mit Leistungen zwischen 100 – 500 Watt auf etwa 50 cm² festgelegt werden [Kreuz, 2008, S. 51]. Für die Erzielung dieser Leistungen muss ein möglichst druckloser Betrieb und ein einfacher, stabiler Stackaufbau vorliegen. Die Entwicklung des Flowfields muss die Anforderungen der optimalen Nutzung der aktiven Fläche beinhalten. Hierzu ist für die gleichmäßige Verteilung der Reaktionsgase ein sinnvoller Aufbau notwendig, aber auch die Stege zwischen den Nuten sollen hinreichend groß gewählt werden, dass die Gasdiffusionslage sauber in die Struktur der Bipolarplatte eingebettet ist. Auch den Druck möglichst gering zu halten und das leichte Austreten des Reaktionswassers aus der Kanalstruktur sind mit einzubinden. So wurde ein mäanderförmiges Flowfield mit mehreren Kanälen konzipiert, welche parallel zueinander alternierend die Seiten der aktiven Fläche wechseln. Das mäanderförmige Flowfield nutzt auch die Wende- und Eckstellen der aktiven Fläche für die Reaktionsgase, die auch noch den Vorteil der Verwirbelung der Gase und somit effektiver die Gase ausgenutzt werden. Nachteilig ist der erhöhte Druckverlust bei vorgegebenen Volumenstrom an den Umlenkstellen. Gleichzeitig kann das entstehende Reaktionswasser sich an diesen Stellen beim Ein- und Austritt stark anhäufen, sodass Tropfen entstehen, welche den Druckverlust weiter fördern. In der naheliegenden Abbildung wird ein für Bipolarplatten-Prototypen entworfenes Flowfield dargestellt.

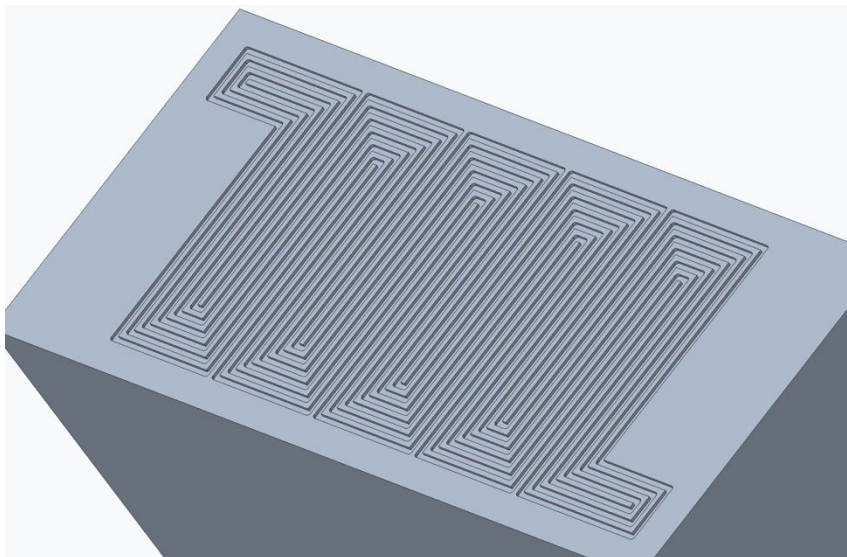


Abbildung 4: 3D-Konstruktion der Bipolarplatte

Das mäanderförmigen Flowfield beinhaltet sechs parallele Nuten über eine Fläche von ca. 52 cm² bei einer Gesamtfläche von 82,8 cm². Die Flowfields sind 1mm breit und 0,5 mm tief. Die Stege haben eine Breite von 0,8 mm. Daraus ergibt sich ein Nut-/Stegbreitenverhältnis von 1,25. Für die reale Brennstoffzelle ist es erforderlich eine dünnwandige Bipolarplatte herzustellen. Die Dicke darf zwischen 1 - 5 mm liegen.

3 Praktische Umsetzung

Ziel dieser Arbeit ist ein mäanderförmiges Flowfield per Fräsen an den Edelstählen zu erzeugen. Die mittelmäßige Zerspanbarkeit der Werkstoffe stellt große Anforderungen an das Fräswerkzeug bei der Herstellung der Nuten, so dass eine Betrachtung der Qualität der Werkzeuge sowohl im Werkszustand als auch nach der Erzeugung unumgänglich ist. Anhand der Auswertung der Zerspanbarkeitskriterien und den Resultaten wird eine Wirtschaftlichkeitsprüfung im Hinblick auf die Bearbeitungszeit und Werkzeugkosten vollzogen, um die Wettbewerbsmöglichkeit der Zerspanung gegenüber der herkömmlichen Herstellungsmethode mittels Spritzgusses zu detektieren. Die Werkstücke müssen für die richtige Geometrie zunächst aufbereitet werden. Für die NC-Programmierung wird eine DXF-Datei erstellt, die an dem CNC-Bearbeitungszentrum weitergeleitet wird, welches dann diese in Verfahrenswege umrechnet und darstellt. Die vorgegebenen Schnittparameter wie Drehzahl, Zahnvorschub und Eintauchwinkel sind in dem Bedienfeld der Maschine einzugeben und nötige G-Funktionen sowie m-Befehle, die mit den damit verbundenen Werkstücken relevant sind, müssen ebenfalls eingegeben werden. Die neuen Werkzeuge werden vor der kommenden Nutzung auf ihre Qualität mittels Mikroskops geprüft. Die richtigen Kräfte zum Befestigen des Fräswerkzeuges in der Aufnahme und diese an der Maschine sind zu tätigen. Maschinenhersteller geben ihren Maschinenwerkpunkt selbst vor. Für die Feststellung der Position des Werkstückes wird das Nullpunktverfahren benutzt, um an den geplanten Stellen des Werkstückes die Zerspanung durchzuführen. Sind alle Schritte vollzogen, so kann der Fräsprozess starten. Nach der Zerspanung und Erzeugung des Flowfields werden Werkzeug und Werkstück auf ihre Beschaffenheiten geprüft. Sind alle Versuche durchgeführt, wird eine Auswertung hinsichtlich Verschleißes, Werkzeugbruch, Oberflächenbeschaffenheit, Schnittkantenqualität und Standzeit erschaffen, wonach abgeleitet eine Wettbewerbsfähigkeit mit Optimierungsbedarf gegenüber der herkömmlichen Methode in Aussicht gestellt wird.

3.1 Einrichtungen, Geräte und Aufbau

Für diese Arbeit sind 10 Fräswerkzeuge und 2 Halbzeuge der Werkstoffe 1.4301 und 1.4435 mit den Abmaßen 300 mm x 60 mm x 60 mm (L x B x H) zur Verfügung gestellt worden. Die Rohlinge müssen auf die ausgewählte Geometrie angepasst werden. Da für die Zerspanung mit Fräsern die Dicke des Bipolarplatten-Prototyps nicht von Bedeutung ist, wird diese beibehalten. Zwei gegenüberliegende Flächen der Quaderförmigen Rohlinge werden für eine Oberflächenrauheit von besser als 50 μm plangefräst. Die Länge der Rohlinge wird auf 138 mm runtergesägt. Schlussendlich hat man vier für das Nutfräsen fertige Werkstücke mit insgesamt acht möglichen zu bearbeitbaren Flächen. Für das genauere Betrachten der Fräser wird das Werkstatt-Messmikroskop MarVision MM 320 der Firma Mahr mit Ringlicht verwendet. Für das Erstellen der CAD-Datei und daraus die DXF - Datei für die Maschine wird eine Testversion für Studenten des Programms Creo Parametric der Firma Parametric Technology verwendet. Das Programm kann 3D-Konstruktionen als auch Zeichnungen erstellen. Für sämtliche Messungen werden analoge Winkelmesser benutzt. Das 5-Achs-Vertikal-Bearbeitungszentrum Spinner-U620 der Firma Siemens wird mit der Siemens 840D-SolutionLine Steuerung bedient und ermöglicht Drehzahlen bis zu 20.000 U/min. Die Vollhartmetall-Schaftfräser sind von einer nicht aufgeführten Firma und haben 1mm Durchmesser bei einer Werkzeuglänge von 108 mm. Der Drallwinkel liegt bei gemessenen 6°. Der Fräser besitzt 3 Schneiden, die unsymmetrisch zueinander liegen und unterschiedlich groß sind. Die 10 bereitgestellten Fräser sind von 0 – 9 durchnummeriert. Die Abbildung 6 zeigt die Messerseite des Fräasers 1.

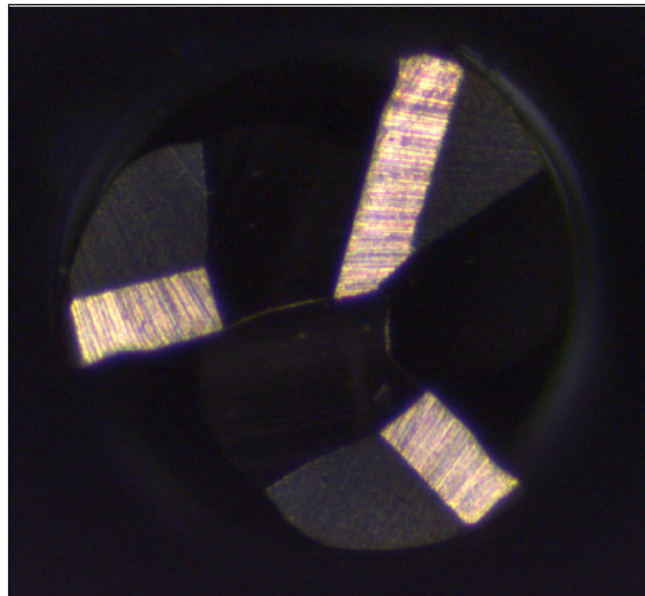


Abbildung 5: Schneidendarstellung des Fräsers 1

Die Aufnahme für das Werkzeug ist ein Hydrodehnspannfutter HSK-A63 der Firma Gühring. Das Werkzeug sollte bei dieser Aufnahme mit max. 10 Nm angezogen werden. Sämtliche Informationen und Daten der verwendeten Geräte befinden sich im Anhang.

3.2 Versuchsdurchführung

Der Versuch beginnt damit, eine CAD-Datei zu erstellen. Dafür wurde Creo Parametric verwendet. Das Werkstück soll die Maße von 138 mm Länge und 60 mm Breite tragen. Die mäanderförmigen Flowfields besitzen sechs parallele Nuten mit je 1 mm bei fünf dazwischengelegenen Stegen mit je 0,8 mm. Die aktive Fläche ist 52 cm² groß. So hat man erst ein Profil mit dem Quader des Werkstücks erzeugt. Eine Fläche wurde gewählt, an der dann das Flowfield kommt. Die Nuttiefe beträgt 0,5 mm. In der kommenden Abbildung ist die Hauptansicht des Flowfields dargestellt.

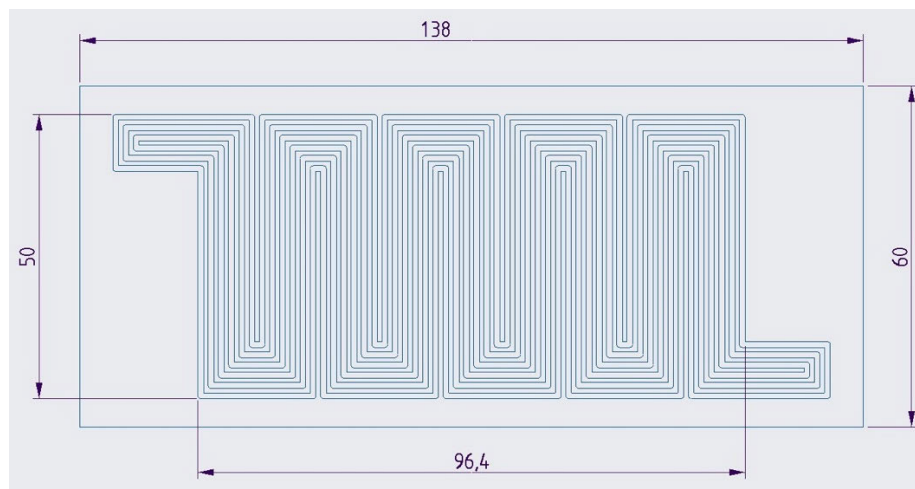


Abbildung 6: Draufsicht der Bipolarplatte mit Hauptmaßen

Diese .prt-Datei muss, um eine DXF-Datei zu erstellen, erst auf einer 2D-Zeichnung übertragen werden. Die Vorlage der Zeichnung wird im DIN A4-Format erstellt und die .prt-Datei auf die Zeichnung mit der richtigen Ansicht projiziert. Der Maßstab des Profils in der Zeichnung wird angepasst, sodass eine der Export als DXF erfolgt. Per USB-Stick wird die Datei an die CNC-Maschine übertragen, doch hier taucht schon das erste Problem auf. In der Maschinenbedienungsoberfläche wird ein Verzeichnis, für das die Durchführung mit dem Namen „Bipolarplatte“ erstellt. In diesem wird ein neuer Ordner Namens „Platte“ erstellt, indessen sich der Programmanfang und das Programmende befindet. In der Bedienung wird eine neue Kontur angewählt, eine neue Kontur erstellt, und diese aus der DXF-Datei gezogen, jedoch stürzte die Maschine bei der Übertragung der DXF-Datei ab.

Die Größe der DXF-Datei ist zu groß, weswegen in Creo Parametric die Datei angepasst werden muss. In Creo Parametric wird die Profiltiefe von den 59,2 mm auf 0,1 mm gestellt, eine Zeichnung erstellt und daraus die DXF-Datei exportiert. Tatsächlich ist die Datei von ca. 1360 KB auf ca. 790 KB geschrumpft. Auch das Erstellen eines Bleches statt eines Profils und daraus die Zeichnung und die DXF lässt die Maschine nicht zu und stürze ab. Nach verschiedenster Überlegung und Umsetzung nimmt die Maschine die DXF-Datei an, die so erstellt werden konnte, indem statt eines Volumenkörpers oder Blech lediglich die Skizze in die Zeichnung eingefügt wird und die Darstellung der Skizze auf „Sichtbare Kanten“ eingestellt ist. Die Größe der DXF ist 79 KB groß. In der Maschinenbedienung ist es möglich die Konturen der Skizze zu sehen und auszuwählen. Die äußere Kontur, also die äußeren Kanten des Werkstücks werden für die Kontureingabe in der Fräsmaschine nicht benötigt, da an diesen Kanten nicht gefräst wird. Über die Maschinenbedienung können alle Linien zwischen den Umlenkungen nacheinander angewählt werden, bis der Konturkreis geschlossen wird. Hier soll hingewiesen werden, dass für die ersten Durchläufe anstelle der echten Werkstücke, auf Platten aus Hartschaum zurückgegriffen wird.

Mithilfe der Simulationsfunktion an der Maschine kann die Kontur so vor dem realen Prozess beobachtet werden und hier fällt auf, dass der Fräser über dem Werkstück fräst. Also ist ein Nullpunktverfahren mit dem digitalen 3D-Taster durchzuführen. Das Nullpunktverfahren gleicht den Nullpunkt des Werkzeugs mit dem Nullpunkt des Programms. Mit dem digitalen 3D-Taster kann man das Werkstück ankratzen, bis man den nötigen Koordinatenwert hat oder im Falle des Nullpunktverfahrens das Werkstück ankratzt, bis der angezeigte Wert auf dem Taster gleich 0 ist, sodass auch in der Bedienung dann der Wert der jeweiligen Achse zurückgesetzt wird. Wichtig ist hier den Ursprung seines Werkstückes zu kennen, von wo dort aus der Fräsversuch starten soll. In diesem Fall ist es die obere linke Ecke. Das nächste Problem beinhaltet die Konturfahrt in Abhängigkeit vom Nullpunkt, denn der Nullpunkt soll die obere linke Ecke des Werkstücks wählen und der Konturbeginn liegt in X-Richtung bei 4 mm und in Y-Richtung bei 5 mm. Jedoch zeigt die Maschine Werte von 89,54 mm in X-Richtung und -159,12 mm in Y-Richtung. Über die Simulation überprüft wird der Fräsprozess mit leichter Verschiebung der Kontur im Werkstück dennoch richtig dargestellt, aber die Kontur ist größer als das Werkstück. Im Programmkopfes wird die Größe des Werkstücks angegeben. Also schlussfolgert sich ein Fehler in der Erstellung der DXF-Datei, die wieder mit Creo Parametric angepasst werden muss. Gelöst ist das Problem, nachdem auf dem DIN A4 Format mit dem Werkstück in einem Maßstab von 1/20 die Skizze des Werkstücks im Verhältnis zur Blattgröße von 297 mm x 210 mm platziert wird und deutlich zu erkennen ist, dass jede Einheit 1 in Creo

Parametric der Länge von 25,4 mm entspricht. Die Einheiten in der Testversion für Studenten sind in US-Einheiten (Zoll [Inch], Pfund [lb]) standardisiert. Durch die Umstellung in den Einheiten Millimeter und Kilogramm, kann die Skizze richtig im Maßstab einbetten. Für die Nullpunktverschiebung wird die Zeichnung in der Größe der Skizze von 138 mm x 60 mm erstellt und genau auf diese zugeschnitten. Aus dieser Zeichnung kann eine DXF-Datei mit 52 KB erstellt werden, die auch die Maschine annimmt und alle Konturen erkennt. Die Konturen sind mit „222“ bis „227“ benannt. Da der Versuch reines Bahnfräsen bei konstanter Schnitttiefe ist, müssen auch in der Programmzeile die Schnittparameter und der Drehrichtung des Fräasers angegeben werden. Für die NC-Programmierung benötigt die Maschine noch einige Schnittparameter wie den Zahnvorschub, die Drehzahl beim Bearbeiten, den Eintauchwinkel und die Drehzahl beim Eintauchen.

Diese Parameter sind vorgegeben. Die Drehzahl beläuft auf $n = 18.470$ U/min oder $v_c = 58$ m/min. Der Zahnvorschub liegt bei $f_z = 0,008$ mm oder $v_f = 440$ mm/min für das Bearbeiten. Der Eintauchwinkel beträgt 3° . Die Länge L des Eintauchweges ist mit Einbindung des Sicherheitsabstands oberhalb der Werkstückoberfläche von 1 mm und bei einer Schnitttiefe $a_p = 0,5$ mm gleich ca. 28,622 mm. In der folgenden Abbildung wird der Programmcode dieses Versuchs gezeigt.

N10	Programmkopf	G512 Quader
N20		
N30	T = "XY 1mm"	
N40	m6	
N50	s18470 m3 g94 f440	
N60		
N70	trans x0 y0 z0	
N80	g0 x32.622 y54 z1	
N90	g94 f330 s18470 m3	
N100	g1 x4 z-0.5	
N110	g94 f440 s18470 m3	
N120	Kontur	222
N130	Bahnfräsen	T=XY 1mm F=0.008/Z S=18470U Z0=0 Z1=-0.5
N140	Kontur	223
N150	Bahnfräsen	T=XY 1mm F=0.008/Z S=18470U Z0=0 Z1=-0.5
N160	Kontur	224
N170	Bahnfräsen	T=XY 1mm F=0.008/Z S=18470U Z0=0 Z1=-0.5
N180	Kontur	225
N190	Bahnfräsen	T=XY 1mm F=0.008/Z S=18470U Z0=0 Z1=-0.5
N200	Kontur	226
N210	Bahnfräsen	T=XY 1mm F=0.008/Z S=18470U Z0=0 Z1=-0.5
N220	Kontur	227
N230	Bahnfräsen	T=XY 1mm F=0.008/Z S=18470U Z0=0 Z1=-0.5
END	Programmende	

Abbildung 7: Programm für die CNC-Steuerung

Die Simulation kann richtig vollendet werden, so dass der Versuch mit einem Probewerkstück aus Hartschaum gestartet wird.

Ein weiteres Ereignis passiert bei der zweiten Umlenkung, wo kein Steg zwischen den Nuten zu sehen ist. Dies liegt daran, dass der Fräser mittig der Kontur verläuft, so dass der Steg von 0,8 mm bei einem Werkzeugradius von 0,5 mm und Umlenkung. Dieses Problem wird wieder in Creo Parametric verbessert, indem eine größere Stegbreite angegeben wird. Jedoch funktioniert diese Änderung aufgrund der optimalen Nutzung der aktiven Fläche der Bipolarplatte von 50 cm² nur bedingt. Eine Anpassung der Flowfieldstruktur ist unumgänglich. So wurde die Struktur weitergehend beibehalten, jedoch sind die Nutkonturen nicht mehr voneinander separiert, sondern wurden so eingebunden, dass sich ein labyrinthartiges Muster mit nur einem Eingang und einem Ausgang ergibt. Aus der Zeichnung heraus ergibt sich eine neue DXF-Datei mit 32KB, die die Maschine angenommen hat, allerdings kann man nicht alle Konturen anwählen. Dieses Problem kann umgegangen werden, indem die vielen Umlenkungen entfernt werden. Durch die Anforderung an die optimale Nutzung der aktiven Fläche der Bipolarplatte muss ein ähnliches mäanderförmiges Flowfield konstruiert werden, von dem die Konturen erkannt werden. In der folgenden Abbildung ist die Endskizze der Flowfieldkonturen. Diese ergeben eine minimalere aktive Fläche von 48,3 cm².

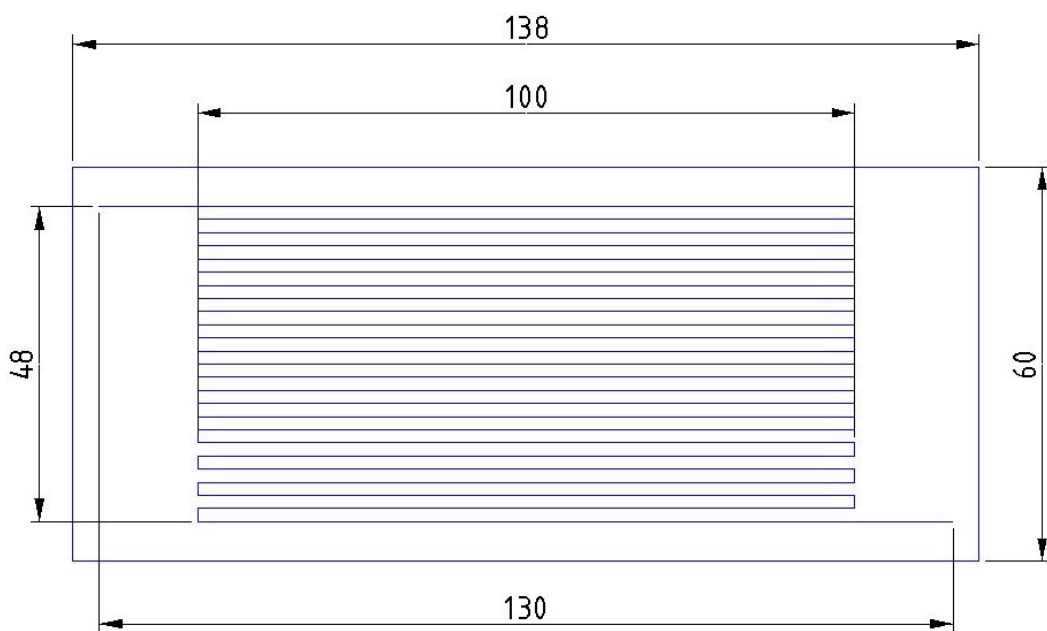


Abbildung 8: Konturdarstellung der Bipolarplatte mit Hauptbemaßungen

Die Zeichnung hat die Maße von 138 mm x 60 mm und die dazugehörige DXF-Datei ist 20 KB groß. Die Kontur mit der Beschriftung „111“ kann richtig auf die Maschine projiziert werden und der Fräsversuch fehlerfrei simuliert werden. In der folgenden Abbildung ist die verbesserte Version des Programms zu sehen.

N10	Programmkopf	G512 Quader
N20		
N30	T = "XY 1mm"	
N40	m6	
N50	s18470 m3 g94 f440	
N60	m85	
N70	trans x0 y0 z0	
N80	g0 x32.622 y54 z1	
N90	g94 f330 s18470 m3	
N100	g1 x4 z-0.5	
N110	g94 f440 s18470 m3	
N120	Kontur	111
N130	Bahnfräsen	T=XY 1mm F=0.008/Z S=18470U Z0=0 Z1=-0.5
END	Programmende	

Abbildung 9: Verbesserter Programmcode

Nach erfolgreicher Programmierung und Simulation wird ein weiteres Probenstück aus Hartschaum verwendet. In diesem Durchlauf wurde das Herstellen der Flowfields durchgeführt, sodass man die Edelstahlwerkstücke einspannen kann.

Die zehn Fräswerkzeuge sind von 0 – 9 nummeriert. Im Zuge der Durchführung wurden die Fräswerkzeuge 1 - 9 unter dem Mikroskop betrachtet. Dabei ist auf die Qualität der Werkzeuge zu achten. Signifikante Unterschiede zwischen den neun Fräsern werden aufgezeichnet.

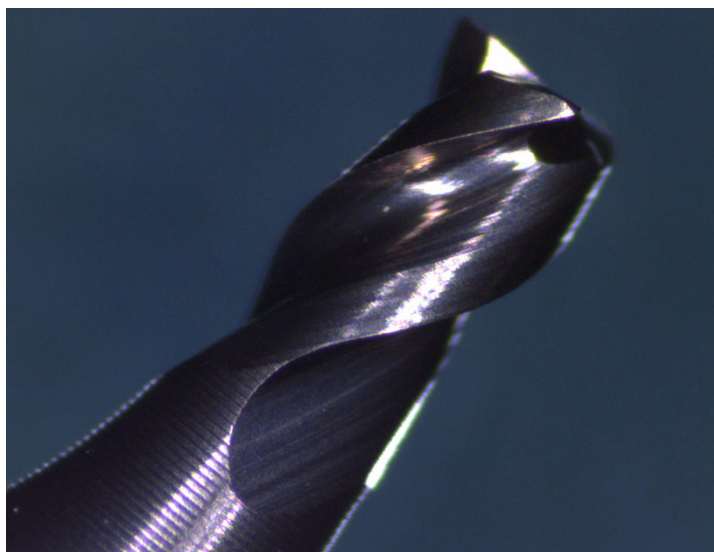


Abbildung 10: Fräswerkzeug 9 unter dem Mikroskop

Im Anhang sind mehrere Abbildungen über den Auslieferungszustand der restlichen Fräser aus verschiedensten Perspektiven unter dem Mikroskop dargestellt. Anhand der Abbildung 7 beobachtet man, dass die Schneiden einen Rechtsdrall aufweisen. Das bedeutet, dass die Spannuten nach rechts gewunden sind. Man erkenne gerundete Schneiden. Der Fräser ist linksschneidend und der Drallwinkel liegt bei ca. 30° . Der Spanwinkel liegt bei ca. gemessenen 8° und die Ausführung des Werkzeuges ist Typ NR. Als weitere gegebene Daten kann erwähnt werden, dass der Fräser eine Titan-Aluminium-Silizium-Nitrid-Beschichtung (TiAlSiN) hat, die Hitzebeständig ist und große Drehzahlen erlaubt. Das Hartmetallsubstrat ist Feinstkorn bei einer Korngröße von $5\ \mu\text{m}$ und beinhaltet 10% Kobalt.

Die Fräswerkzeuge werden für das Verwenden an einer Hydrodehnspannfutter mit 10 Nm Drehmoment festgemacht. Der Rundlauf liegt unter $5\ \mu\text{m}$. Nachdem das Spannfutter in die Maschine eingesetzt wird, muss noch das Werkstück am Arbeitstisch eingespannt werden. Dies geschieht mit einem Zentrierschraubstock, der Spannkraft bis zu 40 kN erlaubt. Das Edelmetallwerkstück wird eingesetzt und die Überstände beider Seiten über dem Zentrierschraubstock mit einem Winkelmesser ausgemessen und gleich groß festgesetzt. Das NPV wird hier ebenfalls angefahren, jedoch ist in dieser Programmierung der Werkstückursprung in der unteren linken Ecke des Materials. Alle Maßnahmen sind getroffen und das richtige Fräsen kann beginnen, jedoch dreht das Bearbeitungszentrum aufgrund der Meldung „Safety Integrated“ (deutsch: „Sicherheit integriert“) nicht mehr die benötigten 18.470 U/min, sondern nur 17.778 U/min. Für das Material 1.4301 sind 3 der 4 nutzbaren Flächen und bei dem Material 1.4435 sind 2 der 4 nutzbaren Flächen mit einer Werkzeugeinspannung in die Aufnahme von 10 Nm festgezogen, während die anderen Seiten mit Fettschmierung des Schaftes und einem Drehmoment von 12 Nm festgezogen werden. Im Laufe der Versuche stellt sich beim Fräsen der Kontur mit Fräswerkzeug 4 fest, dass der Fräser nur die linke Seite des Werkstücks fräst. Der Vorgang wird abgebrochen und beim Messen der Werkstücke wird festgestellt, dass die Dicke der Platten nicht konstant 59,2 mm ist. So wird das Werkstück eingespannt und mit einem Planfräser mit dem Durchmesser von ca. 31,5 mm bei einer Drehzahl von 1000 U/min mit minimalem Vorschub die Oberfläche des Werkstückes angefahren, bis die ersten Späne erscheinen und so dann mit mittlerem Vorschub die Fläche zu ebenen. Die noch zu bearbeitenden Platten sind ebenfalls zu vermessen und ein Werkstück leidet auch unter dieser Unebenheit. Der Planfräser war etwas verschlissen, sodass die Schneiden ausgewechselt werden. Die Simulation der Versuche habe eine Bearbeitungszeit von 12:06 Minuten bei einer Verfahrstrecke von 4972 mm angegeben.

4 Auswertung mit Interpretation

Für das Werkstück 1.4301 wird der Fräser 0 verwendet, der 3° Eintauchwinkel und einen Vorschub für das Eintauchen von 75% des Bearbeitungsvorschubs fährt. Der Fräser bricht beim Eintauchen ab, jedoch bewegt sich das Werkstück aufgrund fehlender Einspannung in die Eintauchvorschubsrichtung mit. Während des Eintauchens soll ca. 9,55 mm Länge des Materials abgetragen werden. Dieser Fräser schafft insgesamt ca. 8,3 mm, bevor er bricht. Doch anhand Abbildung 11 stellt sich fest, dass der Fräser schon bei 5,6 mm eingebrochen ist. Es kann an die schlechte Spanabfuhr liegen. Die entsteht, wenn der Vorschub schneller ist als der Spantransport, sodass die Späne im Inneren der Bearbeitung bleiben und sich gegen das Werkzeug drücken, wodurch das Werkzeug größeren Belastungen gegenhalten muss, bis es versagt und abbricht.

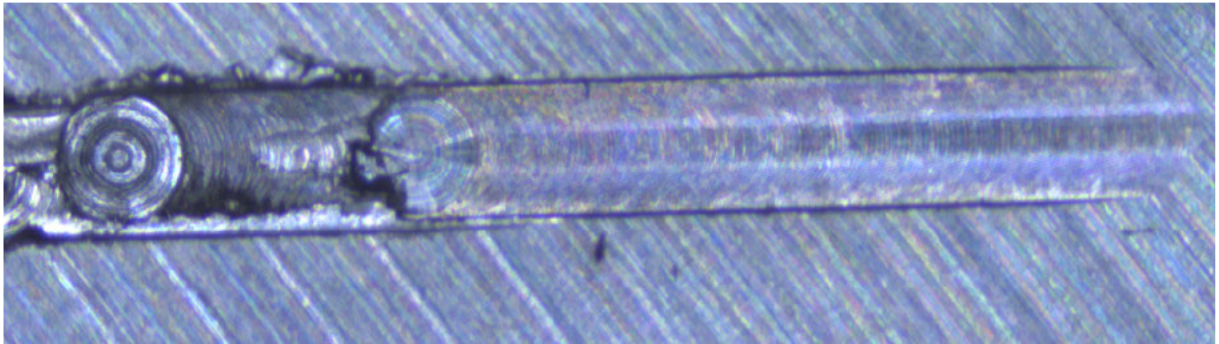


Abbildung 11: Eintauchweg des Fräasers 0

Auch die Schnittkantenqualität leidet ab dem Einbruch bis zum Werkzeugbruch. Das Werkzeug selbst zeigt einen Scherbruch wie in Abbildung 12 zu erkennen ist. Vom Fräser sind ca. 2 mm Länge abgebrochen.

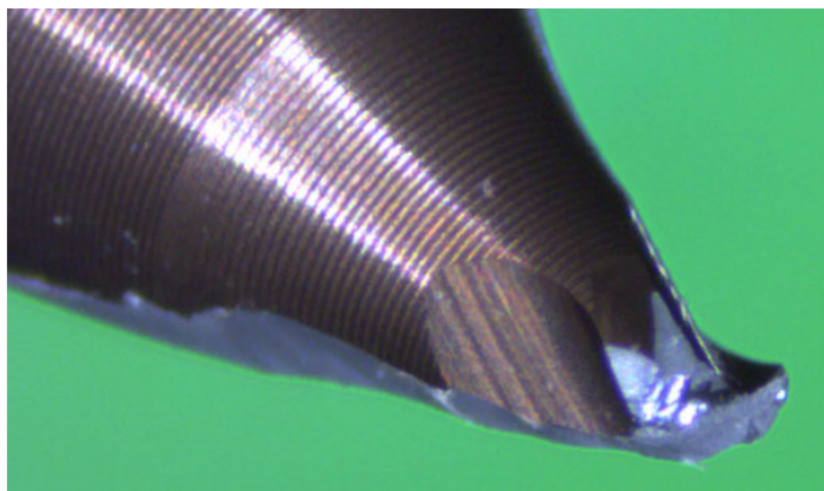


Abbildung 12: Fräs Werkzeug 0 nach der Bearbeitung

Auch kann man aufgrund des verrutschen des Werkstückes einen verschlissenen Schaft erkennen, der durch das Schieben des Werkstückes bei der Bearbeitung und der zuvor eingebrochenen Schneide entstanden sein muss.

Der Fräser 1 liefert bei vollgespanntem Werkstück aus 1.4301 ähnliche Ergebnisse. Das Werkstück ist hier fest angezogen und zeigt auch ein Bruch des Werkzeugs während des Eintauchvorgangs. Der Fräser schafft 7,77 mm Länge des Eintauchweges, bevor er bricht. Anders als beim Fräser 0 gibt es hier keinen Einbruch, der sich entlang des Weges bemerkbar macht. Auch hier kann es daran liegen, dass die Spanabfuhr nicht optimal ist und deshalb das Werkzeug bricht. Aber auch die Winkeleinstellung könnte nicht optimal sein.

Für den Fräser 2 gibt es Änderungen. Der Fräser hat bei einem Einstellwinkel von 2° , einer Schnitttiefe von 0,25 mm und aktiver Luftkühlung von außen, den Eintauchvorgang bei einem Zahnvorschub von 0,006 mm gemeistert, bricht aber beim Befahren der Nutkontur nach ca. 5 mm ab. Anhand der Abbildung 13 erkennt man an der Anfangsstelle der Bahn, dass diese grob ist.

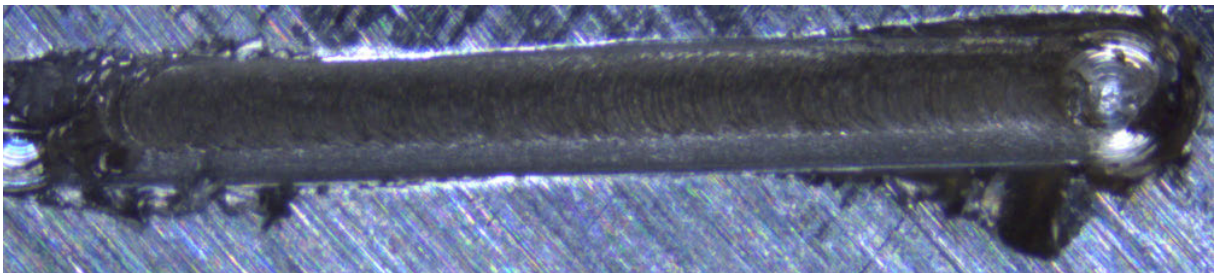


Abbildung 13: Hauptverfahrbahn des Fräasers 2

Daraus kann hingedeutet werden, dass der Fräser 2 schon beim Eintauchen leicht stumpf wird. Anhand der großen Abtrennung an dem Konturstartpunkt kann auch gesagt werden, dass der Fräser schon in die plastische Verformung eingedrungen ist und der Bruch auch mit der Bearbeitungszeit und der immer höher werdenden Belastung an das Werkzeug auftritt. Ein weiterer Grund für die Entstehung dieser plastischen Verformung könnte die immer noch nicht ausreichende Kühlung des Fräasers sein.

Für den Fräser 3 wird der Eintauchvorschub auf 50% reduziert. Der Fräser habe schon vor der 1. Umlenkung angefangen, ein weniger sauberes Schnittkantenbild zu erzeugen und bricht auf der Strecke von ca. 1657 mm oder bei einer Bearbeitungszeit von 164 Sekunden endgültig ab.

Die folgende Abbildung zeigt das nicht Entgratete Werkstück nach diesem Fräsprozess.



Abbildung 14: Fräsbild erzeugt durch den Fräser 3

Die Strategie ist ab dem Fräser 4 abgeändert und das Eindringen des Werkzeuges ins Material 1.4301 geschieht über die linke Seite ohne Winkel. So habe der Fräsprozess die vollen 12 Minuten und 10 Sekunden gebraucht und die endgültige Flowfieldstruktur ist vorhanden.

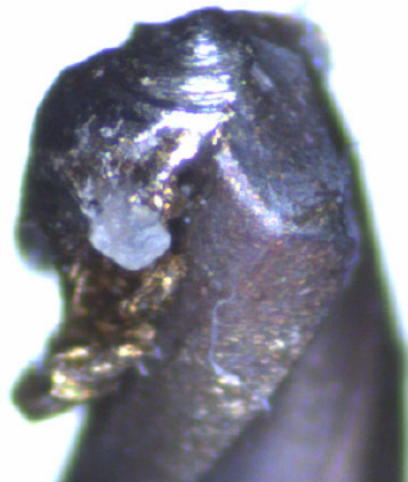


Abbildung 15: Fräser 4 nach dem Zerspanprozess

An dem Fräser in Abbildung 15 erkennt man aufgrund der Materialaufbackung die Aufbauschneidenbildung. Diese entsteht im Laufe des plastischen Verformens. Das plastische Verformen müsse beim Bearbeiten durch die hohe Betriebstemperatur, welche dann den Schneidstoff aufgeweicht und durch die Zerspanung zu fließen beginnt, entstehen.

Der Fräser 7 bricht trotz seitlicher Anfahrt beim Material 1.4435 schon beim Eindringen ab, fräst weiterhin mit der einen verbliebenen Spitze weiter.

Fräser 8 erzeugt im Material 1.4435 ein komplettes Flowfields, welches nur einmal verfahren und bei einer Schnitttiefe von 0,25 mm erzeugt wird. Der Fräser hat 21 Umlenkungen

durchgehalten, bevor das Werkzeug endgültig verschlissen ist und nicht mehr 1mm breite Nuten erstellen kann. Die Bearbeitungszeit bis zum Zeitpunkt, in der das Werkzeug stumpf wird, beträgt 5:03 Minuten oder liegt bei einer Strecke von 2067 mm. Dies wird anhand Abbildung 16 deutlich gemacht. Der Fräser ist bei Eindringen mit 50% des Zahnvorschubes gestartet, nach 1 Bearbeitungsminute wird dieser auf 75% angehoben und nach etwa 3:30 Minuten ist der Zahnvorschub von 0,008 mm eingestellt.

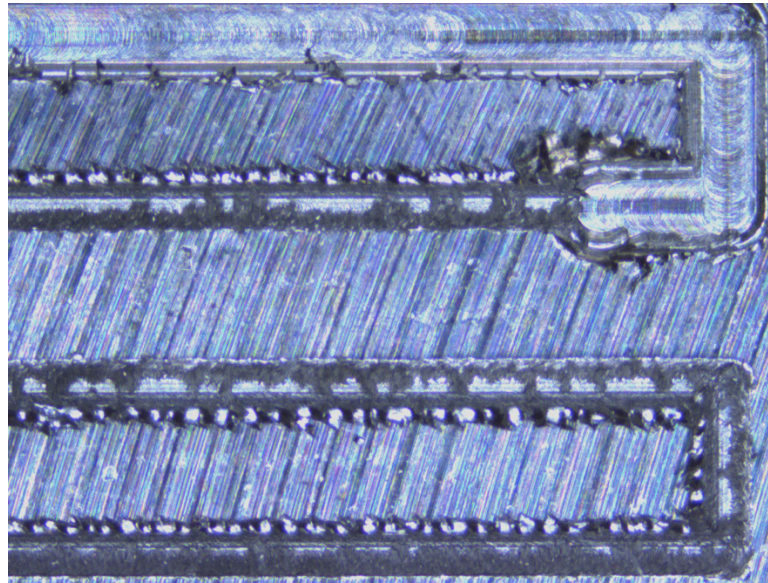


Abbildung 16: Flowfield des Fräsers 8

Eine weitere Bemerkung beim Fräser 8 ist die Schnittkantenqualität. Die Schnittkanten mit weniger Vorschub sind sauberer als die mit der eingestellten Vorschubgeschwindigkeit von 440 mm/min.

Zuletzt bricht der Fräser 9 kurz nach dem seitlichen Eindringvorgang am Material 1.4435. Dabei wurde hier ebenfalls mit 50% des eingestellten Vorschubes angefahren. Gründe für das Abbrechen des Werkzeuges könnte eventuell der Kolkverschleiß darstellen. Die gefahrene Drehzahl für den 1mm kann zu hoch sein, weswegen der durch Reibung entstehenden Hitze, die Partikel aus dem Schneidstoff in den Span wandern. So entstehen Ausbrüche an der Schneidkante und Gruben in der Spanfläche. Der heiße Schneidstoff im Span verursacht eine Einkerbung auf dem Hartmetallfräser. Die Schneidkante wird dadurch geschwächt, so dass die Gefahr des Schneidkantenbruches zunimmt.

Auch das Fehlen der wirkungsvolleren Kühlung ist nicht gegeben und könnte aufgrund dessen zum Spänestau führen, welcher zum Bruch des Werkzeuges führt. Vorgebeugt kann dies durch eine Erhöhung des Vorschubs, jedoch zeigen die Resultate bei dem vorgegebenen Vorschub nicht die vorgestellten Erwartungen. Eine Standzeitmessung kann aus diesen Resultaten nicht erfolgen, da lediglich 1 der 10 genutzten Werkzeuge die komplette Bearbeitungszeit mit akzeptablem Ergebnis durchhält, der zumal aber auch schlechtere Schnittkantenqualitäten bei der 2. Anfahrt der Bahn zeigt, wodurch das Werkstück entgratet werden muss. Die Nutqualität unterscheidet sich ebenfalls. Während die Qualität der Nutoberfläche beim Fräser 4 akzeptabel und rund ist, also die Fläche in der Nut ist nicht eben, so sieht es beim Fräser 8 deutlich anders aus. Die Nut scheint einen ebenen Boden mit einer Verjüngung in Richtung der Tiefe. Die kommenden Abbildungen zeigen grob die Unterschiede.

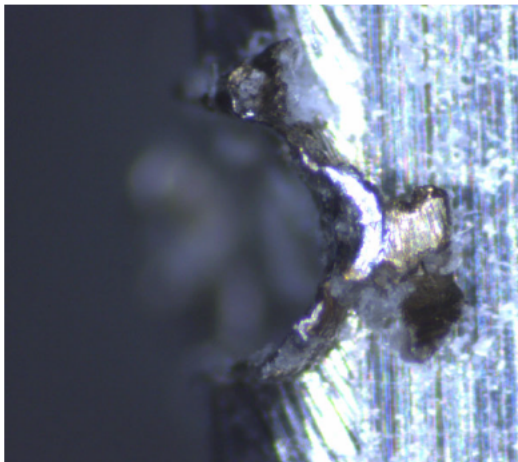


Abbildung 18: Oberflächenqualität durch Fräser 4

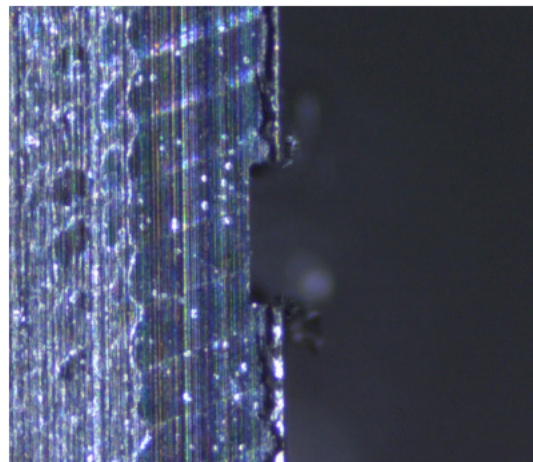


Abbildung 17: Oberflächenqualität durch Fräser 8

4.1 Schlussfolgerung und Ausblick

In Anbetracht der Auswertung dieser Versuche bedarf es im Vergleich zur konventionellen Methode mittels spritzgegossener Graphitcompounds an Optimierung, um auch Bipolarplatten der Brennstoffzellen zerspanend herzustellen. Ein möglicher Ansatz wäre, die Zerspanung mittels eines geeigneten Werkzeugs mit mithilfe eines Kühlmittels durchzuführen. Schon die Minimalmengenschmierung könnte den Werkzeugverschleiß lindern. Denn das kontinuierliche Kühlen und Schmieren des Fräasers kann eine längere Standzeit bieten. Durch den Luftstrom, aus dem die Emulsion kommt, kann die Spanabfuhr verbessert werden, sodass es sich insgesamt wirtschaftlicher Arbeiten lässt. Auch eine Nutzung von Hydrodehnspannfutter mit geschlitzten Reduzierhülsen kann einen optimaleren Rundlauf, einen schnellen Werkzeugwechsel und gute Haltekräfte bieten und weiterdenkend auch

Fräser, die keine IKZ haben, mit einer inneren Kühlfuhr betreiben zu können. Auch das Verwenden von Fräsern mit IKZ bringt den Vorteil der Kühlung bei gleichzeitigem Spantransport und sorgt für bessere Lebenszeiten. Durch diese Änderung kann eine Erhöhung des Vorschubs bei gleichbleibender Schnitttiefe oder sogar eine Erhöhung beider Größen gewährleistet werden, was sich dann auf die Hauptzeit auswirken kann, wenn der Prozess beschleunigt wird oder es zu keinem zweiten Fräsdurchgang kommt. Bei gleichbleibendem Vorschub mit Erhöhung der Schnitttiefe wird der Herstellungsprozess der Flowfields ca. 6 Minuten in Anspruch nehmen.

Diese Untersuchung der Fräser auf eine geeignete Flowfield-Herstellung für Bipolarplatten aus Edelstahl zeigt eine Durchfallquote von 80%. Diese Untersuchung der Fräser auf eine geeignete Flowfield-Herstellung für Bipolarplatten aus Edelstahl zeigt eine Durchfallquote von 80%. Durch diese Feststellung wirft sich die Frage vor: Sind die Parameter richtig gewählt? Ist die erzeugte Struktur des Flowfields ans Zerspanen angepasst? Ist der aufbereitete Zustand für das Fräsen der Platten optimal? Ist der zu verwendende Fräser der richtige? Oder bürden sich mögliche Probleme?

Für die Beantwortung dieser Fragen ist eine weitreichendere Begutachtung dieser Problematik gefragt. In einer solchen Arbeit könnte eine FEM-Simulation der Herstellung durchaus Vorteile bringen.

In Bezug auf die Wahl der Parameter und die erzeugte Struktur des Flowfields ist es wichtig zu überprüfen, ob die verwendeten Schneidwerkzeuge, für das Material und die Struktur des Flowfields geeignet sind. Es ist möglich, dass Anpassungen an den Parametern und an der Struktur des Flowfields vorgenommen werden müssen, um die Durchfallquote zu reduzieren. Zusätzlich ist es wichtig zu überprüfen, ob der Herstellungsmethode des Materials für das Fräsen der Platten optimal ist. Eine unzureichende Materialvorbereitung kann zu einer erhöhten Durchfallquote führen. Es kann auch erforderlich sein, den Zustand des zu verwendenden Fräasers zu überprüfen, um sicherzustellen, dass er für das Material und die Struktur des Flowfields geeignet ist. Schließlich können mögliche Probleme bei der Herstellung von Bipolarplatten aus Edelstahl auf verschiedene Faktoren zurückzuführen sein, einschließlich Materialprobleme oder unzureichende Werkzeugleistung. Eine gründliche Analyse und Bewertung des Herstellungsprozesses kann dazu beitragen, diese Probleme zu identifizieren und zu lösen, um die Durchfallquote zu reduzieren und die Qualität der Bipolarplatten zu verbessern.

5 Literaturverzeichnis

Siqens GmbH. (2023, 30. Januar). *Was ist eine Brennstoffzelle?* Siqens GmbH.

<https://siqens.de/was-ist-eine-brennstoffzelle/>

Kreuz, C. (2008, 11. April). *PEM-Brennstoffzellen mit spritzgegossenen Bipolarplatten aus hochgefülltem Graphit-Compound* (Dissertation, Universität Duisburg-Essen)

Langemann, M. (2016, 07. September). *Bipolarplattenmaterial für Polymer-Elektrolyt-Membran Elektrolyse* (Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen).

<https://publications.rwth-aachen.de/record/680787/files/680787.pdf>

Frahm, T. (2022, 15. Juli). *Brennstoffzellentypen im Vergleich.*

<https://www.heizungsfinder.de/brennstoffzelle/heizung/typen>

Hochtemperatur-Brennstoffzelle. (o. D.). ITWissen.info.

<https://www.itwissen.info/Hochtemperatur-Brennstoffzelle-high-temperature-fuel-cell.html>

Niedertemperatur-Brennstoffzelle. (o. D.). ITWissen.info.

<https://www.itwissen.info/Niedertemperatur-Brennstoffzelle-low-temperature-fuel-cell.html>

Walter AG. (o. D.). *Berechnungsformeln Fräsen Drehzahl.*

https://waltertools.blaetterkatalog.de/blaetterkatalog/catalogs/catalog/de/2017/html/berechnungsformeln_fraesen_drehz.html

Deutsches Kunststoff Institut. (2011, 28. Februar). *Charakterisierung hochgefüllter Graphit-Compounds zur Auslegung und Optimierung des Spritzgießprozesses für Bipolarplatten in Brennstoffzellen-Anwendungen.*

https://www.zbt-duisburg.de/fileadmin/user_upload/01-aktuell/05-publikationen/06-Projektberichte/AiF304ZN_Abschlussbericht_Rheo-SG.pdf

Dietrich, J. (2016). *Praxis der Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung.*

Springer-Verlag.

6 Anhang

Der vorliegende Anhang enthält zusätzliche Informationen, die für das Verständnis und die Replikation der in der Hauptarbeit präsentierten Ergebnisse von Bedeutung sind. In diesem Anhang finden Sie detaillierte Abbildungen zu den verwendeten Werkzeugen und Materialien, eine komplette Rechnung der Schnittparameter sowie einen anderen NC-Programmcode, die nicht in die Hauptarbeit aufgenommen wurden. Die in diesem Anhang präsentierten Informationen tragen dazu bei, die Vollständigkeit und Transparenz der Arbeit zu gewährleisten.

6.1 Berechnung der Schnittparameter

Das Kapitel 2.6 „Grundlagen zur Berechnung der Schnittparameter“ zeigt die nötigen Schritte für eine geeignete theoretische Schnittparameterwahl. Die Ermittlung der Parameter wird für den Werkstoff 1.4301 durchgeführt. Dabei wurden einige der Werte aus dem Tabellenbuch Zerspantechnik, 2018, S. 218ff. entnommen:

$V_c = 90 \text{ m/min}$, $f_z = 0,01 \text{ mm}$, $k_{c1.1} = 2350 \text{ MPa}$, $m_c = 0,21$, $\gamma_0 = 8^\circ$, $\varphi_s = 180^\circ$, $z = 3$, $\kappa = 90^\circ$,
 $a_e = 1 \text{ mm}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$

Somit folgt:

$n = 28.650 \text{ U/min}$

Mit der Drehzahl kann die Vorschubgeschwindigkeit errechnet werden.

$V_f = 859,5 \text{ mm}$

$b = 0,5 \text{ mm}$

$h = f_z = 0,01 \text{ mm}$

$K_{vc} = 1,0162$

$K_y = 0,98$

$K_{sch} = 1$ (VHM-Schneidstoff)

$K_{ver} = 1$ (Neues Werkzeug)

$K = 0,9959$

$$F_c = 0,9959 \cdot 0,5 \text{ mm} \cdot 0,1 \text{ mm}^{(1-0,21)} \cdot 2350 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 30,77 \text{ N}$$

Aufgrund die inhomogene Spanabtragung wird die mittlere Spandicke genommen.

$h_m = 0,006366 \text{ mm}$

Sodass die mittlere Schnittkraft

$F_{cm} = 21,543 \text{ mm}$ ergibt

Das Zeitspanvolumen beträgt $Q = 429,75 \text{ cm}^3/\text{min}$

6.2 NC-Programmierung

Der endgültige Programmcode mit den angepassten Parametern wird in Anhang 1 dargestellt. Aus diesem geht hervor, dass die Vorschubgeschwindigkeit auf 330 mm/min für das Eintauchen und damit 75% des Bearbeitungsvorschubes eingestellt wird. Weiterhin geht anhand der Zeile N80 hervor, dass der Fräser nach dem Eilgang in einer Höhe von z=1 mm über dem Werkstück steht und der Startpunkt auf der x-Achse bei 35,795 mm liegt. Aufgrund der Schnitttiefe von 0,25 mm ergibt sich ein Eintauchweg von 31,795, wobei die Länge des Weges, in der Abgetragen wird, etwa 7,159 mm beträgt.

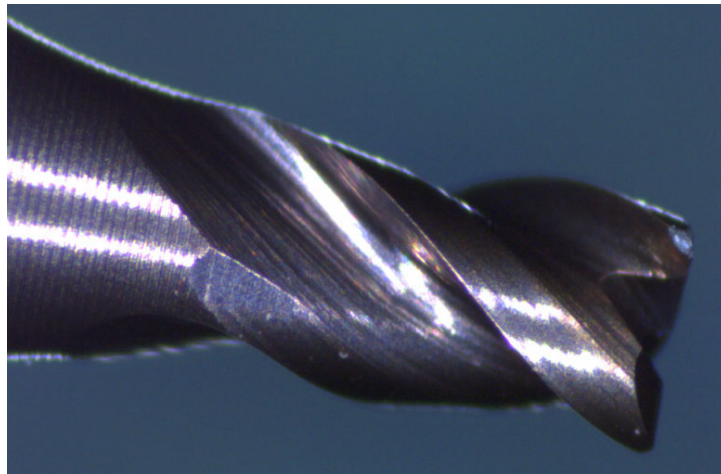
N10	Programmkopf	G512 Quader
N20		
N30	T = "XY 1mm"	
N40	m6	
N50	s18470 m3 g94 f440	
N60	m85	
N70	trans x0 y0 z0	
N80	g0 x35.795 y54 z1	
N90	g94 f330 s18470 m3	
N100	g1 x4 z-0.25	
N110	g94 f440 s18470 m3	
N120	Kontur	111
N130	Bahnfräsen	T=XY 1mm F=0.008/Z S=18470U Z0=0 Z1=-0.25
N140	trans x0 y0 z0	
N150	g0 x35.795 y54 z1	
N160	g94 f330 s18470 m3	
N170	g1 x4 z-0.5	
N180	g94 f440 s18470 m3	
N190	Kontur	222
N200	Bahnfräsen	T=XY 1mm F=0.008/Z S=18470U Z0=-0.25 Z1=-0.5
N210		
END	Programmende	

Darstellung 1: NC-Programmierung

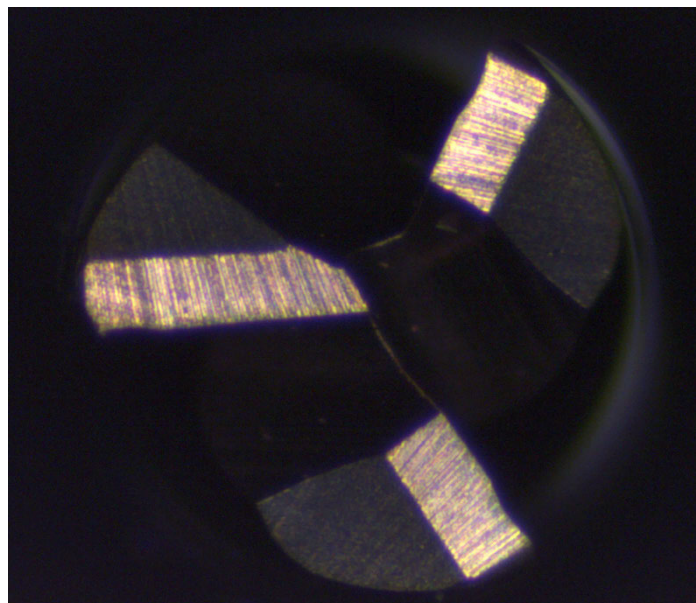
Auch kann anhand der beiden vorhandenen Konturzeilen und der Parameter in den N130 und N200 erkannt werden, dass die Kontur 111 einmal mit einem Abtrag von 0,25 mm erfährt und die Kontur 222 auch, jedoch erst, nachdem die Kontur 111 0,25 mm tiefe Nuten gefräst habe.

6.3 Fräserzustand vor der Nutzung

Im Folgenden wird die Ansicht des Schneidkopfes und die Ansicht aus der Seite gezeigt, die unter einem Mikroskop aufgenommen werden. Da auch unter dem Mikroskop keine Unterschiede zwischen den Fräswerkzeugen hinsichtlich Schneidkantenqualität oder Lunken und Risse identifiziert werden kann, wird der Fräser 1 dargestellt.



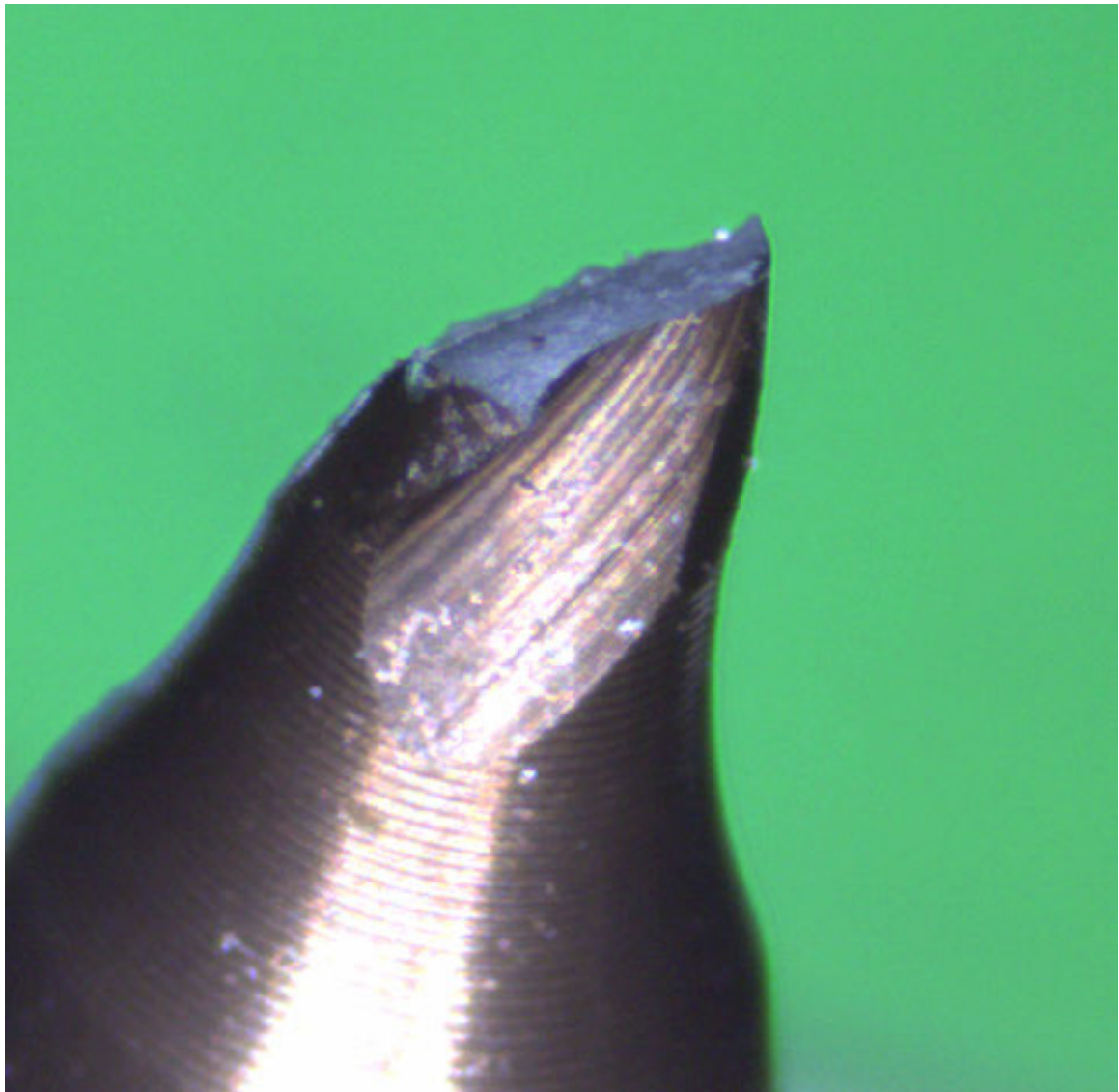
Darstellung 2: Fräser mit unsymmetrischem Schneiden



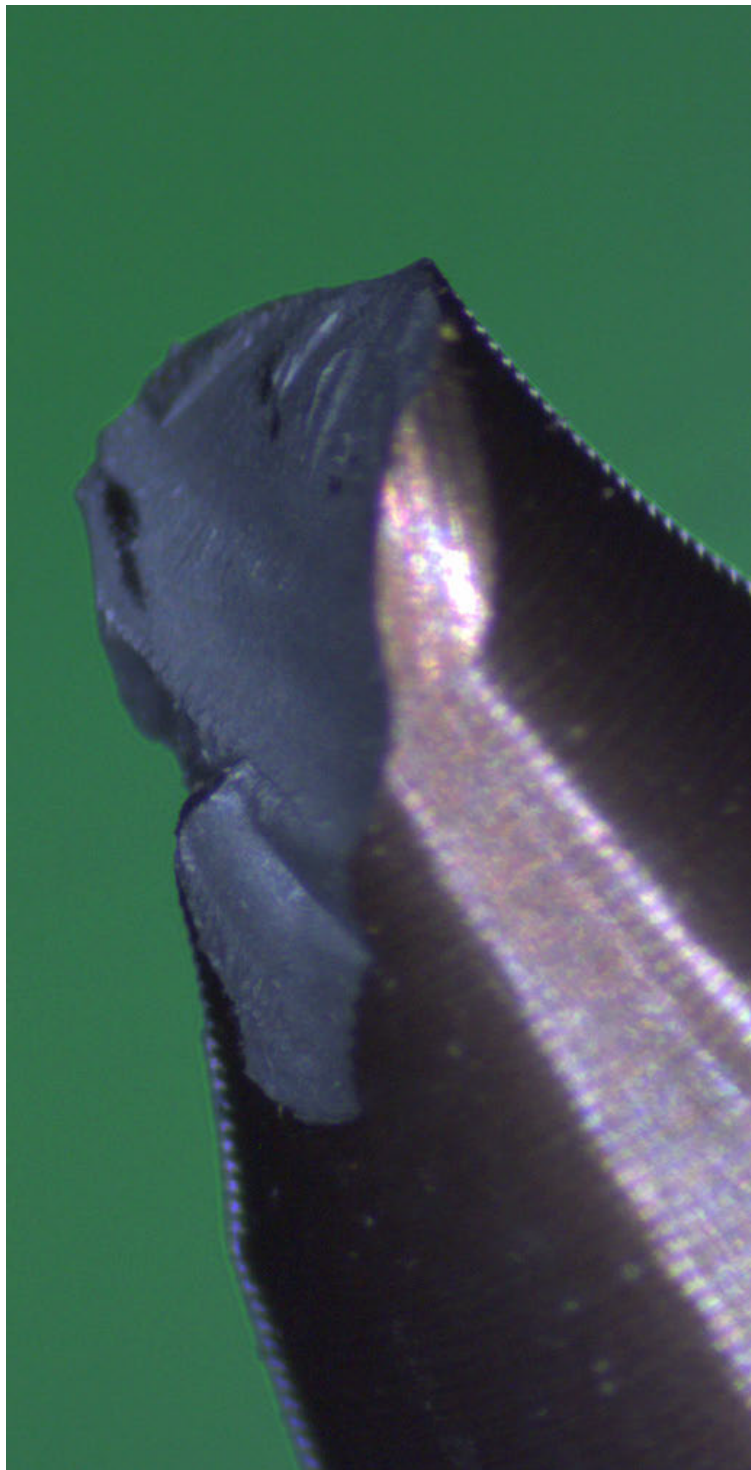
Darstellung 3: Seitenansicht des Fräasers

6.4 Fräswerkzeuge nach der Nutzung

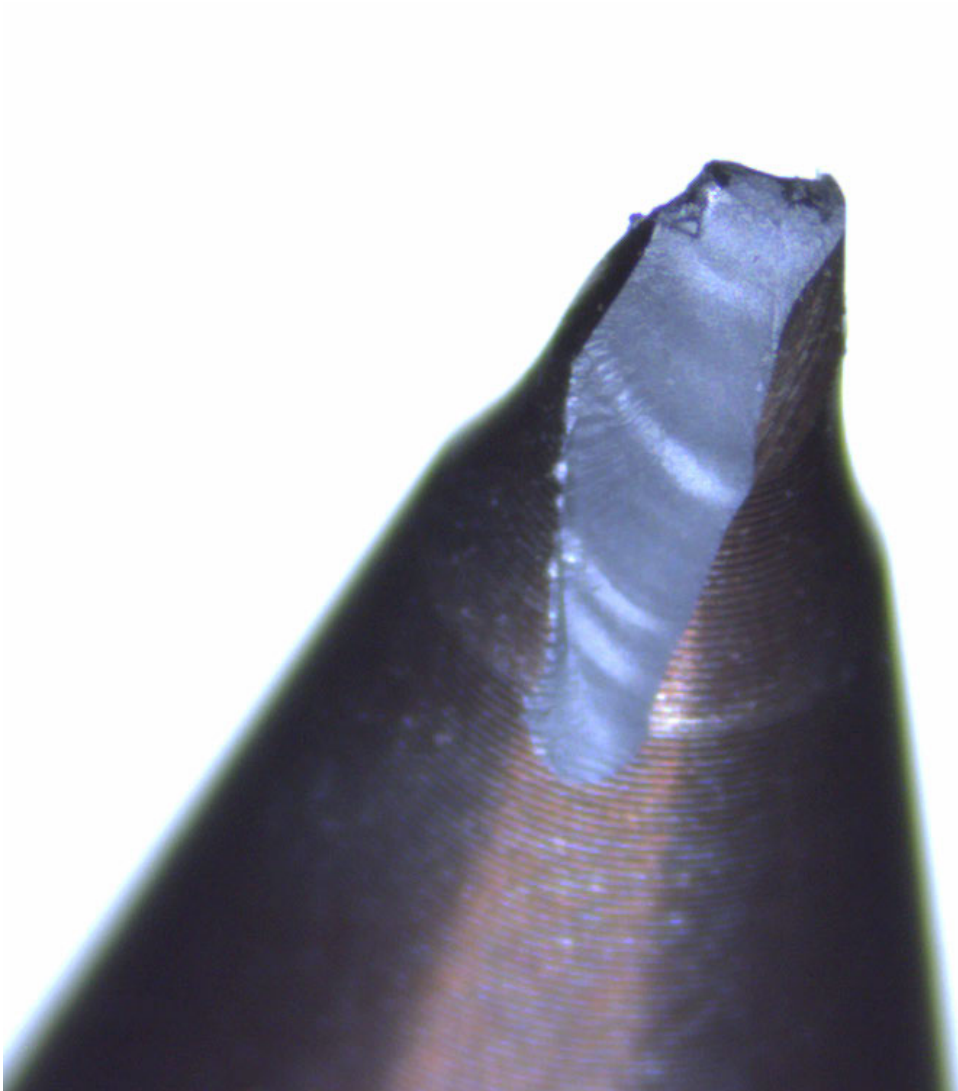
In den kommenden Abbildungen sind nur die Fräser 1, 2, 3, 7 und 8 dargestellt, da die Fräser 1 und 2 schon die Ergebnisse des Werkzeugbruches liefern und die anderen Fräser, die schon durch das Hineinfahren in das Werkstück sich nicht wesentlich von diesen beiden Fräsern unterscheiden.



Darstellung 4: Scherbruch des Fräasers 1



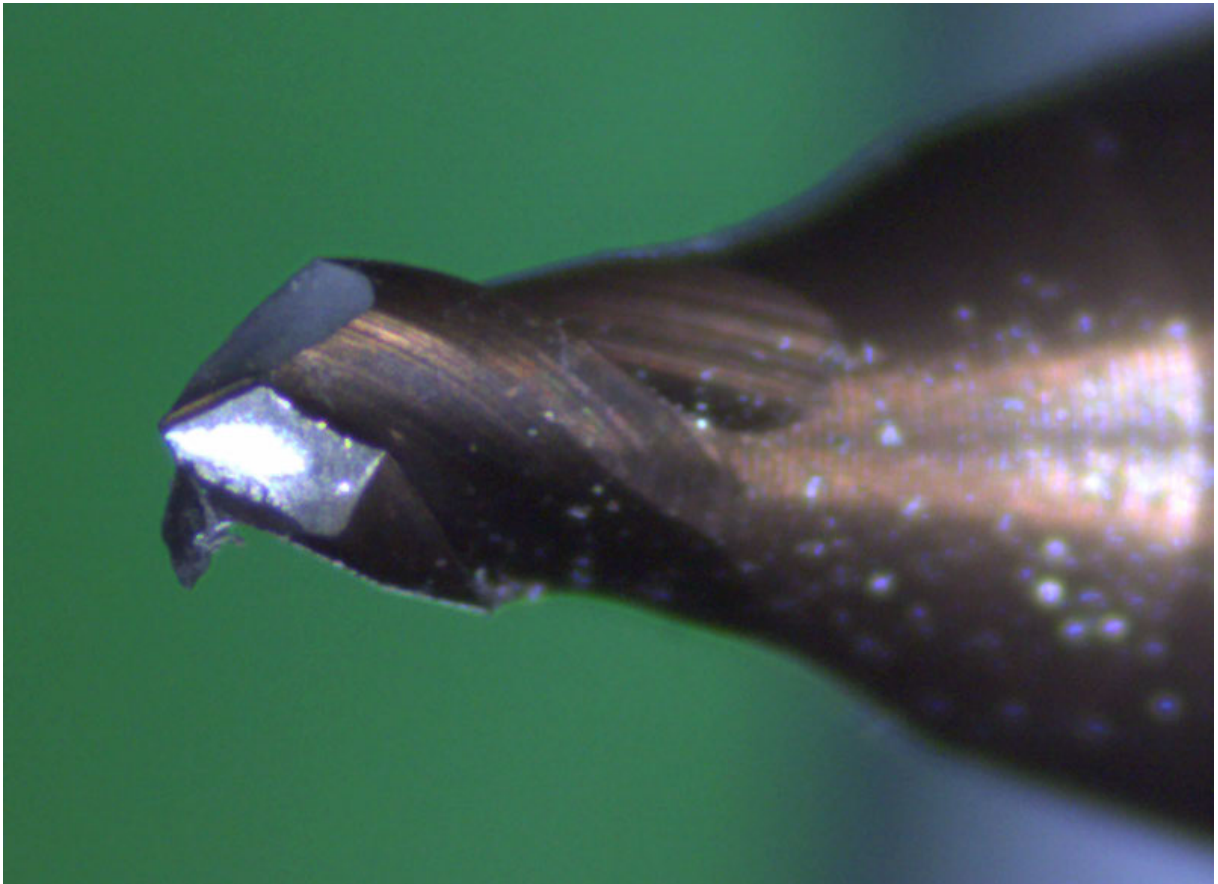
Darstellung 5: Scherbruch des Fräsers 2



Darstellung 6: Bruch des Fräsers 3



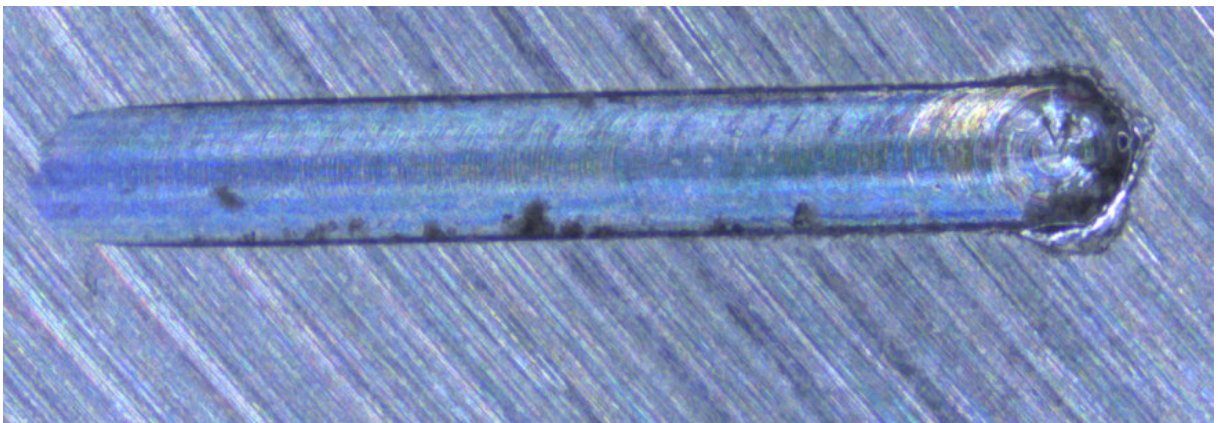
Darstellung 7: Werkzeugverschleiß des Fräsers 7



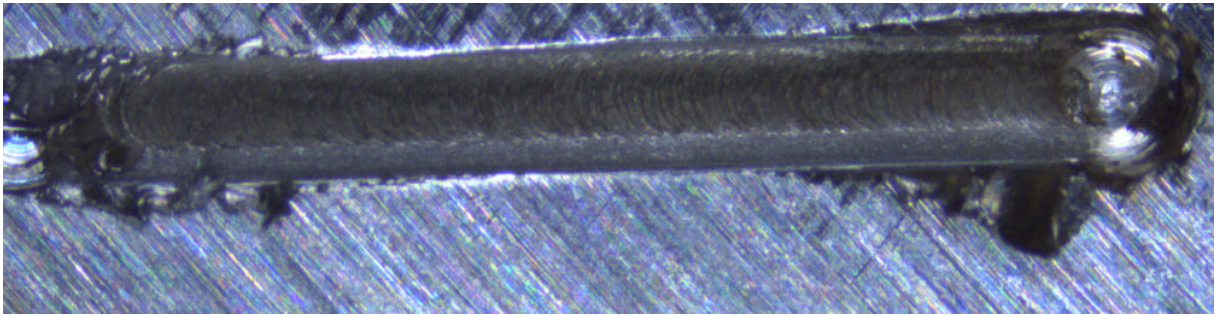
Darstellung 8: Schneidkopf des Fräasers 8 nach der Flowfieldherstellung

6.5 Werkstücke nach dem Prozess

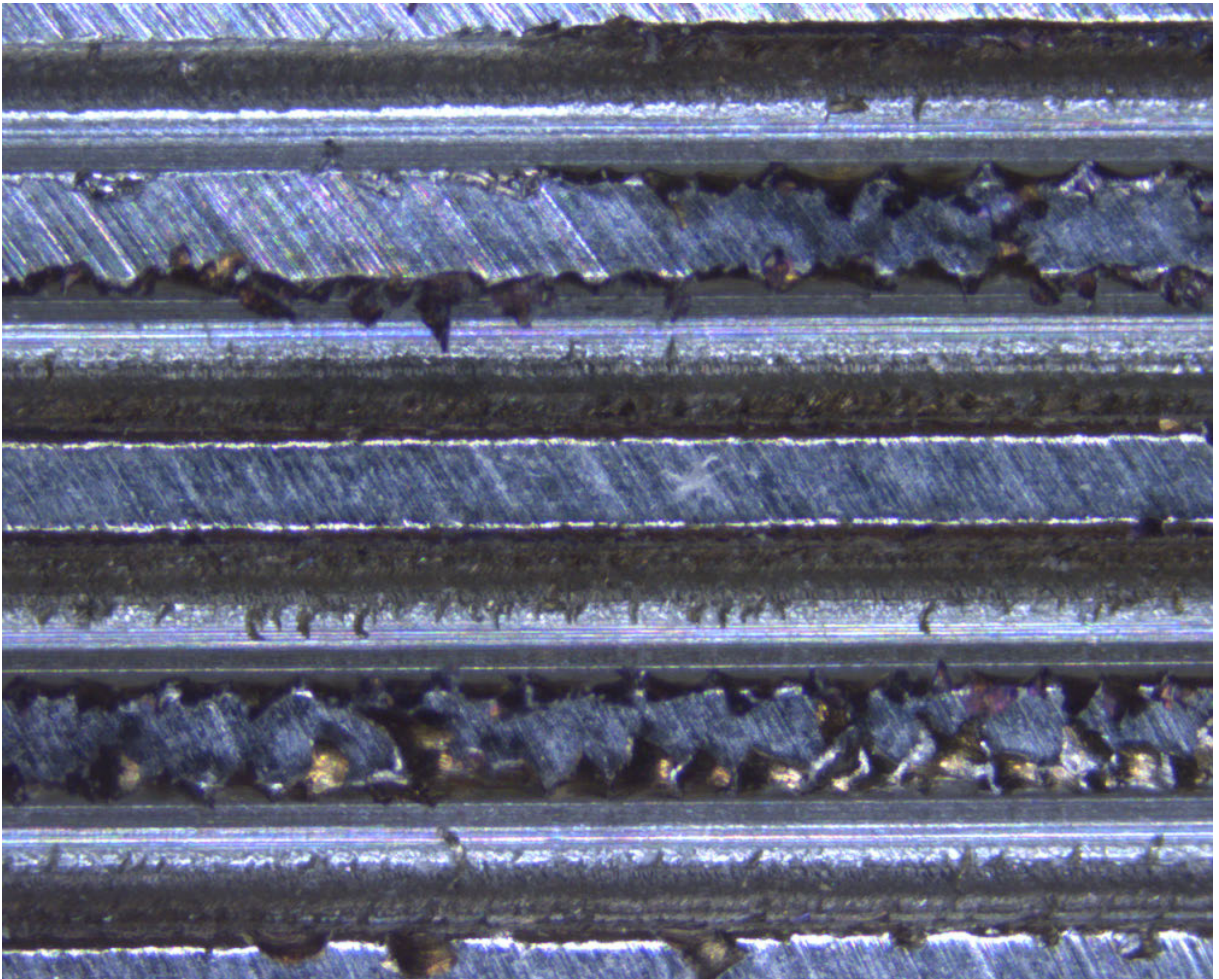
In den folgenden Abbildungen wird nur ein Abschnitt der Werkzeuge, welches unter dem Mikroskop aufgenommen wird und nur diese die mit den Fräsern, die in 6.4 erwähnt werden, gezeigt.



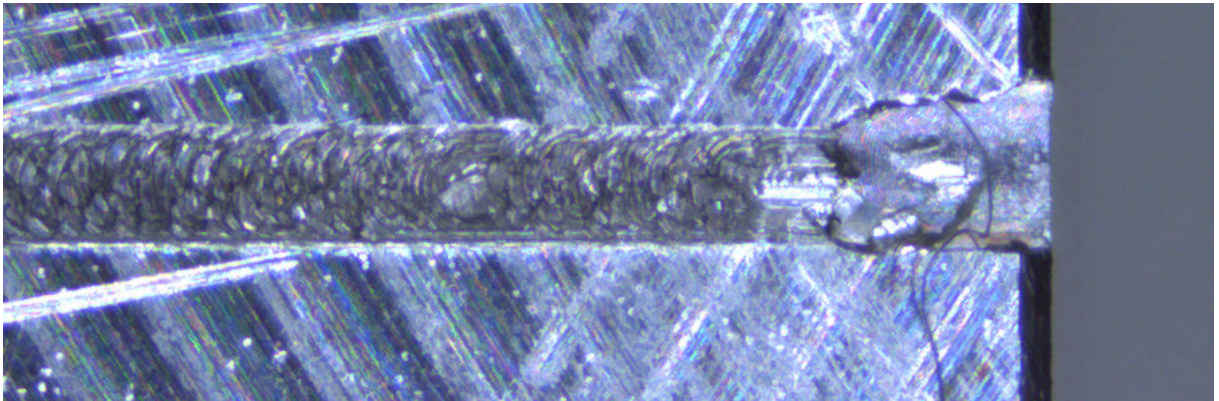
Darstellung 9: Nut des Eintauchweges des Fräasers 1



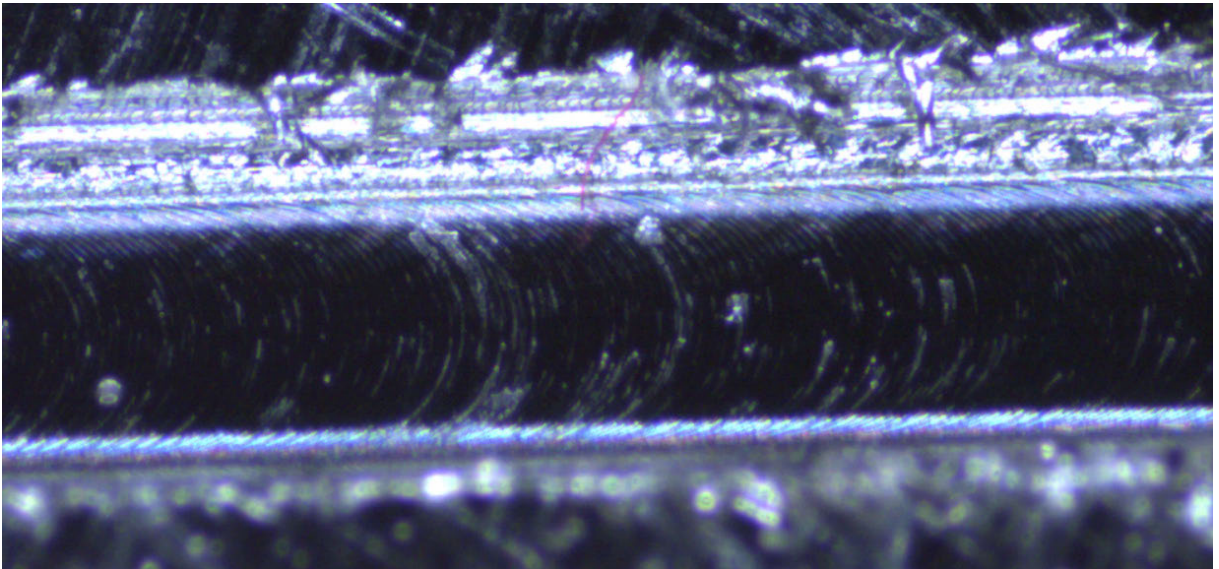
Darstellung 10: Nut des Bearbeitungsweges des Fräfers 2



Darstellung 11: Nutstrukturen des Fräfers 3



Darstellung 13: Nut erzeugt durch den Fräser 7



Darstellung 12: Schnittkantenansicht vom Flowfield des Fräasers 8



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: 

Vorname: 

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Zerspanende Herstellung von Bipolarplatten-Prototypen für mobile PEM-Brennstoffzellen

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:



Ort



Datum

Unterschrift im Original