Schlussbericht

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die

Otto von Guericke

geförderten Forschungsvorhaben 15511N

Entwicklung eines neuen Verfahrens für die kostengünstige Fertigung von Bipolarplatten mit Hilfe galvanogeformter Spritzgusswerkzeuge

Forschungsstelle 1: Forschungsinstitut Edelmetalle & Metallchemie (fem) Katharinenstr. 17 73525 Schwäbisch Gmünd	**Wissenschaftliche Bearbeitung:** Dipl.-Ing. (FH) Nadja Esswein **Projektleitung:** Dipl.-Ing. (FH) Alexander Pfund

Forschungsstelle 2: Zentrum für BrennstoffzellenTechnik ZBT gGmbH Carl-Benz-Str. 201 47057 Duisburg	**Wissenschaftliche Bearbeitung:** Dipl.-Ing. Sebastian Brokamp Dr.-Ing. Can Kreuz M. Sc. Evren Firat **Projektleitung:** Dipl.-Chem. Thorsten Derieth

Forschungsstelle 3: Institut für Produkt Engineering (IPE) Universität Duisburg-Essen Lotharstr. 1 47057 Duisburg	**Wissenschaftliche Bearbeitung:** Dipl.-Ing. Oliver Baier Dipl.-Ing. oec. Jan-Peter Derrer **Projektleitung:** Dipl.-Ing. Jan Sehrt

Schwäbisch Gmünd und Duisburg, August 2010

Inhalt

1 Zusammenfassung 4

2 Kurzfassung 5

2.1 Projektidee und Zielsetzung 5

2.2 Zuordnung von Kompetenzen und Übersicht der Aufgaben 6

2.3 Abschlussbeurteilung über den Erfolg des Projektes: 7

3 Anwendung der generativen Fertigungsverfahren (Rapid-Technologien) 9

3.1 Design der Bipolarplatten 11

3.2 Übertragung auf RP-Positiv-Werkstoffe 13

3.3 Beschichtungsfähigkeit 18

3.4 Bau erster Prototypen 19

Optimierung der Oberflächenqualität 21

3.5 Weiterentwicklung/Optimierung 24

4 Galvanoformungsprozess 26

4.1 Untersuchung der Beschichtungsfähigkeit der RP-Testkörper 26

4.1.1 Untersuchte Methoden zum Aufbringen einer leitfähigen Startschicht 27

Bekeimung (Aktivierung) 27

4.1.2 Elektrolyte zur Einebnung (galvanischer Schichtaufbau) 28

4.1.3 Arbeitsbedingungen der Elektrolyte 28

4.1.4 Untersuchungen an verschiedenen Testkörperwerkstoffen 29

4.1.5 Optimierung der Benetzungsfähigkeit der Polyamid-Testkörper 34

Optimierung der Oberflächenqualität der PA und PS - Testkörper 34

4.2 Optimierung der Trennschicht (Passivierung) 36

4.2.1 Funktion und Wirkungsweise der Trennschicht 36

4.2.2 Passivierungs-Lösungen 36

4.2.3 Untersuchung der Passivierungs-Lösungen 37

4.3 Galvanoformung 39

4.3.1 Verwendeter Elektrolyt 39

4.3.2 Versuchsaufbau 39

4.3.3 Optimierung der Stromdichteverteilung mit Hilfe von Blenden 40

4.3.4 Konstruierte Zellen für die Galvanoformung 42

4.3.5 Untersuchung inneren Spannungen 42

4.3.6 Untersuchungen der Bipolarplatten-Testkörper 43

5 Weiterentwicklung des Flowfield-Designs und Spritzgießprozess 47

5.1 Einleitung 47

5.2 Design der Bipolarplatten 47

5.3 Werkzeugaufnahme 49

5.4 Optimierung Oberflächenqualität 52

5.4.1 3D Messsystem Micro Prof TTV von FRT 53

5.4.2 Messungen an Testkörpern 53

5.4.3 Messungen an RP-Positiven in Originalgröße 54

5.4.4 Abgleich RP-Positiv Galvanoform 59

5.4.5 Mechanisches Richten 60

5.5 Galvanoform als Spritzgießwerkzeug 62

5.5.1 Spritzgießen mit Galvanoform 004 62

5.5.2 Spritzgießen mit Galvanoform 005 64

5.5.3 Spritzgießen mit Galvanoform 007 66

5.6 Qualitätssicherung der hergestellten Bipolarplatten 67
5.6.1 Elektrische Widerstände von BPHP aus Galvanoformen 67
5.6.2 3D-Vermessung von BPHP aus Galvanoformen 68
6 Gesamtprozess-Richtlinie 70
6.1 Designrichtlinien für die Bipolarplatte 70
6.2 Richtlinien zur Konstruktion der Galvanoform 70
6.3 Richtlinien zur Nachbearbeitung und Verwendung der Galvanoform 71
7 Ergebnisauswertung und Schlussfolgerung 72
8 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittelständische Unternehmen 73
8.1 Voraussichtliche Nutzung der Forschungsergebnisse 74
8.2 Möglichkeiten zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von KMU 74
8.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 75
9 Ergebnistransfer / Veröffentlichungen 76
10 Organisatorische Durchführung 77
10.1 Durchführenden Forschungsstellen 77
10.2 Projektbegleitender Ausschuss als Teil des Transferkonzepts 78
10.3 Verwendung der Zuwendung und Personaleinsatz 80
11 Literatur 81
12 Abbildungsverzeichnis 82
13 Tabellenverzeichnis 85

1 Zusammenfassung

Die Hauptzielsetzung des Vorhabens bestand in der Reduzierung der Herstellkosten eines Spritzgussformeinsatzes für die Fertigung von Bipolarplatten durch die Entwicklung eines neuen Herstellungsverfahrens, das die Möglichkeiten der generativen Fertigungsverfahren (auch bekannt als "Rapid Prototyping") mit der Galvanoformung kombiniert. Um den Prozess der Bipolarplattenfertigung durch Spritzgießen weiter zu optimieren und die bislang benötigten hohen Einspritzdrücke auf ein auf herkömmlichen Anlagensystemen zur Verfügung stehendes Maß zu reduzieren, ist ein potentieller Lösungsweg die Änderung des BPP-Designs. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten stellen diese Untersuchungen jedoch einen hohen Kostenfaktor dar, da mit der konventionellen Fertigung von Spritzgusseinsätzen durch Fräsen sehr hohe Herstellkosten verbunden sind. Die Vorgehensweise im neu entwickelten Herstellungsprozess für die Spritzgusseinsätze basiert auf einem 3D-Datenmodell, mit dem durch generative Fertigungsverfahren ein Positivmodell einer Bipolarplatte hergestellt wird. Das Modell wird zuerst mit einer elektrisch leitfähigen Startschicht und ggf. einer die Rauheit ausgleichenden Schicht als Ausgangsbasis für den galvanischen Aufbau versehen. Nach dem Aufbringen einer Trennschicht erfolgt der elektrolytische Schichtaufbau. Vom vorbehandelten RP-Träger getrennt, bildet die Galvanoform die Rohform des Standardspritzgussformeinsatzes, die abschließend durch geeignete Nachbearbeitungsverfahren auf ihre Verwendung beim Spritzgießen vorbereitet wird.
Die speziellen Kernkompetenzen der einzelnen Forschungsstellen ermöglichten eine strukturierte Vorgehensweise zur erfolgreichen Bearbeitung des Projekts. An Forschungsstelle 3 (IPE) konnte diejenige Werkstoff- und Verfahrensauswahl getroffen werden, die das höchste Potential für das Projekt aufweist. Über eine Betrachtung der einzelnen Prozessschritte wurde außerdem der potentielle wirtschaftliche Vorteil (Durchlaufzeiten, Herstellkosten) herausgestellt. Darüber hinaus zeigte Forschungsstelle 1 (fem), dass sich eine Vielzahl von generativ hergestellten RP-Trägern galvanisch beschichten lässt. Dabei wurde über eine aufwändige Dokumentation der Ergebnisse ein Wissensstamm aufgebaut, der für zukünftige Kombinationen dieser Technologien von großer Bedeutung sein kann. An Forschungsstelle 2 (ZBT) konnten durch kontinuierliche Qualitätsüberwachung die Schwachstellen der Kombination von RP-Technologie und Galvanoformung aufgezeigt werden. Darüber hinaus wurden wichtige Erkenntnisse über das Spritzgussverhalten der auf diese Art hergestellten Spritzgussformeinsätze gewonnen. Weiterer Entwicklungsbedarf besteht jedoch noch bei der Qualität des RP-Positivs (Oberfläche, Maß- und Formhaltigkeit, Elektrolytbeständigkeit), der Herstellung einer leitfähigen Startschicht, der Einebnung der Oberflächenrauheit der RP-Träger, der Funktion der Trennschicht sowie dem Finishing der Galvanoform.
Die nach der neuen Verfahrenskette hergestellten Spritzgussformeinsätze und die daraus gefertigten, ersten Kleinserien weisen gegenwärtig ein im Vergleich zur konventionellen Herstellung niedrigeres Qualitätsniveau auf. In wie weit sich diese verminderte Qualität auf die Leistung einer Brennstoffzelle auswirkt, ist unklar, da noch kein systematischer Stackaufbau mit den neuen Bipolarplatten stattgefunden hat. Unter Berücksichtigung, dass es sich bei den generativen Fertigungsverfahren um relativ junge Technologien handelt, an deren Optimierung mit erhöhtem Aufwand geforscht wird, sind Qualitätssteigerungen in naher Zukunft zu erwarten. Insgesamt konnte die technische Machbarkeit der neuartigen Prozesskette bewiesen werden, auch wenn bezüglich der Qualität der Spritzgussformeinsätze und der Bipolarplatten noch ein Verbesserungspotential besteht. Die wirtschaftlichen Überlegungen zeigen, dass Kosten- und Zeitvorteile zu erwarten sind.
Das Ziel des Vorhabens wurde somit erreicht.

2 Kurzfassung

2.1 Projektidee und Zielsetzung

Ausgangsbasis für das Zustandekommen dieses Projektes ist der starke Wandel auf dem Gebiet der Brennstoffzellentechnik. Kleinere und leistungsfähigere Systemlösungen wecken gegenwärtig das Interesse verschiedener Branchen (z.B. Automobilindustrie, Informations- und Kommunikationstechnologie, Flugzeugbau, etc.). Dementsprechend kann ein mittelfristig stark ansteigender Bedarf nach Brennstoffzellen prognostiziert werden. Hersteller von Brennstoffzellen müssen sich deshalb frühzeitig mit Massenproduktionstechniken auseinandersetzen um diesen erhöhten Bedarf unter wirtschaftlichen Aspekten bedienen zu können.

Abbildung 2.1: Spritzgegossene Bipolarplatte einer PEM-Brennstoffzelle (rechts: Flowfieldstruktur) [Quelle: ZBT, Duisburg]

Am Zentrum für BrennstoffzellenTechnik (ZBT) in Duisburg wurde zu diesem Zweck ein Test, Applikations- und Assemblierungszentrum (TAZ) etabliert, welches sich mit der Automatisierung von Massenproduktionstechniken befasst. Ein wesentlicher Erfolg der hier konzentrierten Aktivitäten ist das Substituieren der konventionellen Herstellung (Fräsen) von Bipolarplatten (BPP) durch die Spritzgusstechnik mit Hilfe eines speziellen Graphit-Compounds. BPP (Abbildung 2.1) sind ein wichtiges Element einer Brennstoffzelle. Sie übernehmen mit ihrer feinen Nutstruktur (Flowfield) die Funktion der Verteilung der Reaktionsmedien (Wasserstoff und Luftsauerstoff) auf der Membran, sowie der Abfuhr des entstandenen Produktes (Wasser).

Nach der Führung des Nachweises der technischen Machbarkeit von spritzgegossenen BPP ist es das gegenwärtige Bestreben des ZBT diesen Prozess weiter zu optimieren. Insbesondere gilt es die bislang benötigten hohen Einspritzdrücke auf ein auf herkömmlichen Anlagensystemen zur Verfügung stehendes Maß zu reduzieren. Ein potentieller Lösungsweg ist die Änderung des BPP-Designs, vor Allem die Änderung der Flowfield-Geometrie. Neben Simulationen des Einspritzvorgangs im Spritzgussprozess ist es dabei jedoch zwingend erforderlich die geänderte Plattengeometrie im Echtbetrieb der Brennstoffzelle zu testen, damit Rückschlüsse auf die bislang nicht simulierbare Leistungsfähigkeit gewonnen werden können. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten stellen diese Untersuchungen jedoch einen vielfach zu hohen Kostenfaktor dar, da mit der konventionellen Fertigung von Standardspritzgusseinsätzen sehr hohe Herstellkosten verbunden sind.

Daraus resultiert die Hauptzielsetzung des o.g. Projektes:

- Reduzierung der Herstellkosten eines Standardspritzgussformeinsatzes für die BPP

Im o.g. Projekt wurde zur Reduzierung der Herstellkosten die Idee einer neuartigen Verfahrenskombination untersucht. Diese Kombination besteht aus generativen Fertigungsverfahren (auch bekannt als „Rapid Prototyping“), der galvanischen Abformung und der Anwendung konventioneller Verfahren zur Nachbearbeitung. Veranschaulicht wird die Projektidee in Abbildung 2.2 und Abbildung 2.3.

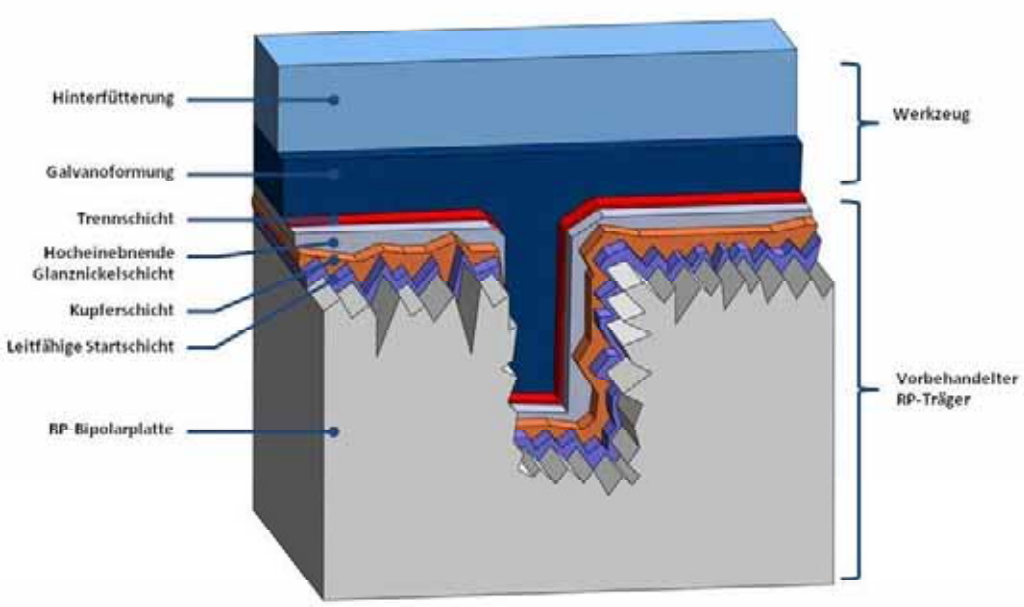


Abbildung 2.2: Exemplarische Darstellung der Abformung eines Standardspritzgussformeinsatzes im Rahmen der Projektidee

Auf Basis eines 3D-Datenmodells wird durch generative Fertigungsverfahren ein Positivmodell einer BPP hergestellt. Das Modell wird zuerst mit einer elektrisch leitfähigen Startschicht versehen, um mit einem galvanischen Aufbau beginnen zu können. Wegen der Rauheit des RP-Ausgangsmaterials bei einigen RP-Modellen wird ein galvanischer Aufbau erzeugt, der die optimale Oberfläche für die spätere Galvanoformung darstellt. Danach erfolgen das Aufbringen/Erzeugen einer Trennschicht und die Galvanoformung. Vom vorbehandelten RP-Träger getrennt, bildet die Galvanoform die Rohform des Standardspritzgussformeinsatzes. Diese wird abschließend durch geeignete Nachbearbeitungsverfahren auf ihre Verwendung vorbereitet.

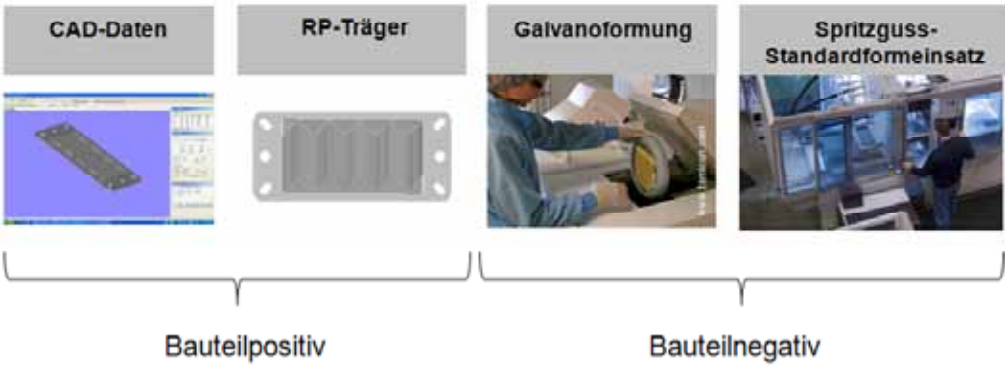


Abbildung 2.3: Prozesskette der neuartigen Verfahrenskombination

2.2 Zuordnung von Kompetenzen und Übersicht der Aufgaben

Die für eine optimale Durchführung des Projektes auszuführenden Tätigkeiten wurden nach Kernkompetenzen der kooperierenden Forschungsstellen aufgeteilt und sind der Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Tabelle 2.1: Auszuführende Tätigkeiten der kooperierenden Forschungsstellen

FS 1	**fem – Forschungsinstitut für Edelmetalle und Metallchemie - Galvanoformung -**
Tätigkeitsfeld	▪ Beschichtungsfähigkeit (Fokus: Leitfähige Startschicht) ▪ Optimierung der Oberflächenqualität (Fokus: Einebnende galv. Schichten) ▪ Optimierung der Trennschicht ▪ Galvanoformung ▪ Weiterentwicklung u. Optimierung ▪ Gesamtprozess-Richtlinie ▪ Koordination ▪ Berichterstellung und Veröffentlichung
FS 2	**ZBT – Zentrum für Brennstoffzellentechnik - Brennstoffzellentechnik / konv. Nachbearbeitungsverfahren / Spritzguss -**
Tätigkeitsfeld	▪ Design der Bipolarplatten (Fokus: Funktion Brennstoffzelle / Spritzguss) ▪ Optimierung der Oberflächenqualität (Fokus: Dokumentation von Qualitätsabweichungen) ▪ Werkzeugaufnahme ▪ Galvanoform als Spritzgusswerkzeug ▪ Weiterentwicklung u. Optimierung ▪ Gesamtprozess-Richtlinie ▪ Koordination ▪ Berichterstellung und Veröffentlichung
FS 3	**Institut für Produkt Engineering - Generative Fertigungsverfahren / Wirtschaftlichkeitsbetrachtung -**
Tätigkeitsfeld	▪ Design der Bipolarplatten (Fokus: RP-gerechte Konstruktion) ▪ Übertragung auf RP-Positiv-Werkstoffe (Fokus: Prozessoptimierung) ▪ Beschichtungsfähigkeit (Fokus: Werkstoffforschung) ▪ Bau erster Prototypen ▪ Optimierung Oberflächenqualität (Fokus: Bauteilfinish am RP-Träger) ▪ Weiterentwicklung u. Optimierung ▪ Gesamtprozess-Richtlinie ▪ Koordination ▪ Berichterstellung und Veröffentlichung

2.3 Abschlussbeurteilung über den Erfolg des Projektes:

Durch die leistungsstarke Einbringung der Kooperationspartner und die interdisziplinäre Arbeitsweise, konnte die technische Machbarkeit der angedachten, neuartigen Prozesskette bewiesen werden. Darüber hinaus stellte sich auch heraus, dass diese Prozesskette gegenüber der konventionellen Herstellung von Standardspritzgussformeinsätzen ein hohes Potential zur Einsparung von Kosten bietet.
Insbesondere die speziellen Kernkompetenzen der einzelnen Forschungsstellen ermöglichten eine strukturierte Vorgehensweise bei der Erarbeitung anwendungsspezifischen Wissens. An Forschungsstelle 3 (IPE) konnte in Abstimmung mit den anderen Forschungsstellen diejenige Werkstoff- und Verfahrensauswahl getroffen werden, die das höchste Potential für das Projekt aufweist. Über eine Betrachtung der einzelnen Prozessschritte wurde außerdem der potentielle, wirtschaftliche Vorteil (Durchlaufzei-

ten, Herstellkosten) herausgestellt. Darüber hinaus zeigte Forschungsstelle 1 (fem), dass sich eine Vielzahl von generativ hergestellten RP-Trägern galvanisch beschichten lässt. Dabei wurde über eine aufwändige Dokumentation der Ergebnisse ein Wissensstamm aufgebaut, der für zukünftige Kombinationen dieser Technologien von großer Bedeutung sein kann. An Forschungsstelle 2 (ZBT) konnten durch kontinuierliche Qualitätsüberwachung die Schwachstellen der Kombination von RP-Technologie und Galvanoformung aufgezeigt werden. Darüber hinaus wurden wichtige Erkenntnisse über das Spritzgussverhalten der auf diese Art hergestellten Standardspritzgussformeinsätze gewonnen.
Neben den Erfolgen der Kooperation müssen jedoch auch Aspekte genannt werden, bei denen ein weiterer Entwicklungsbedarf besteht. Diese resultieren in erster Linie aus der unter Spritzgusskriterien als minderwertig zu bezeichnenden Qualität der RP-Bauteile.

- Qualität des RP-Positivs (Oberfläche, Maß- und Formhaltigkeit, Elektrolytbeständigkeit)
- Herstellung einer leitfähigen Startschicht
- Einebnung der Oberflächenrauheit der RP-Träger
- Funktion der Trennschicht
- Finishing der Galvanoform

Die nach der neuen Verfahrenskette hergestellten Spritzgussformeinsätze weisen gegenwärtig ein im Vergleich zur konventionellen Herstellung niedrigeres Qualitätsniveau auf. Auch die ersten Kleinserien, die mit den hergestellten Einsätzen produziert wurden zeigen vereinzelte Mängel. Fraglich ist, in wie weit sich diese verminderte Qualität auf die Leistung einer Brennstoffzelle auswirkt. Unter Berücksichtigung, dass es sich bei den generativen Fertigungsverfahren um relativ junge Technologien handelt, an deren Optimierung mit erhöhtem Aufwand geforscht wird, sind Qualitätssteigerungen in naher Zukunft zu erwarten. Neben den Kosten- und Zeitvorteilen kann demnach auch eine Verbesserung der Qualität prognostiziert werden.
Fazit:

- Technische Machbarkeit der neuartigen Prozesskette bewiesen
- Qualität der Spritzgussformeinsätze und der BPP derzeit unter dem Niveau herkömmlich hergestellter Einsätze und damit produzierten BPP, jedoch mit weiterem Verbesserungspotential
- Hohe Kosten- und Zeitvorteile zu erwarten

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

3 Anwendung der generativen Fertigungsverfahren (Rapid-Technologien)

Die Herstellung der BPP Modelle, die im späteren Schritt galvanisiert werden sollen, erfolgt über generative Fertigungsverfahren. Im Gegensatz zu subtraktiven Verfahren, wie zum Beispiel dem Drehen oder Fräsen, bei denen Material vom Ausgangswerkstück abgetragen wird, entstehen Bauteile hier additiv, durch Erstellen und Verbinden einzelner Schichten bzw. das inkrementelle Aneinanderfügen von Material zu den aufeinanderfolgenden Schichten. Die Prozesse benötigen hierzu weder spanende noch umformende Werkzeuge. Zum gesamten Fertigungsablauf gehören neben dem eigentlichen generativen Aufbau auch die Prozessvorbereitung und -nachbearbeitung. Schematisch sind die Abläufe in Abbildung 3.1 dargestellt.

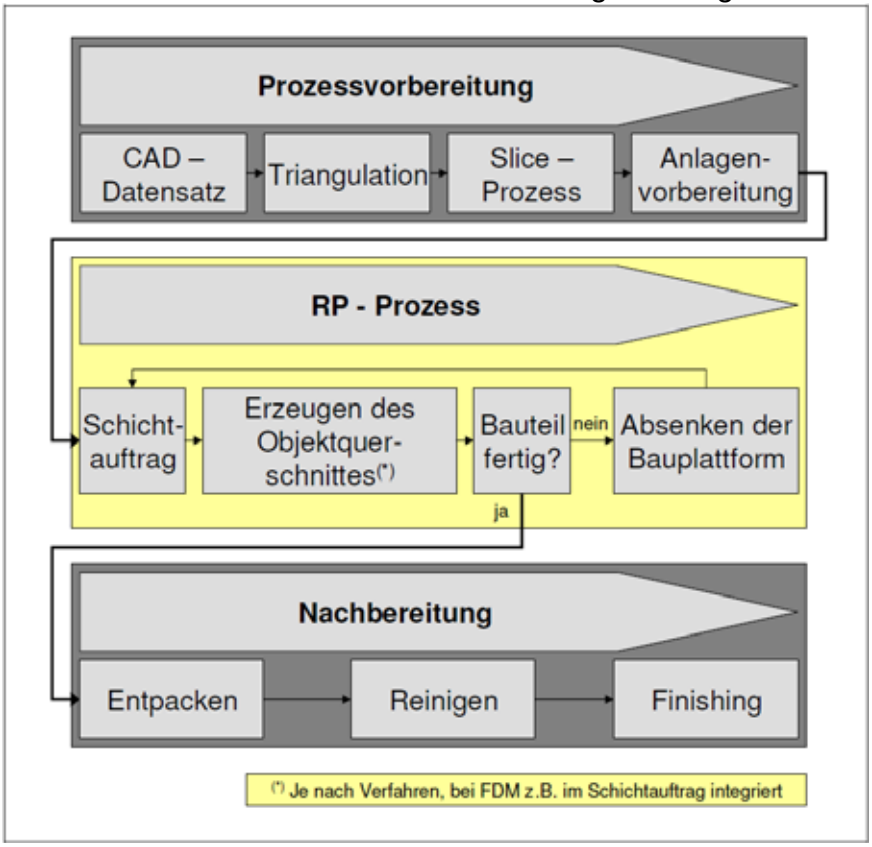


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Prozesskette generativer Verfahren

Nach VDI – Richtlinie 3404 werden 10 verschiedene generative Fertigungsverfahren unterschieden. Unterschiede liegen vorwiegend in der Art des Ausgangsmaterials bzw. der Erzeugung der Schichten. Während der Durchführung des Projektes kamen verschiedene Verfahren zum Einsatz, welche in Tabelle 3.1 gegenübergestellt sind.

Tabelle 3.1: Generative Verfahren nach VDI 3404 [3]

Verfahren	Bauprozess	Material	Bindungsmechanismus	Aktivierungsenergie
Laser-Sintern (LS)	Pulverförmiges Material wird schichtweise aufgetragen, wobei jede Schicht durch lokales Einbringen von Energie über einen Laser an Objektquerschnittstellen versintert wird (lokal durch Umlenken und Fokussieren der Laserstrahlen)	Pulverförmig: Hochpolymere, Metalllegierungen, Keramik mit oder ohne Füllstoff bzw. Binder z.B.: Polyamid, Polystyrol	Thermisch	Wärmestrahlung durch Laser und Strahler
Multi-Jet Modeling (MJM)	Thermoplastisches Material wird aufgeschmolzen und durch beheizte Düsen schichtweise aufgetragen; unmittelbar nach dem Auftrag härtet das Material aus	Granulierte Hochpolymere (Wachs) z.B.: TJ88, VisijetSR200	Thermisch	Wärmeleitung in Druckköpfen zum Erwärmen/ Verflüssigen des Ausgangsmaterial
Stereolithographie (SL)	Flüssiges Photopolymer-Kunstharz wird schichtweise durch Laser lokal an den Objektquerschnittstellen verfestigt (lokal durch Umlenken und Fokussieren der Laserstrahlen)	Flüssig bis pastös: Kunstharze ohne und mit Füllstoffen z.B.: Accugen 100, WC Ultra	Chemisch	UV – Strahlung von Lasern und Lampen
Digital Light Processing (DLP)	Flüssiges Photopolymer-Kunstharz wird schichtweise lokal an den Objektquerschnittstellen verfestigt (lokal durch Lichtmaske)	Flüssig bis pastös: Kunstharze ohne und mit Füllstoffen z.B.: Envisiontec – RCP30, Envisiontec – R11	Chemisch	Gezielte Strahlenquelle
Poly Jet Modelling (PJM)	Photopolymer-Flüssigharz wird linienweise aufgetragen und nach dem Auftrag durch UV-Strahler ausgehärtet	Flüssig/breiförmig: zwei unterschiedliche Polymergemische z.B.: VeroBlue, VeroBlack	Thermisch/ chemisch	Wärmeleitung in Druckköpfen zum Verflüssigen und UV-Strahlung zum Aushärten
Fused Layer Modeling (FDM)	Thermoplastisches Material wird durch beheizte Düse aufgeschmolzen, lokal Aufgetragen und härtet unmittelbar nach dem Auftrag aus	Strang- oder fadenförmig: ein oder zwei unterschiedliche Hochpolymere (Bauteil- und Stützmaterial) z.B.: ABS	Thermisch	Wärmeleitung in Düsen zum Erwärmen bzw. Verflüssigen des Materials

3.1 Design der Bipolarplatten

Den generellen Aufbau einer aktuellen Bipolarplatte zeigt Abbildung 3.2. Die Draufsicht zeigt die diffizile Nutstruktur des Flowfields, die Gasführungs- und Reservebohrungen. In der Schnittdarstellung ist auf der Oberseite die Geometrie der Nutstrukturen und auf der Unterseite die Geometrie der Kühlrippen zu sehen. Im Projekt wurde beschlossen, die Kühlstruktur nicht zu variieren und hierfür im weiteren Verlauf die bereits existierende, konventionell hergestellte Spritzgussformhälfte zu verwenden. Außerdem sollte nach Absprache zunächst das bislang eingesetzte BPP–Design für die Abformung der Flowfieldseite eingesetzt werden.

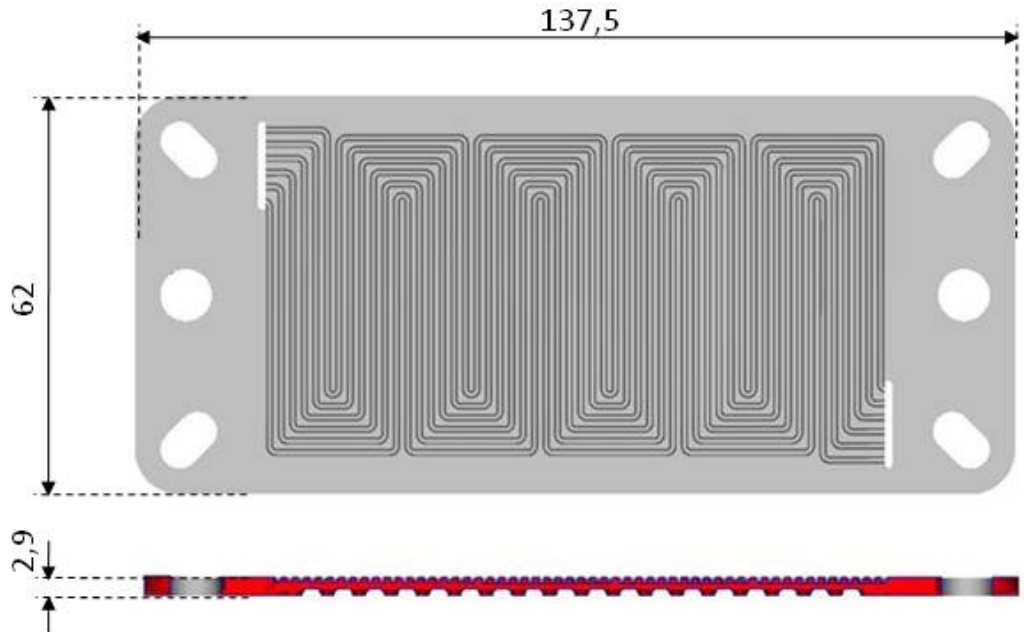


Abbildung 3.2: Oben: Draufsicht auf Flowfieldstruktur einer BPP (137,5x62x2,9mm); Unten: Schnitt durch die BPP

Nach ersten generativen Herstellungsprozessen mittels Lasersintern und dem Abscheiden von Kupfer auf diesen Testkörpern zeigten sich jedoch Nachteile der Geometrie für Forschungsaktivitäten. Insbesondere die große Abmessung der BPP führte zu Problemen bei der Herstellung von Schliffproben, sodass die Testkörper nach dem galvanischen Prozess zunächst auf Maß zersägt werden mussten. Außerdem wurde festgestellt, dass die notwendige Maßhaltigkeit der Position der äußeren Bohrungen mit gemessenen +/-0,3 mm überschritten wurde. Weitere Probleme stellten sich bei der Abbildungsgenauigkeit der Nutgeometrie ein (Abbildung 3.3). Insgesamt konnte jedoch bereits in diesem frühen Stadium gezeigt werden, dass eine grundsätzliche galvanische Beschichtung der PA-Bauteile möglich ist. Es wurde daher beschlossen mit der Verwendung des Lasersinterns mit dem Werkstoff Polyamid fortzufahren. Auch wenn bis zu diesem Zeitpunkt, bedingt durch die Nutgeometrie und die hohe Oberflächenrauheit an den RP-Bauteilen, keine vollständig homogene und geschlossene Schicht abgeschieden werden konnte (Abbildung 3.4).

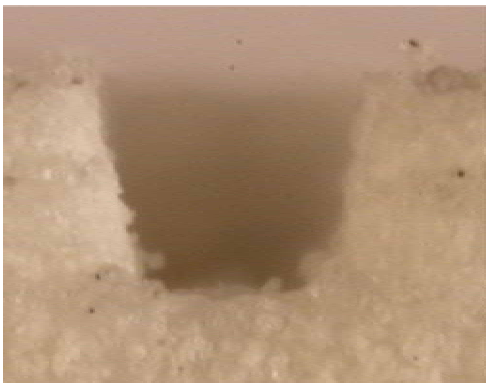


Abbildung 3.3: Makroaufnahme einer Nut an TK1 aus PA

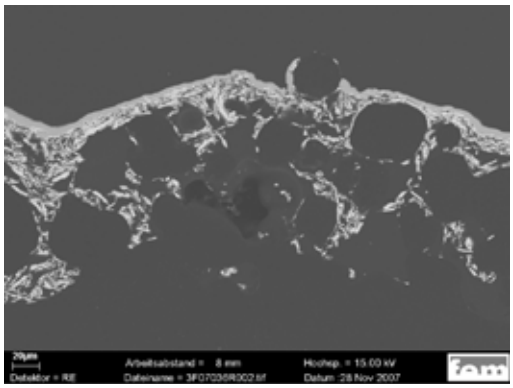


Abbildung 3.4: Galvanische Abscheidung auf RP-Träger aus PA

Für weitere Untersuchungen wurden allerdings alternative Testkörper konstruiert, welche die o.g. Probleme umgehen. So wurde die max. Abmessung auf 35x35mm festgelegt und ein Steg integriert, der das Benetzen mit der leitfähigen Startschicht erleichtert und außerdem der Positionsbestimmung dient. Der Untersuchung der fehlenden Abbildungsgenauigkeit der Nutstruktur dienten drei verschiedene Testkörper (Abbildung 3.5) mit unterschiedlichen Nutgeometrien. Innerhalb eines Testkörpers erfolgt auch eine Variation der Nutbreite und des Nutmittenabstand.

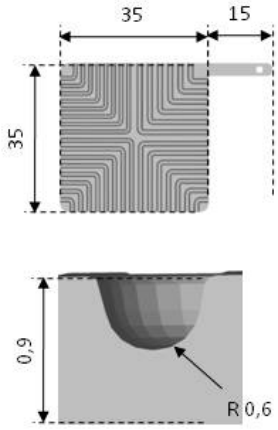
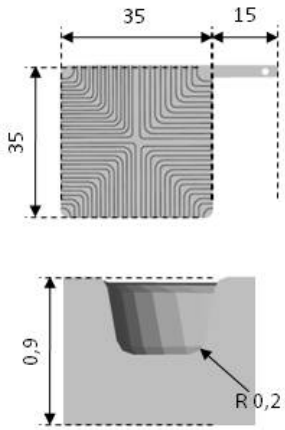
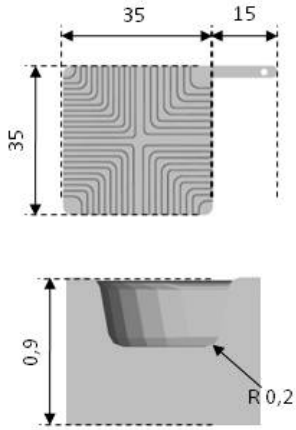
Testkörper 1	Testkörper 2	Testkörper 3
Draufsicht & Nutgeometrie		
		
Nutbreite (NB): 1-1,3mm Nutmittenabstand (NMA): 1,8-2,4mm Nutgrundradius (NGR): 0,4-0,6mm Öffnungswinkel (ÖW): 20°	Nutbreite (NB): 1-1,3mm Nutmittenabstand (NMA): 1,8-2,4mm Nuteckenradius (NER): 0,2mm Öffnungswinkel (ÖW): 20°	Nutbreite (NB): 1,4-1,7mm Nutmittenabstand (NMA): 2,55-3,1mm Nuteckenradius (NER): 0,2mm Öffnungswinkel (ÖW): 20°

Abbildung 3.5: Übersicht über die verschiedenen Testkörper

3.2 Übertragung auf RP-Positiv-Werkstoffe

Anfängliche Forschungsaktivitäten hinsichtlich der Herstellung von RP-Trägern, konzentrierten sich auf das generative Verfahren Lasersintern (LS). Zum Einsatz kamen die Werkstoffe Polyamid (PA12), Polystyrol (PS) und ein Gemisch aus PA12 und Graphit (PGX). Hauptaugenmerk der Forschungsaktivitäten lag auf der deutlichen Verbesserung der Oberflächenqualität und der Steigerung der Abbildungsgenauigkeit (Maß- und Formhaltigkeit). Abbildung 3.6 zeigt die verschieden Einflussgrößen auf den Lasersinterprozess und der daraus resultierenden Bauteilqualität.

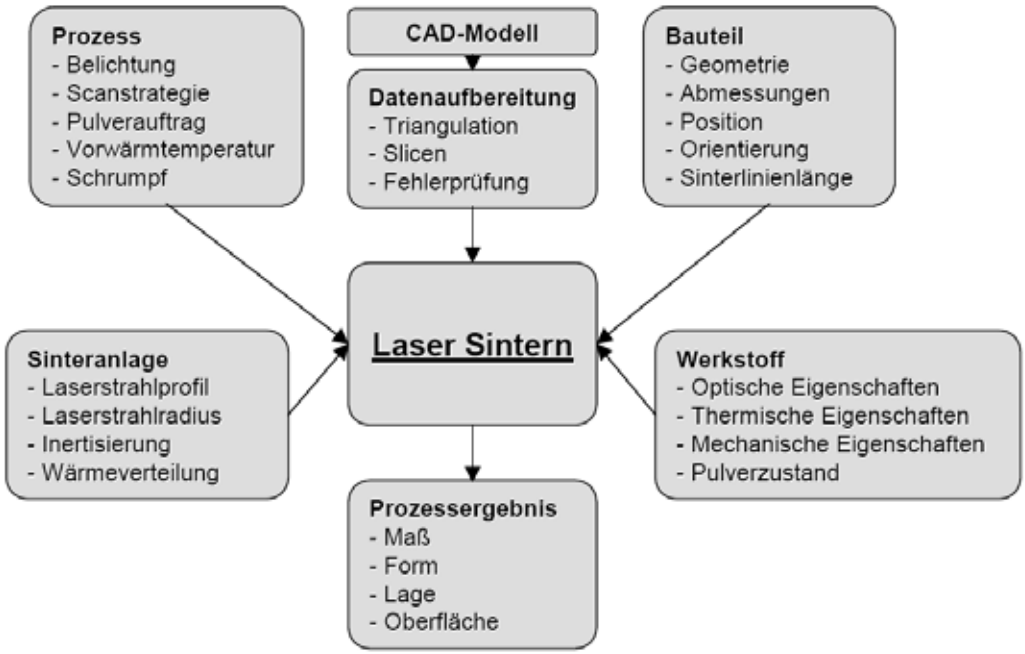


Abbildung 3.6: Einflussgrößen auf den Lasersinterprozess [2]

Als wesentliche Einflussgrößen auf die Bauteilqualität der Testkörper wurden die Parameter Bauraumtemperatur, Laserleistung und Orientierung der Bauteile im Bauraum identifiziert. Durch Anlagenkalibrierung und eine umfangreiche Testreihe zur Optimierung dieser Parameter für die Werkstoffe PA12, PS und PGX erfolgte zunächst eine Grobeinstellung der Bauteilqualität. Im Anschluss zeigten dann optische Begutachtungen am IPE (Abbildung 3.5, Tabelle 3.2, Tabelle 3.3, Tabelle 3.4), Versuche am fem (siehe Kapitel 4) und Bauteilvermessungen am ZBT (siehe Kapitel 5), dass der Projekterfolg auf Basis der Lasersintertechnologie (mit nur noch marginalem Potential zur Steigerung der Bauteilqualität) mit sehr großer Wahrscheinlichkeit nicht realisierbar wäre.
Die folgenden Beobachtungen und deren Auswirkungen verdeutlichen den Abbruch der Forschungsaktivitäten hinsichtlich der LS – Technologie:

- Unzureichende Abbildungstreue (Maß- und Formhaltigkeit)
- Niedrige Oberflächenqualität / Hinterschnitte an Nutflanken
- Werkstoff Polystyrol: Saugt Elektrolyt auf und löst sich auf

→ Negative Auswirkung auf:

- Herstellung der Leitfähigkeit
- Galvanische Beschichtung / Einebnung der Rauheit
- Trennung von RP-Träger und Galvanoform
- Entformung im Anschluss an den Spritzguss

Allerdings zeigten Versuche in Zusammenarbeit mit der Fa. Galvano-T GmbH (projektbegleitender Ausschuss), dass das Polyamid – Graphit Gemisch (Massenverhältnis 70% PA - 30% Graphit) über eine für die galvanische Abscheidung bereits ausreichende Leitfähigkeit verfügt. Darüber hinaus ist es denkbar, dass die Graphitbeimengung auch positive Effekte auf die Gleit-, Magnetismus- und Wärmeleitungseigenschaften von RP-Bauteilen bewirkt. Da hier ein hohes Vermarktungspotential vermutet wird, befasst sich zunächst eine laufende Arbeit am IPE mit der Dokumentation der elektrischen Leitfähigkeit. Weitere Forschungsaktivitäten in diesem Feld sind angedacht.

Tabelle 3.2: Makroaufnahmen (3x Vergrößerung) der Nutgeometrien an Testkörper 1

Testkörper 1				
Verfahren	**LS**			**MJM**
Werkstoff	**PA**	**PS**	**PGX**	**TJ88**
NB: 1,3 mm NMA: 2,4 mm NGR:0,55 mm ÖW: 20°				
NB: 1,0 mm NMA: 1,8 mm NGR: 0,4 mm ÖW: 20°				
NB: 1,2 mm NMA: 2,2 mm NGR:0,5 mm ÖW: 20°				
NB: 1,1 mm NMA: 2,0 mm NGR:0,45 mm ÖW: 20°				

Tabelle 3.3: Makroaufnahmen (3x Vergrößerung) der Nutgeometrien an Testkörper 2

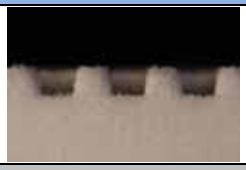
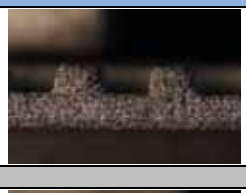
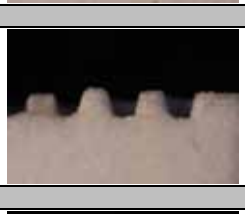
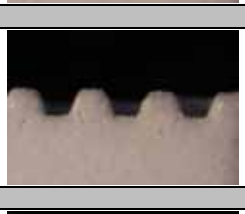
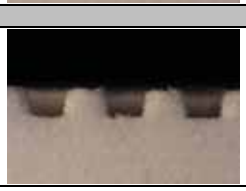
Testkörper 2				
Verfahren	**LS**			**MJM**
Werkstoff	**PA**	**PS**	**PGX**	**TJ88**
NB: 1,3 mm NMA: 2,4 mm NER:0,2 mm ÖW: 20°				
NB: 1,0 mm NMA: 1,8 mm NER:0,2 mm ÖW: 20°				
NB: 1,2 mm NMA: 2,2 mm NER:0,2 mm ÖW: 20°				
NB: 1,1 mm NMA: 2,0 mm NER:0,2 mm ÖW: 20°				

Tabelle 3.4: Makroaufnahmen (3x Vergrößerung) der Nutgeometrien an Testkörper 3

Testkörper 3				
Verfahren	**LS**			**MJM**
Werkstoff	**PA**	**PS**	**PGX**	**TJ88**
NB: 1,7 mm NMA: 3,1 mm NER:0,2 mm ÖW: 20°				
NB: 1,4 mm NMA:2,5 mm NER:0,2 mm ÖW: 20°				
NB: 1,6 mm NMA: 2,9 mm NER:0,2 mm ÖW: 20°				
NB: 1,5 mm NMA: 2,7 mm NER:0,2 mm ÖW: 20°				

Nachdem die Herstellung der LS – Träger aufgrund der negativen Forschungsergebnisse eingestellt wurde, beschlossen die Forschungsstellen ein alternatives RP – Verfahren zu identifizieren und auf dessen Eignung zu untersuchen. In einem ersten Schritt wurde das am IPE verfügbare MultiJet-Modeling–Verfahren herangezogen. Nach der Herstellung der ersten Testkörper und dem optischen Vergleich mit den bislang mittels LS hergestellten Testkörpern (Tabelle 3.2, Tabelle 3.3, Tabelle 3.4), zeigte sich das hohe Potential dieses Verfahrens im Hinblick auf die Oberfläche und Abbildungstreue. Jedoch bereitete der niedrige Schmelzpunkt des wachsähnlichen, thermoplastischen Materials (Thermojet 88) zunächst Probleme bei der galvanischen Beschichtung, da eine verstärkte Blasenbildung an der Oberfläche des Materials auftrat. Durch einen Hinweis der Fa. Galvano-T GmbH und der Verwendung eines speziellen Elektrolyten, konnte dieses Problem jedoch gelöst werden. Somit wurde die technische Machbarkeit im Vorwege bewiesen und die Forschungsstellen einigten sich auf eine weitere Betrachtung dieser Material- und Verfahrenskombination.
Darüber hinaus wurde am IPE ein umfangreiches Verfahrens- und Materialbenchmark gestartet, welches die Eignung weiterer RP – Verfahren herausstellen sollte. Für die Durchführung dieses Benchmarks in Zusammenarbeit mit der Industrie konnten die sehr guten Kontakte des IPE zur Rapid Prototyping – Branche genutzt werden. Bereits bei der optischen Betrachtung der Nutprofile von unterschiedlichen Verfahrens- und Materialkombinationen, zeigten sich die großen qualitativen Unterschiede. Sehr erfolgversprechend schienen die Verfahren MultiJetModeling (MJM), Stereolithographie (SL), PolyJetModeling (PJM) und das Digital-Light-Processing (DLP) (Abbildung 3.7).

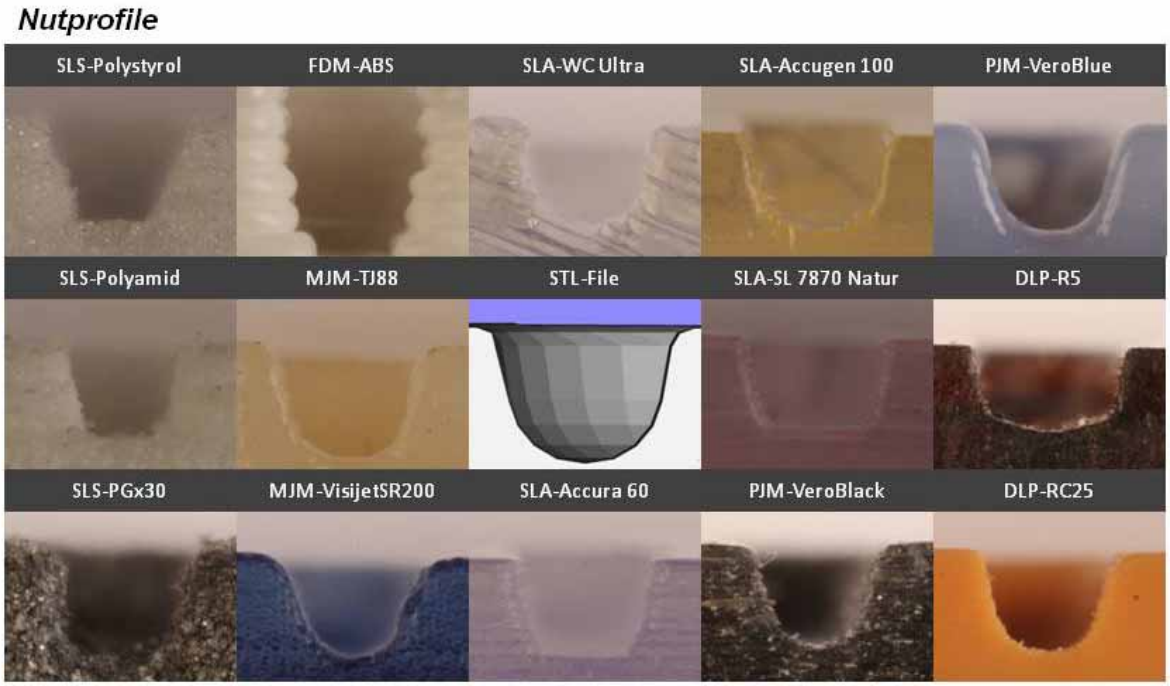


Abbildung 3.7: Makroaufnahmen der Nutprofile in Abhängigkeit der Verfahrens- und Werkstoffkombination

Nach der optischen Begutachtung erfolgte eine umfangreiche Messreihe zur Bestimmung der Rauheit (Nuten und Stege) (Abbildung 3.8), sowie zur Bestimmung der Maß- und Formhaltigkeit der Nutgeometrie (Abbildung 3.9). Da nicht für alle Verfahrens- und Materialkombinationen die Testkörper 2 & 3 vorlagen und darüber hinaus bereits beim optischen Vergleich eine hohe Abbildungstreue der Nuten an TK1 gezeigt werden konnte, wurde im weiteren Verlauf ausschließlich TK1 betrachtet.

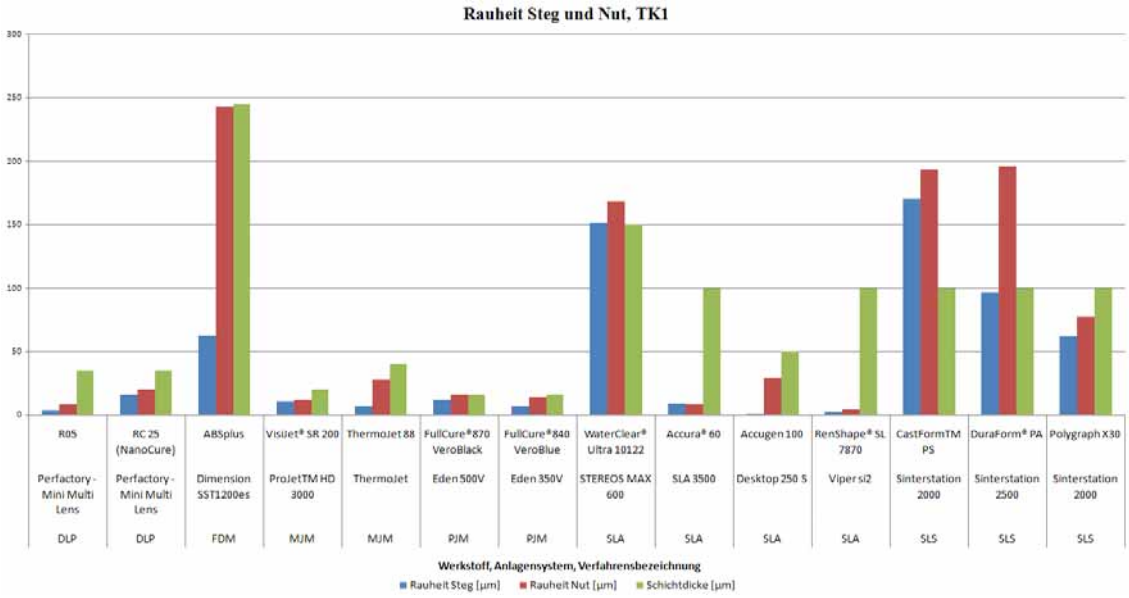


Abbildung 3.8: Durchschnittswerte der gemittelten Rauheit Rz, Testkörper 1

Die Ergebnisse der Rauheitsmessungen an Nuten und Stegen zeigten die potentielle Eignung der Verfahren DLP, MJM, PJM und SL (Abbildung 3.8). Insgesamt wurden für diese Verfahren Werte für die gemittelte Rautiefe von Rz<25µm gemessen. Im Ver-

gleich zur ursprünglich angedachten Lösung mittels LS (50µm<Rz<200µm) eine deutliche Verbesserung der Oberflächenqualität.

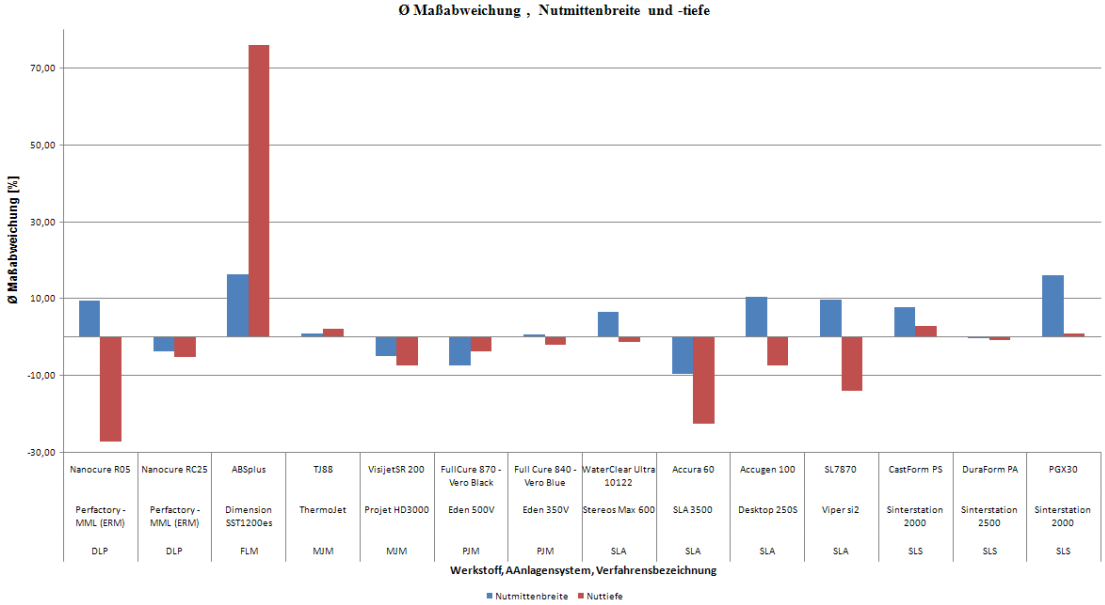


Abbildung 3.9: Maßabweichung in %, Testkörper 1

Im Anschluss erfolgte die Beurteilung hinsichtlich der Maßabweichung von Nutmittenabstand und Nuttiefe (Abbildung 3.9). Sehr gute Werte (Maßabweichungen < 5%) zeigten die Verfahren DLP, MJM, PJM und LS. Letzteres zeigt deutlich, dass es sich hier um eine lokal beschränkte Maßabweichung handelt. Die Beurteilung von Maß- und Formhaltigkeit kann deshalb nur in Zusammenhang mit der optischen Begutachtung (Abbildung 3.7) erfolgen. Demnach ist das LS hinsichtlich dieses Kriteriums auszuschließen.

Die Abschlussbewertung erfolgte anhand der optischen Begutachtung, der Rauheitsmessungen und der Maßabweichungen, sodass folgende Verfahrens- und Materialkombinationen als geeignet identifiziert wurden.

- MultiJet-Modeling: Thermojet 88
- Digital Light Processing: Nanocure RC25
- PolyJetModeling: Fullcure 840 – VeroBlue

Für alle drei Verfahrens- und Materialkombinationen wurden Testkörper hergestellt und an das fem gesendet, wo ihre Eignung hinsichtlich der Elektrolytbeständigkeit und Beschichtbarkeit erfolgte.

Abschließend entschlossen sich die Forschungsstellen für eine Fokussierung des MultiJet-Modelings, auch in Anbetracht der Tatsache, dass diese Technologie am IPE zur Verfügung steht und eine flexiblere Forschung stattfinden konnte. Das DLP Verfahren sollte dann bei ausreichendem Projektfortschritt näher betrachtet werden.

3.3 Beschichtungsfähigkeit

Die Aktivitäten des IPE hinsichtlich der Beschichtungsfähigkeit beschränkten sich auf die Herstellung von Testkörpern und der Durchführung von zusätzlichen Versuchen zur galvanischen Beschichtbarkeit in Zusammenarbeit mit der Fa. Galvano-T GmbH. U.a. konnte dadurch der Nachweis über die technische Machbarkeit der galvanischen Beschichtung des Materials Thermojet88 und der Nachweis über die Beschichtbarkeit des PA-Graphit-Gemisches ohne Aufbringen einer zusätzlichen leitfähigen Startschicht deutlich beschleunigt werden. Die Ergebnisse über die Beschichtungsfähigkeit der unterschiedlichen RP-Bauteile sind dem Kapitel 4 zu entnehmen.

3.4 Bau erster Prototypen

Nach dem gemeinsamen Beschluss der Forschungsstellen, sich auf das MJM-Verfahren zu konzentrieren, erfolgte am ZBT zunächst die Entwicklung des Werkzeugkonzeptes. Es wurde ein Spritzgussfundament welches lediglich das über die Schritte RP-Positiv → Galvanoform (Negativ) hergestellte Flowfield aufnimmt hergestellt.
Im Anschluss an die Festlegung des zu verwendenden Werkzeugkonzeptes erfolgte die Konstruktion des ersten Prototyps. Dieser zeichnet sich im Gegensatz zur reinen Abbildung einer Bipolarplatte (Abbildung 3.2) durch den vollständigen Verzicht auf Bohrungen, einer für RP-Verfahren vereinfachten Nutstruktur und insbesondere den erweiterten Randbereich um das Flowfield aus. Letzteres ist eine Vorgabe der Forschungsstellen 1 & 2. Seitens des ZBT vereinfacht sich das Handling bei der Nacharbeit der Galvanoform.

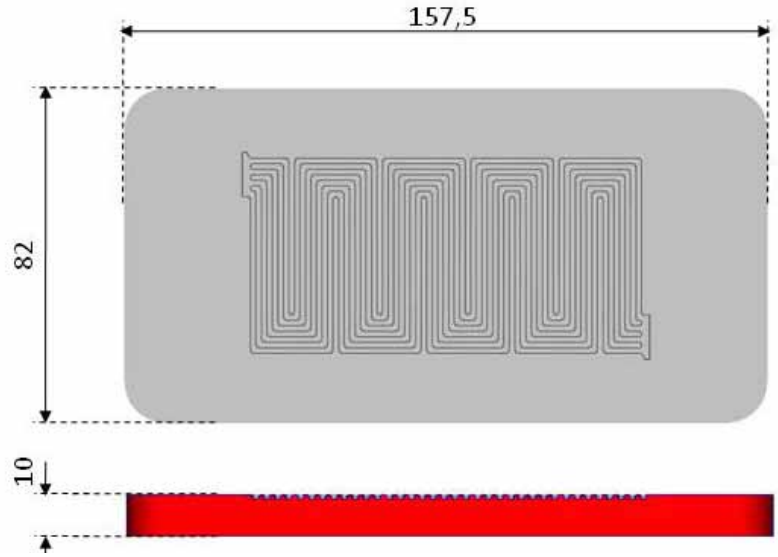


Abbildung 3.10: Draufsicht auf Flowfieldstruktur des resultierenden RP-Trägers; Unten: Schnitt durch RP-Träger

Nach abgeschlossener Planung der Vorgehensweise wurden die ersten BPP-WKZ-Modelle aus Wachs generativ hergestellt. Optische Vermessungen der Bauteiloberfläche am ZBT zeigten, dass die Modelle sich nach außen hin um mehrere Zehntel aufbiegen. Dabei handelt es sich um ein innerhalb der RP- Technologie verbreitetes Problem (Bezeichnung: „Curl“). Ursache für diesen Sachverhalt ist der Abkühlvorgang zwischen den einzelnen Schichten. Dabei ist die als vorletztes aufgetragene Schicht durch Abkühlung bereits geschrumpft. Wird nun eine weitere Schicht aufgetragen, so hat diese Schicht ein größeres Schrumpfungspotential als die darunter liegende Schicht, wodurch Bauteile, gerade bei großflächigem Schichtauftrag, zum Aufbiegen neigen.

Abbildung 3.11: BPP-WKZ aus Wachs; links: grundplattenparallele und um x=8° / y=8° gedrehte Bauweise; rechts: Oberflächen

Werden die Bauteile wie beim MJM-Verfahren auf Stützkonstruktionen aufgebaut, so können diese nachgeben und die thermisch induzierten Spannungen werden in Form des Verzugs sichtbar. Um dem „Curl“ entgegenzuwirken können Bauteile unter einem Winkel zur Grundplatte orientiert werden, sodass die aufgetragenen Schichten kleiner werden (Abbildung 3.12). Allerdings hat diese Neigung auch zur Folge, dass die Oberfläche eine höhere Rauheit und richtungsgebundene Riefen aufweist (Abbildung 3.11). Insgesamt stellte sich durch die Neigung der BPP-WKZ-Modelle keine drastische Reduzierung des Verzuges ein, sodass zugunsten der Richtungsungebundenheit der Oberfläche weiterhin die grundplattenparallele Bauteilorientierung verfolgt wurde (siehe Kapitel 5).

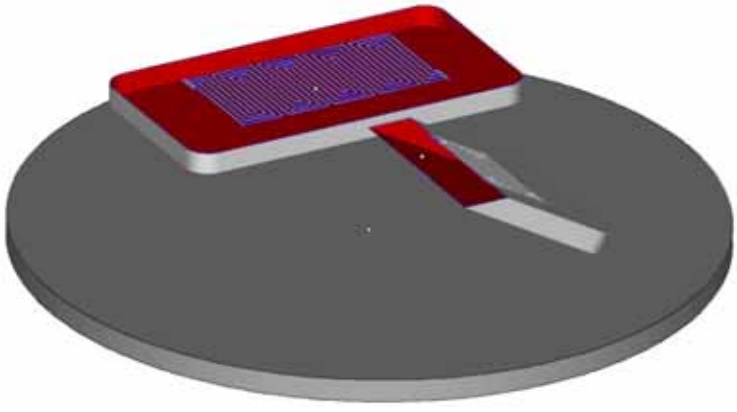


Abbildung 3.12: Vergleich der Flächeninhalte einer Schicht bei grundplattenparalleler und geneigter Bauteilorientierung

Auf dem zweiten projektbegleitenden Ausschuss, wurde in Zusammenarbeit mit den anwesenden Industrievertretern beschlossen, das Wachsmodell in Zukunft auszuschmelzen um somit auf die Trennschicht verzichten zu können. Allerdings sei an dieser Stelle auch erwähnt, dass somit im Vorwege keine einebnenden Schichten mehr

aufgetragen werden. Damit handelt es sich bei der Galvanoform um einen 1:1 Negativabdruck der Oberfläche des RP-Trägers.
Zur Vermeidung der o.g. Spannungen wurde eine weitere Strategie verfolgt, welche bereits in einer anderen Projektidee mit der Fa. Galvano-T GmbH erprobt wurde. Bei dieser Idee werden die Wachsbauteile ohne Stützkonstruktionen direkt auf eine Kupferplatte gedruckt (Abbildung 3.13). Im Anschluss erfolgen dann die Beschichtung der Bauteile mit einem leitfähigen Silberpulver und das galvanische Beschichten. Durch nachträgliches Ausschmelzen der Wachsstrukturen lassen sich so diffizile Innengeometrien herstellen. Innerhalb dieses Projektes soll allerdings lediglich ein Aufbiegen des BPP-WKZ-Modells durch „wegknicken“ der Stützen vermieden werden.

Abbildung 3.13: links: BPP-WKZ-Modell auf Kupferplatte; rechts: Haftungsproblematik an Bauteilecken

Wie bereits im vorherigen Abschnitt dargestellt sollten auch Modelle durch DLP und SL hergestellt und untersucht werden. Dazu stellte die Fa. NRU Bauteile zur Verfügung, die durch die SL aus dem Material AccuGen 100 HC generiert wurden. Zudem bezog das IPE zwei durch DLP erzeugte Modelle aus RCP 30 und R11. Die Vermessungen durch das ZBT sind im entsprechenden Kapitel 5 dargestellt. Außerdem wurde auf Grundlage eines AccuGen 100 HC Modells eine Galvanoform erzeugt, die im späteren Verlauf zu den besten Ergebnissen geführt hat.

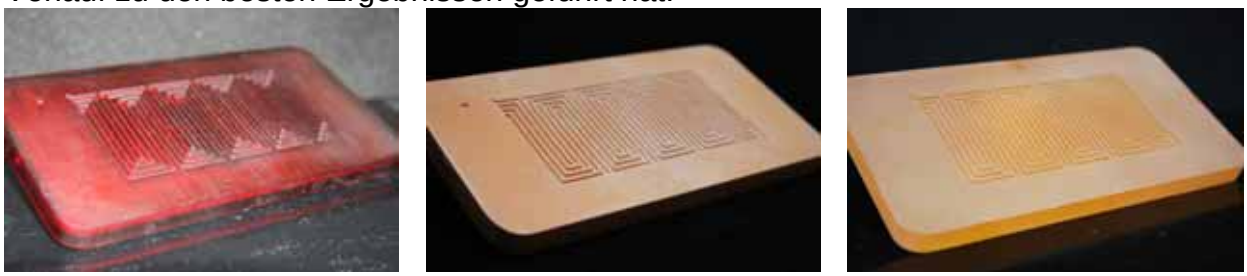


Abbildung 3.14: BPP-WKZ-Modelle: links: DLP: R11; Mitte: DLP: RCP 30; rechts: SL: AccuGen 100HC

Optimierung der Oberflächenqualität

Erste Ansätze der Optimierung der Oberflächenqualität befassten sich mit der Nachbearbeitung der zu Beginn hergestellten LS-Oberflächen. Im Mittelpunkt der Betrachtung standen Verfahren, die eine weitgehend automatisierbare und wirtschaftliche Lösung darstellen. Ausgeschlossen wurden alle spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide. Diese Verfahren ermöglichen zwar potentiell die Herstellung einer anforderungsgerechten Oberfläche, unter wirtschaftlichen Kriterien muss der „Umweg“ über ein RP-Kunststoff-Verfahren dann jedoch ausgeschlossen werden.
Untersucht wurden folgende Verfahren, wobei bereits bei der optischen Kontrolle die Ausschlusskriterien sichtbar wurden:

- Glasperlstrahlen
- Korundstrahlen
- Tellerfliehkraftgleitschleifen
- Trockeneisstrahlen
- RP-Tempering-Kits

Zusammenfassend kann kein o.g. Nachbearbeitungsverfahren eine Oberflächenqualität herstellen, welche eine Verwendbarkeit innerhalb des Projektes vermuten lässt. Insbesondere an der diffizilen Nutstruktur konnte keine Verbesserung festgestellt werden. Damit musste die Verwendung der LS-Technologie innerhalb dieses Projektes endgültig ausgeschlossen werden (Kapitel 3.2).
Im Gegensatz zum LS-Verfahren wird beim später fokussierten MJM – Verfahren ein wachsähnlicher Werkstoff mit vergleichsweise geringer Härte eingesetzt.
Einerseits erschwert sich dadurch die Nachbearbeitung der RP-Träger, da diese sehr leicht beschädigt werden können. Andererseits erhöht sich auch die potentielle Chance ein geeignetes Nachbearbeitungsverfahren zu identifizieren.

Folgende Nachbearbeitungsverfahren wurden zunächst betrachtet:

- RP-Tempering
- Abreiben mit Ethanol
- Trockeneisstrahlen

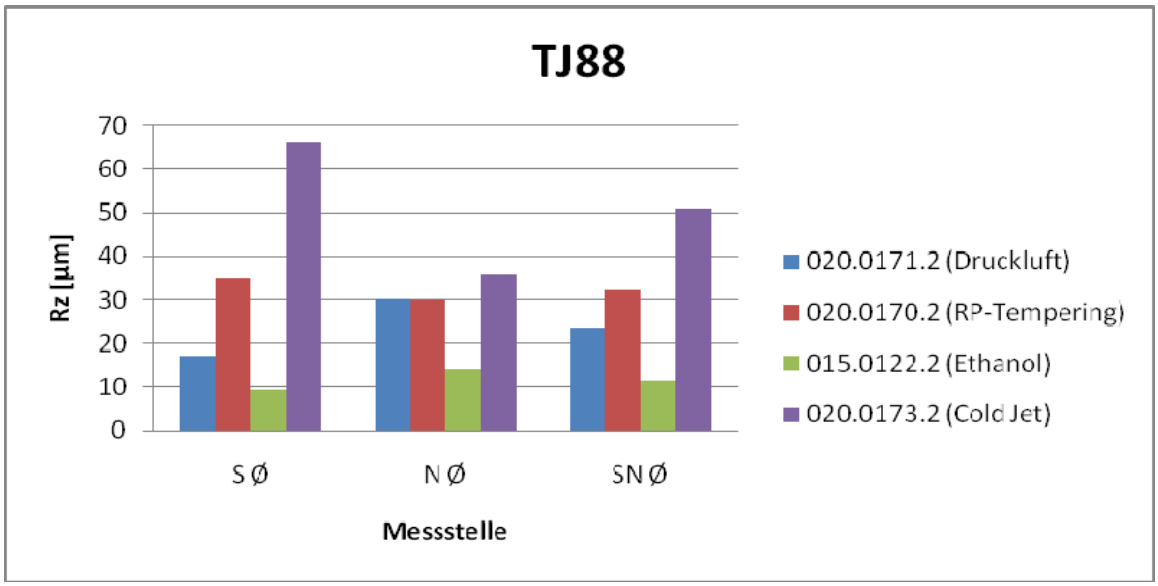


Abbildung 3.15: Gesamtübersicht der Nachbearbeitung von TJ88

Ein einmaliges Abreiben der Oberfläche mit Ethanol hat damit eine nachgewiesen positive Auswirkung auf die normalerweise lediglich mit Druckluft abgeblasene Oberfläche.
Da die ersten Abgussversuche mit einem auf MJM-Basis abgeformtem Werkzeug gezeigt haben, dass das Hauptproblem der Treppenstufeneffekt bzw. die Rauheit des Wachsmodells ist, welche sich auf die Galvanoform überträgt, erfolgten weitere Versuche zur Optimierung der Oberflächenqualität. Dabei kam erneut ein Testkörper zum Einsatz, der durch verschiedene Verfahren nachbehandelt wurde. Da an den Flanken der Nutprofile keine taktilen Prüfungen durchzuführen sind, erfolgten eine optische Begutachtung, sowie die Rauheitsmessung der Nuten.

Die durchgeführten Nachbehandlungen sind im Folgenden genannt:
Strahlen: Edelkorund (3 bar) und Glasperlen (3 bar)
Ultraschallbad
„Abreiben“: Ethanol und Isopropanol
Die Ergebnisse der optischen Begutachtung und der Rauheitsmessungen sind in Tabelle 3.5 bzw. Abbildung 3.16 dargestellt.

Tabelle 3.5: optische Begutachtung der Nachbearbeitung

Verfahren	Beobachtung
Strahlen (Edelkorund)	Düsenanordnung nicht mehr erkennbar Oberfläche durch Strahlmittelrückstände und Ausbrüche gekennzeichnet Treppenstufeneffekt ausgeprägt Ausbrüche auch in den einzelnen Schichten
Strahlen (Glasperlen)	Düsenanordnung nicht mehr erkennbar Oberfläche durch feine Strahlmittelrückstände gekennzeichnet Keine Ausbrüche Treppenstufeneffekt leicht verringert Oberfläche erscheint geglättet
Ultraschallbad	Orientierung nach wie vor sichtbar Offensichtliche Reduzierung des Treppenstufeneffektes Oberfläche erscheint geglättet
„Abreiben“ mit Ethanol	Orientierung nach wie vor sichtbar Offensichtliche Reduzierung des Treppenstufeneffektes Oberfläche erscheint geglättet
„Abreiben“ mit Isopropanol	Orientierung nach wie vor sichtbar Offensichtliche Reduzierung des Treppenstufeneffektes Oberfläche erscheint geglättet

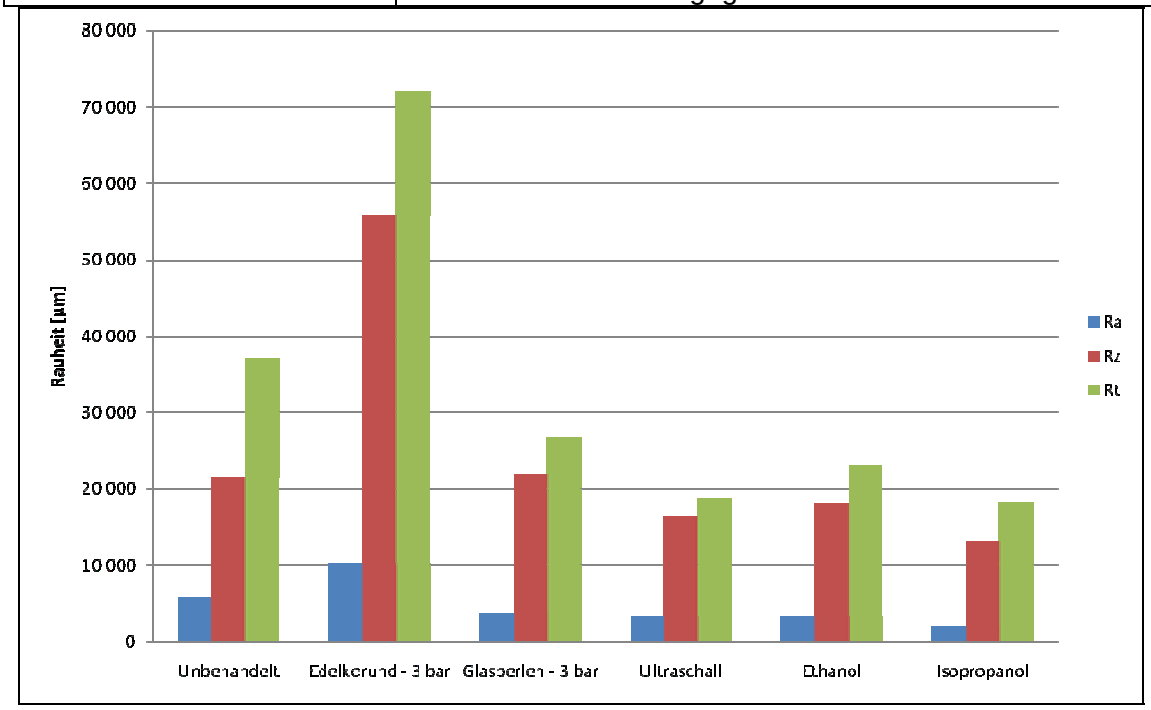


Abbildung 3.16: Rauheitswerte der nachbehandelten Testkörper

Die Ergebnisse zeigen, dass eine abrasive Nachbehandlung zwar die Sichtbarkeit der Bauteilorientierung reduziert, aber im Bezug auf den Treppenstufeneffekt geringere Auswirkungen hat. Das Ultraschallbad und das „Abreiben“ sind zu bevorzugen. In Verbindung mit den Rauheitsmessungen kann festgehalten werden, dass der scharfkantige Korund die Qualität verschlechtert und die besten Ergebnisse durch Isopropanol erreicht werden. Da diese Nachbearbeitung aber mit relativ hohem Aufwand verbunden ist, ist ein Ultraschallbad zu bevorzugen. Dabei müssten durch weitere Untersuchungen optimale Bedingungen, wie Temperatur, Medium oder Wellenlänge herausgestellt werden.
In einer alternativen Strategie wurde ein Abguss von einem Negativwachsdruck des Trägers für die Galvanoform angestrebt. Ziel war es die Beständigkeit im Elektrolyt zu erhöhen und durch die Verwendung verschiedener Materialien eine bessere Nachbearbeitungsmöglichkeit herzustellen. Getestet wurden Gießharz starr (durchsichtig), Gießharz flexibel (grün) und herkömmliches Silikon (weiß). Wie Abbildung 3.18 zeigt, konnten die dargestellten Lufteinschlüsse jedoch nicht vermieden werden.

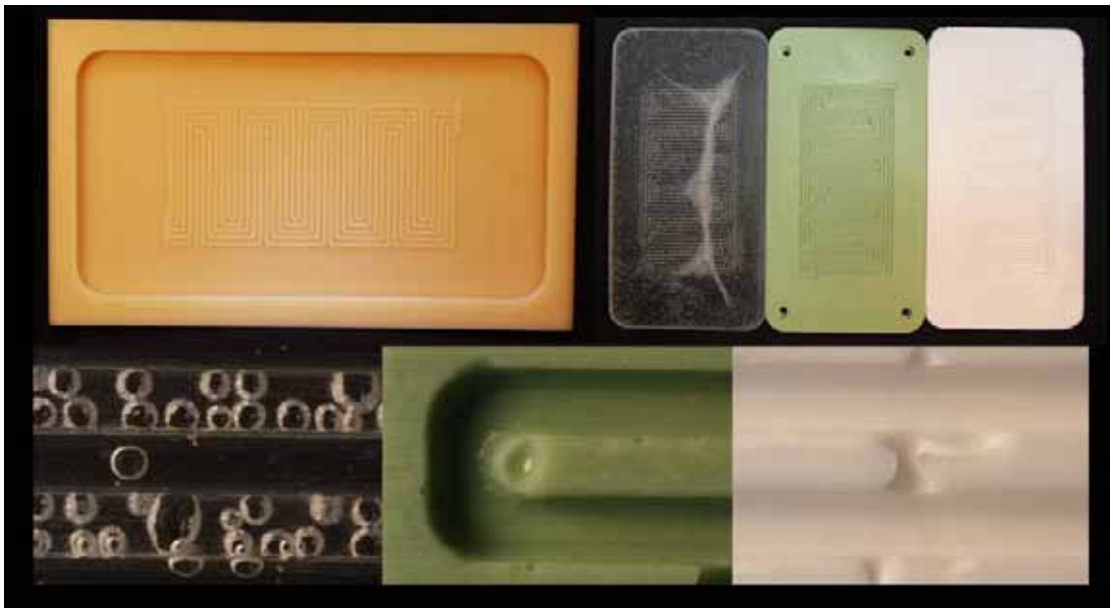


Abbildung 3.17: Abgießversuche mit 2K-Harz (durchsichtig), Gießharz/Hagebaumarkt, Silikon

Auch ein Abguss unter Vakuum zeigte keine Reduzierung der Lufteinschlüsse. Vielmehr trat eine vermehrte Blasenbildung auf, sodass vermutet wird, dass sich im RP-Träger bereits Lufteinschlüsse befinden. Damit musste eine weitere Verfolgung dieser Idee ausgeschlossen werden.

3.5 Weiterentwicklung/Optimierung

Neben der Oberflächenqualität ist der gesamte Verzug der Wachsmodelle ein weiterer Aspekt, den es zu optimieren gilt. Durch den Verzug der Galvanoformen ist ein hoher Aufwand durch nachträgliches Richten erforderlich. Messungen des ZBT ergaben zwar, dass der größte Anteil des Verzuges während der Galvanisierung entsteht, jedoch konnte auch festgestellt werden, dass bereits die Wachsmodelle einen relativ ausgeprägten Verzug aufweisen. Dies liegt am bereits beschriebenen „Curl“ – Effekt, der durch thermische Spannungen im Bauteil entsteht. Daher lag es nahe, diesem Effekt durch thermische Nachbehandlung entgegenzuwirken. Zunächst musste die Bauteiltemperatur nach Bauende gemessen werden. Um die Effekte besser nachvollziehen zu können erfolgte die Temperaturaufnahme eines Bauteils an der Unterseite (also im Supportbereich) von Baubeginn an und an der Bauteiloberseite nach Fertigstellung der letzten Schicht. Die Ergebnisse sind Abbildung 3.18 zu entnehmen.

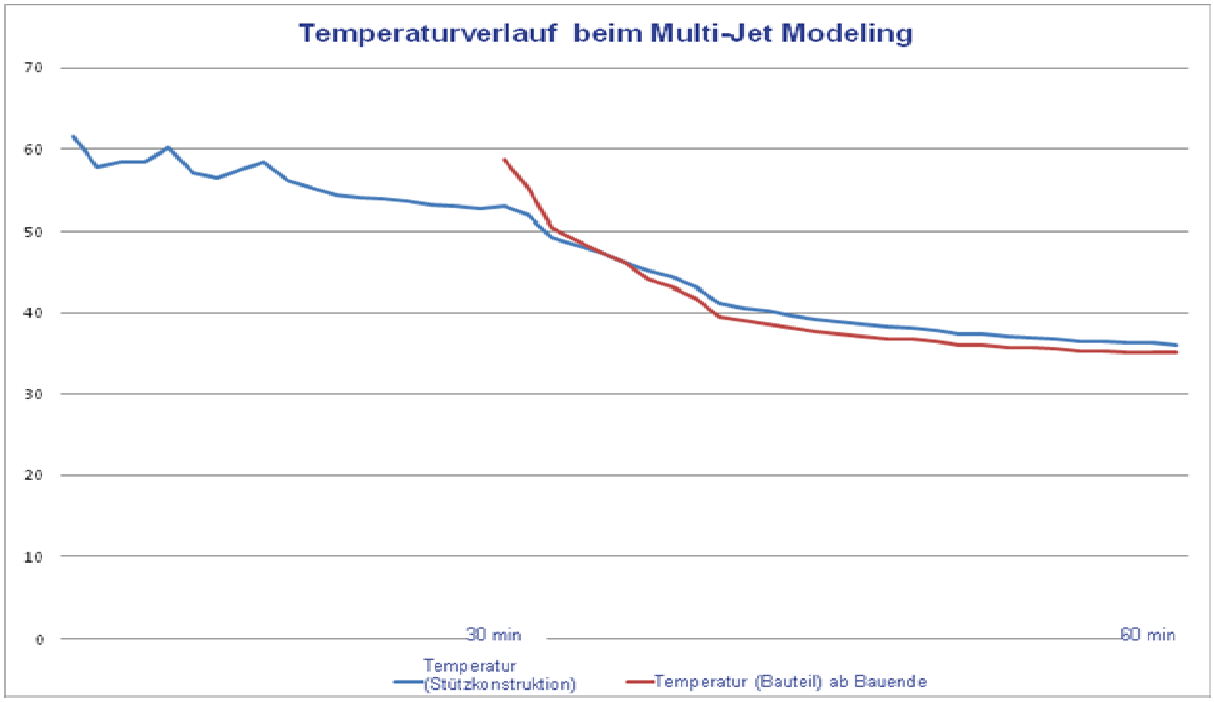


Abbildung 3.18: Temperaturverlauf beim MJM

Es ist zu sehen, dass die Oberseite bei Bauende noch wesentlich wärmer ist als die Unterseite und im Vergleich zu den unteren Schichten relativ schnell abkühlt. Auf diesen Grundlagen wurden drei Versuche unter den folgenden Bedingungen durchgeführt:

1. Versuch
   - Vorwärmen eines Ofens auf 50°C
   - Reduzierung der Temperatur um 5°C pro 10 Minuten
   - Endtemperatur: 20°C
2. Versuch
   - Vorwärmen des Ofens auf 50°C
   - Reduzierung der Temperatur um 10°C pro 60 Minuten
   - Endeinstelltemperatur: 20°C, Bauteil verbleibt aber längere Zeit im Ofen
3. Versuch
   - Vorwärmen einer Aluminiumplatte auf 60°C
   - Erstellen eines Modells auf der Aluminiumplatte (ohne Stützkonstruktion)
   - Abkühlen wie in Versuch 1

Beim ersten Versuch musste festgestellt werden, dass das Bauteil nach der Entnahme aus dem Ofen noch immer eine Temperatur von 50°C aufwies. Grund dafür wird die Trägheit des verwendeten Ofens sein. Daraus resultierte Versuch 2, der über einen längeren Zeitraum abkühlt. Durch den dritten Versuch sollte überprüft werden, ob der Auftrag auf einer gut wärmeleitenden Grundplatte ohne Stützkonstruktion einen positiven Einfluss auf den Verzug hat. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.19 dargestellt.

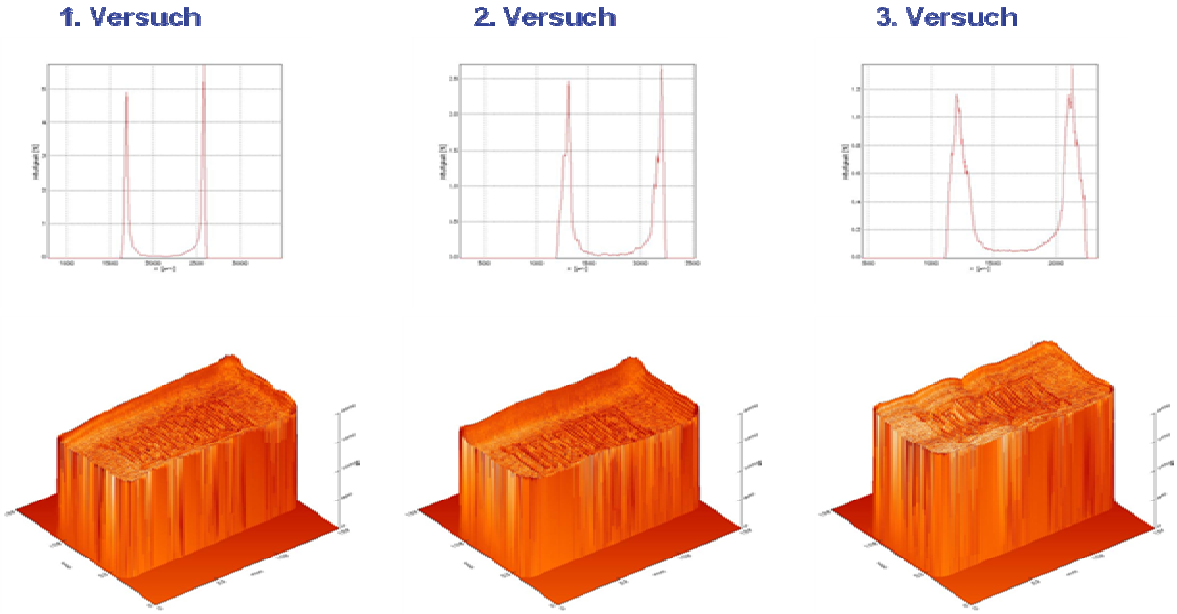


Abbildung 3.19: Ergebnisse der Abkühlversuche

Anhand der Topographien und Histogramme ist eindeutig zu sehen, dass durch Versuch 1 der geringste Verzug erreicht wird. Dieser ist auch wesentlich geringer, als der aus vorangegangenen Versuchen ohne nachträgliche Wärmebehandlung. Um die Unterschiede zwischen erstem und zweitem Versuch zu untersuchen bedarf es einer genauen Vermessung der Temperaturen währen der Abkühlphase in verschiedenen Bauteilbereichen. In diesem Zusammenhang ist nach wie vor Potential zur Verbesserung zu sehen. Der dritte Versuch ergab einen sehr stark ausgeprägten Verzug. Offensichtlich wird durch das stark wärmeleitende Aluminium zu viel Wärme vom Bauteil nach unten hin abgegeben, wodurch das Temperaturgefälle zwischen Bauteilober- und -unterseite noch verstärkt wird.

4 Galvanoformungsprozess

4.1 Untersuchung der Beschichtungsfähigkeit der RP-Testkörper

Als Voraussetzung für die Herstellung einer Galvanoform ist eine elektrisch leitfähige Startschicht auf den strukturgebenden Testkörpern notwendig. Für das Aufbringen einer leitfähigen Startschicht wurden am fem Untersuchungen mit den in Frage kommenden Methoden durchgeführt. Je nach Prozess werden die Oberflächen entweder mit den bekannten Prozessen zur Kunststoffgalvanisierung behandelt (Bekeimung mit Palladium etc.) oder mit Hilfe eines Leitlacks/ -pulvers eine leitfähige Startschicht erzeugt. Wegen der Rauheit des RP-Ausgangsmaterials bei einigen RP-Trägern soll im Anschluss ein galvanischer Aufbau erzeugt werden, der die optimale Oberfläche für die spätere Galvanoformung darstellt. Zur Einebnung und Glanzbildung wurden Kupferschichten (cyanidisch bzw. sauer) aufgebracht sowie eine hocheinebnende Glanznickelschicht (Wattselektrolyt). Der prinzipiell umzusetzende Schichtaufbau ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

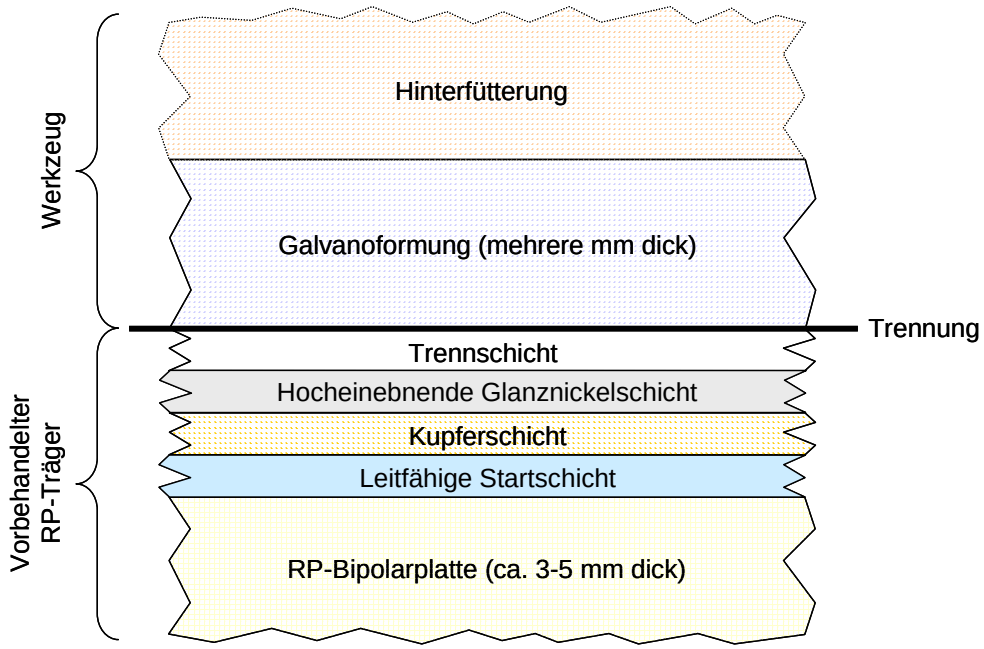


Abbildung 4.1: Prinzipieller Schichtaufbau bei der Herstellung der Galvanoform (Negativ-Werkzeug) aus einem RP-Positiv einer Bipolarplatte

4.1.1 Untersuchte Methoden zum Aufbringen einer leitfähigen Startschicht

Ein erster wesentlicher Schritt in dem Projekt ist die Aufbringung einer haftfesten leitfähigen Startschicht auf die Testkörper-Oberfläche, um im Anschluss eine eingeebnete und porendichte Schicht mit den üblichen Galvanisierungsverfahren zu erzeugen. Mit den Untersuchungen soll eine Auswahl der geeigneten Prozessschritte für die jeweiligen Werkstoffe ermittelt werden.

Bekeimung (Aktivierung)

Die Bekeimung mit Palladium ist eine von vielen Methoden um eine leitfähige Startschicht aufzubringen. Hierbei werden auf die Körperoberfläche Edelmetallkeime aufgebracht. Edelmetallkeime sind metallische, hochaktive Keime des Palladiums. Die Bekeimung wurde auf zwei Arten durchgeführt.

Bei der ionogenen Aktivierung wurden die Testkörper in eine Aktivator-Lösung (Firma Schlötter) getaucht und es fand eine Reduktion des Palladiumsalzes mit Zinn-II-chlorid zu metallischem Palladium statt.

Im Gegensatz zur ionogenen Aktivierung läuft die kolloidale in zwei Schritten ab. Hierfür wurde ein Aktivierungsprogramm von zwei Firmen (Firma HSO und Firma SurTec) untersucht. Der Testkörper wurde zunächst in einer Beizlösung gebeizt. Im Anschluss wurde dieser in eine Aktivierungslösung und danach in eine Beschleuniger-Lösung getaucht. Bei dieser Methode wurden durch die Zerstörung des Schutzkolloids (Basis: Zinnoxidhydrat) die Edelmetallkeime freigelegt.

Bei beiden Arten der Aktivierung wurde an den freiliegenden Palladiumkeimen im Anschluss eine Nickelschicht aus einem Chemisch-Nickel-Elektrolyten (Firma Umicore) außenstromlos erzeugt. Die geschlossene Nickelschicht realisiert den Haftgrund für den weiteren Schichtaufbau.

Leitfähiger Lack
Als leitfähiger Lack wurde ein schnell trocknendes Leitsilber untersucht. Dieser wurde mit einem Pinsel auf die Testkörper aufgetragen. Der Leitlack ACHESON 1415 (Firma Plano) bestand aus sehr feinen Silberflocken (ca. 8 µm) und die Trocknungszeit bei Raumtemperatur betrug ca. 20 Minuten. Der Lack wurde vor Gebrauch gut geschüttelt, damit sich die Silberflocken in der Suspension gut verteilen.

Leitfähiges Spray
Es wurden zwei leitfähige Sprays untersucht. Das Graphitspray Graphit 33 und das Kupferspray EMV 35 (beide von der Firma Kontakt Chemie). Das Graphitspray bestand aus einem hohen Anteil von feinem und reinem Graphitpulver und das Kupferspray aus speziellen Pigmenten auf Acrylharzbasis. Die Sprays wurden vor dem Gebrauch sehr gut geschüttelt und danach auf die Testkörper gesprüht. Die Trocknungszeit betrug ca. 20 Minuten.

Leitfähiges Pulver
Als leitfähiges Pulver wurden das Graphitpulver Edelgraphit K17 (Firma Edelgraphit GmbH) und Silberpulver Silberflakes B190 (Firma AmiDoduco) untersucht. Sie wurden mit dem Pinsel einfach auf die Testkörper aufgepinselt.

4.1.2 Elektrolyte zur Einebnung (galvanischer Schichtaufbau)

Zur Einebnung der Ausgangsrauheit wurden galvanische Schichten (Kupfer- und Nickelschicht) aus dem Glanzkupferelektrolyt TB 10 (saures Medium, Firma Schlötter) und dem Nickelelektrolyten Slotonik 20 (Firma Schlötter) abgeschieden.
Die Auswahl der Elektrolyten richtete sich nach der zuvor aufgebrachten leitfähigen Startschicht.

4.1.3 Arbeitsbedingungen der Elektrolyte

Bekeimung 1 (ionogene Aktivierung):

	Elektrolyt	Zeit [min]	Temperatur [°C]
Aktivator	PDI 10	4	24
Chemisch Nickel	Nimuden 852	3 – 7	70 – 92*

Bekeimung 2 (kolloidale Aktivierung, HSO-Prozess):

	Elektrolyt	Zeit [min]	Temperatur [°C]
Beize	Kunststoffbeize PA	3 – 10	45
Aktivator	Aktivator U	2 - 24	25 - 28
Beschleuniger	HSO Beschleuniger	2 – 30	45 – 47
Chemisch Nickel	Nimuden 852	3 – 7	70 – 92*

Bekeimung 3 (kolloidale Aktivierung, SurTec-Prozess):

	Elektrolyt	Zeit [min]	Temperatur [°C]
Beize	SurTec 961	1 – 10	Raumtemperatur
Aktivator	SurTec 966	1 – 10	25
Beschleuniger	SurTec 969	2 – 15	55
Chemisch Nickel	Nimuden 852	3 – 7	70 – 92*
Chemisch Kupfer	Kupferelektrolyt 825	25	Raumtemperatur

*** Die optimale Betriebstemperatur liegt zwischen 88 und 92°C. Aufgrund der verschiedenen Werkstoffe und deren Eigenschaften wurde der Elektrolyt im Hinblick auf weitere Versuche bei der niedrigsten noch funktionierenden Betriebstemperatur untersucht. Diese lag bei 70°C.**

Kupfer- und Nickelelektrolyte:

	Elektrolyt	Zeit [min]	Stromdichte [A/dm²]	Temperatur [°C]
Glanzkupfer	TB 10	10 – 40**	4	Raumtemperatur
Nickel	Slotonik 20		5	55

**** Die Zeit wurde der Schichtdicke angepasst, die zur Einebnung der Ausgangsrauheit benötigt wurde.**

4.1.4 Untersuchungen an verschiedenen Testkörperwerkstoffen

Die Versuche wurden zunächst an den Testkörpern mit vier unterschiedlich, systematisch variierenden Gasverteilungsgeometrien durchgeführt. Für die Untersuchungen standen Testkörper aus Polyamid, Polystyrol, Wachs (TJ 88), verschiedene Polymerharztypen (NanoCure RCP 100 und AccuGen 100HC) und graphitgefülltem Polyamid zur Verfügung. Die Methoden wurden auf die Werkstoffeigenschaften der jeweiligen Testkörper abgestimmt und experimentell untersucht. Die Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht der untersuchten Werkstoffe und die Prozessschritte.

Tabelle 4.1: Übersicht der Werkstoffe und Prozessschritte

Testkörper	Methode	Leitfähige Startschicht	Elektrolyte zur Einebnung (galvanischer Schichtaufbau)
Polyamid	Bekeimung 1	ionogene Aktivierung + Nickel (chemisch)	Kupfer (sauer) und/ oder Nickel (Hochglanz)
	Bekeimung 2	kolloidale Aktivierung + Nickel (chemisch)	
Polyamid, Polystyrol, Nano-Cure RCP 100	Bekeimung 3	kolloidale Aktivierung + Nickel (chemisch)	
Polyamid	Leitfähiges Spray	Graphit- und Kupferspray	
Polyamid, Polystyrol, Wachs	Leitfähiger Lack	Silberleitlack	
Wachs	*Leitfähiges Pulver*	*Graphit- oder Silber-Pulver*	
graphitgefülltes Polyamid	-	-	

Bei dem Versuch die Testkörper aus Polyamid mit der ionogenen palladiumhaltigen Aktivierung (Bekeimung 1) zu aktivieren, sind keine Palladiumkeime auf der Oberfläche nachgewiesen worden. Daher gibt es hier keine Abbildung.
Auch die kolloidale Aktivierung (Bekeimung 2) führte nicht zum gewünschten Erfolg. Es konnten bei der Oberflächenbegutachtung im REM nur vereinzelte Palladiumkeime erkannt werden (Abbildung 4.2). Bei der EDX-Analyse der Keime konnten die Elemente Pd, Sn und Cl nachgewiesen werden (Abbildung 4.3). Die Keime reichen jedoch für eine vollständig geschlossene chemische Vernickelung der Testkörper nicht aus.

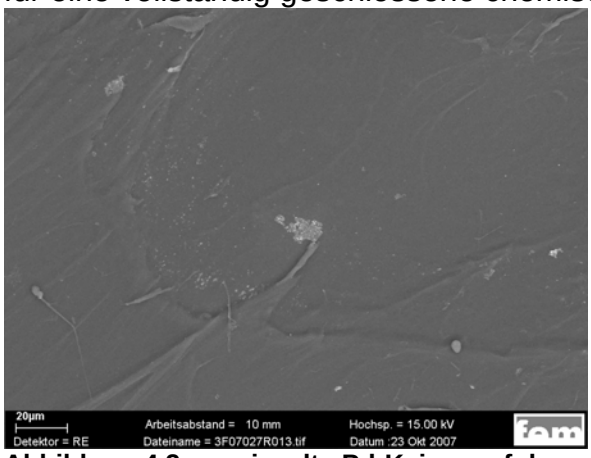


Abbildung 4.2: vereinzelte Pd-Keime auf der Polyamidoberfläche

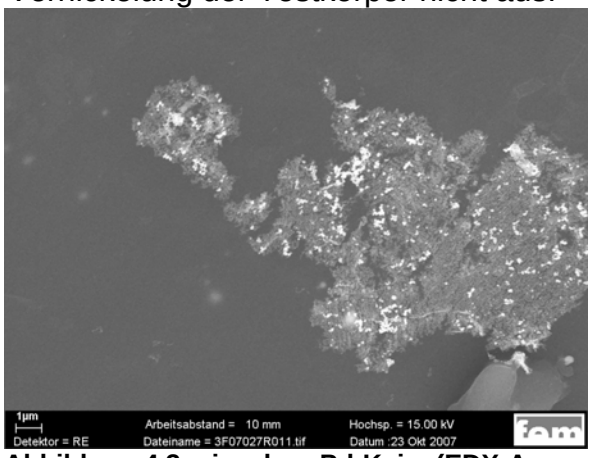


Abbildung 4.3: einzelner Pd-Keim (EDX-Analyse: Pd, Sn, Cl)

Die Versuche mit der kolloidalen palladium-zinnhaltigen Aktivierung (Bekeimung 3) zeigten, dass die Oberfläche der RP-Testkörper aus Polyamid (Abbildung 4.4) und Polystyrol mit sehr vielen Keimen belegt werden konnte. Die bekeimte Oberfläche konnte mit einem flächendeckenden Nickelüberzug, als leitfähige Startschicht, aus einem chemisch-reduktiv arbeitenden Elektrolyten außenstromlos beschichtet werden. Die darauf elektrolytisch abgeschiedene Kupferschicht lieferte jedoch bei dem Polyamid-Testkörper aufgrund der hohen Rauheit des Ausgangsmaterials keine eingeebneten Schichten (Abbildung 4.5). Diese sehr hohe Rauheit kann nicht alleine mit Hilfe eines galvanischen Mehrschichtaufbaus verbessert werden. Bei einigen Testkörpern konnte zudem eine schlechte Benetzbarkeit der Oberfläche beim Eintauchen in den Elektroly-

ten festgestellt werden. An den punktuell auftretenden unbenetzten Stellen konnte keine chemische Nickelschicht abgeschieden werden, da hier keine Pd-Keime angelagert werden konnten (Abbildung 4.6). Mit den Testkörpern wurden Untersuchungen zur Verbesserung der Benetzbarkeit mit Hilfe einer Plasmabehandlung durchgeführt.

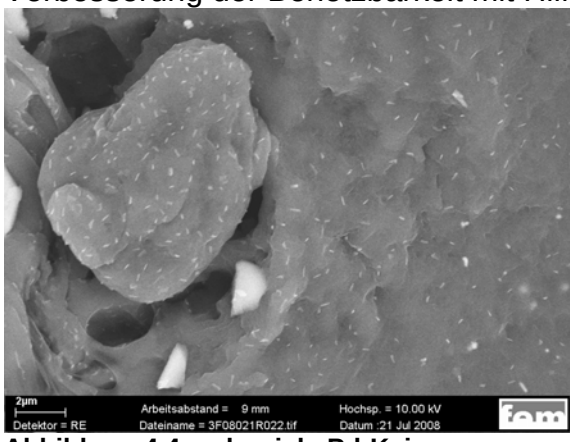


Abbildung 4.4: sehr viele Pd-Keime (REM Oberflächenaufnahme)

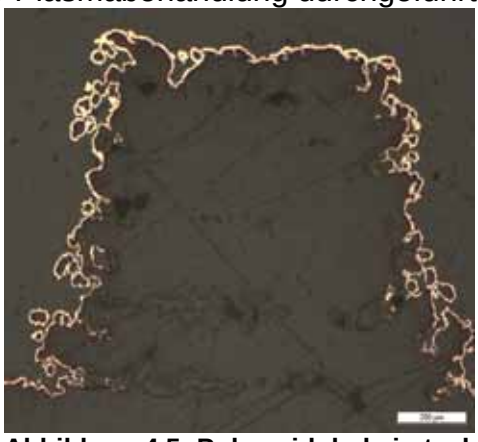


Abbildung 4.5: Polyamid; bekeimt, chem. Ni, verkupfert (sauer) - Querschliff

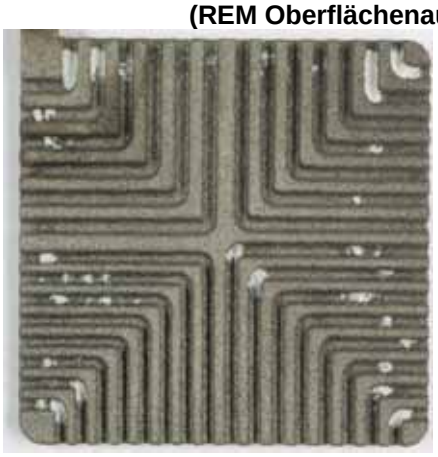


Abbildung 4.6: Polyamid, unbeschichtete Stellen Übersichtsaufnahme

Bei dem rauen und porösen Polystyrol-Testkörper ist das Ergebnis noch schlechter. Hier konnte das abgeschiedene Kupfer keine eingeebneten und geschlossenen Schichten (Abbildung 4.7) erzeugen. Eine mögliche Ursache hierfür könnte sein, dass es beim Eintauchen in die jeweiligen Elektrolyte zu einem Konzentrationsaustausch an der Diffusionsgrenzschicht kommt. D. h. der Elektrolyt 2 (Beschleuniger) diffundiert in die poröse Testkörper und der Elektrolyt 1 (Aktivator) diffundiert aus dem porösen Testkörper heraus. Durch den Austausch wird der Elektrolyt 2 an der Grenzschicht verunreinigt. Der Grad der Verunreinigung ist ausschlaggebend für die Funktionsweise des Elektrolyten 2. Mit steigender Verunreinigung nimmt die Möglichkeit einer Bekeimung ab.

Eine zweite Möglichkeit ist, dass die sehr große Rauheit des Ausgangsmaterials die gute Streufähigkeit des Elektrolyten verringert. Dies verhindert eine geschlossene Schicht an solchen Stellen, an denen die Rauheit sehr groß ist. Mit den Testkörpern wurden später noch Optimierungsversuche zur Verringerung der Ausgangsrauheit durchgeführt.

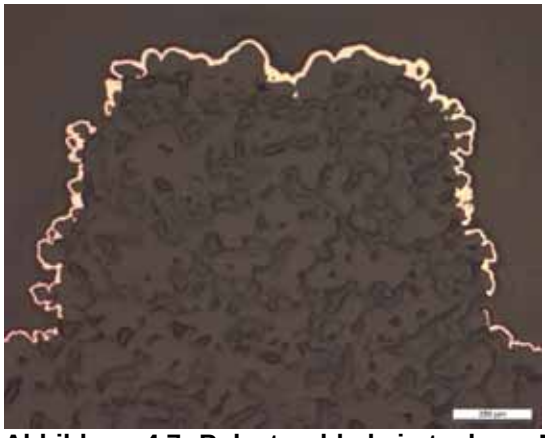


Abbildung 4.7: Polystyrol bekeimt, chem. Ni + verkupfert (sauer) - Querschliff

Die leitfähigen Sprays wurden an den Polyamid-Testkörpern untersucht. Die Graphitpartikel des Graphitsprays konnten beim Aufsprühen nicht homogen auf der Polyamidoberfläche verteilt werden. Eine durchgängige Leitfähigkeit der Startschicht ist somit nicht immer gewährleistet. Bei der Abscheidung aus dem sauren Kupferelektrolyt konnten nur partielle Kupferschichten auf dem Kunststoff abgeschieden werden.
Das verwendete Kupferspray besitzt eine gute Leitfähigkeit. Die Partikel wurden beim Applizieren jedoch nicht homogen auf den Polyamidoberflächen verteilt. Die gute Leitfähigkeit reichte oftmals nicht aus, um einen geschlossenen Nickelüberzug aus dem Glanznickelelektrolyt auf dem ungleichmäßig leitfähigen Testkörper abzuscheiden. Beide Sprays sind für das Vorhaben nicht geeignet und wurden nicht mehr weiter verwendet.

Die Verwendung des Silberleitlacks ist an den Testkörpern aus Polyamid, Polystyrol und Wachs untersucht worden. Der Lack konnte einfach und sauber auf die Oberflächen der verschiedenen Testkörper aufgebracht werden. Die Suspension aus sehr feinen Silberflocken (ca. 8 µm) und Lösungsmittel verteilte sich homogen auf der Testkörperoberfläche. Alle Werkstoffe konnten im Anschluss mit einer flächendeckenden Kupferschicht aus dem sauren Kupferelektrolyten beschichtet werden.
Mit Hilfe des Silberleitlacks konnte bei den Polyamid-Testkörpern die Rauheit des Ausgangsmaterials etwas reduziert werden (Abbildung 4.8).

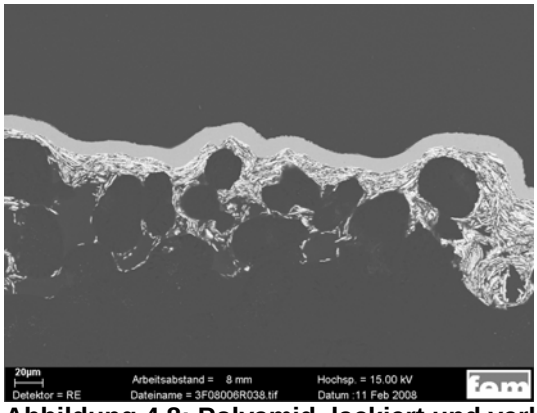


Abbildung 4.8: Polyamid, lackiert und verkupfert (sauer)

Die leitfähigen Pulver wurden an den Testkörpern aus Wachs untersucht. Beide Pulver konnten gut auf die Oberfläche aufgebracht und flächendeckend verkupfert werden (Abbildung 4.9).

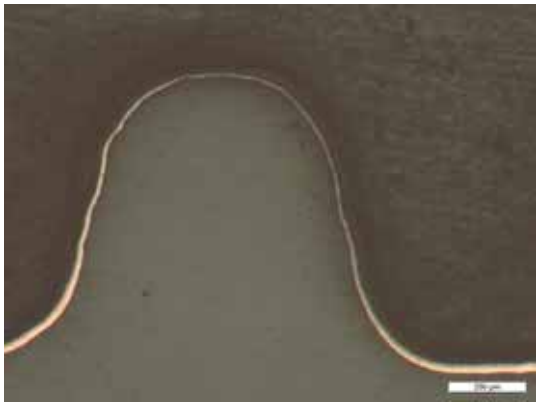


Abbildung 4.9: Wachs; graphitisiert + verkupfert

Mit dem Polymerharz Nanocure RCP 100 konnten die besten Ergebnisse erzielt werden. Die Testkörper konnten mit Palladium bekeimt und flächendeckend chemisch vernickelt werden (Abbildung 4.10). Im Anschluss konnte auf der vernickelten Oberfläche ohne Probleme aus dem Kupferelektrolyten eine geschlossene Kupferschicht abgeschieden werden (Abbildung 4.11). Die Testkörper besitzen eine relativ geringe Ausgangsrauheit.

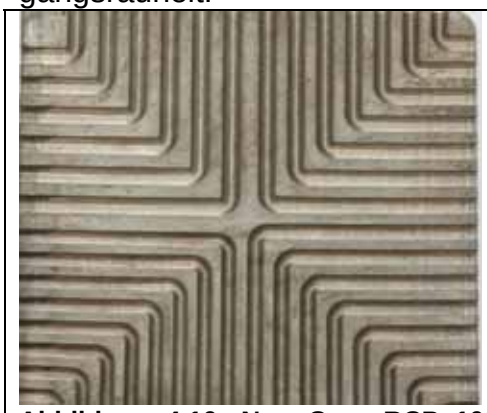


Abbildung 4.10: NanoCure RCP 100, bekeimt + chem. Ni

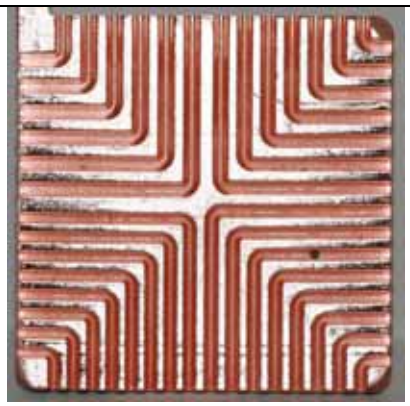


Abbildung 4.11: NanoCure RCP 100, bekeimt + chem. Ni + Cu (sauer)

Die Versuche mit dem graphitgefüllten Polyamid zeigten, dass die Leitfähigkeit des Graphits ausreichte, um direkt eine Kupferschicht aus dem sauren Kupferelektrolyten galvanisch abzuscheiden (Abbildung 4.12). Die Ausgangsrauheit der Testkörper ist genauso groß wie die bei den reinen Polyamid-Testkörpern. Hier kann die Rauheit auch nicht alleine mit Hilfe eines galvanischen Mehrschichtaufbaus verbessert werden.

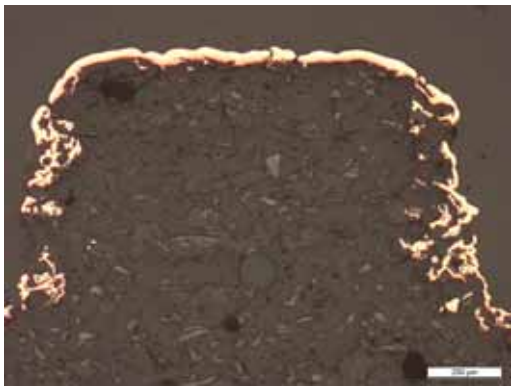


Abbildung 4.12: graphitgefülltes Polyamid, direkt verkupfert

4.1.5 Optimierung der Benetzungsfähigkeit der Polyamid-Testkörper

Bei den Vorversuchen wurde bei einigen Testkörpern festgestellt, dass die Bekeimung und somit eine durchgehend geschlossene Schicht mit dem chemischen Nickelelektrolyten nicht realisierbar war. Es wurden vereinzelte kleine Bereiche der Testkörperoberfläche nicht vernickelt.

Als Vorbehandlung der Polyamid-Testkörper wurde die Plasmabehandlung der Testkörperoberfläche durchgeführt und untersucht. Hierfür wurden die Testkörper mit 2 verschieden Prozessgasen in einer CVD-Anlage über einen bestimmten Zeitraum aktiviert. Im Anschluss wurden die Testkörper sofort bekeimt und chemisch vernickelt. Die Versuchsparameter der Plasmabehandlung können Tabelle 4.2 entnommen werden.

Tabelle 4.2: Versuchsparameter

Prozessgas	Gasfluss	Zeit	Leitfähige Startschicht
Ar	30 sccm	10 min	Bekeimung + chemisch Nickel
O_2	30 sccm		

Die Plasmabehandlung der Oberfläche mit den Prozessgasen Argon und Sauerstoff führte zu einer Verbesserung der Benetzbarkeit (Abbildung 4.13 und Abbildung 4.14). Dies zeigt der Vergleich mit einem nichtaktivierten, unter gleichen Bedingungen beschichteten, Testkörper (Abbildung 4.15).

Abbildung 4.13: mit Aktivierung (Ar)

Abbildung 4.14: mit Aktivierung (O2)

Abbildung 4.15: ohne Aktivierung

Optimierung der Oberflächenqualität der PA und PS - Testkörper

Die Oberflächenrauheit des Ausgangsmaterials der Polyamid - und Polystyrol-Testkörper war bei beiden Werkstoffen sehr hoch. Verantwortlich hierfür sind einzelne Polyamid-Körner (Pulveranhaftungen), die beim Herstellungsprozess an dem Testkörper kleben bleiben (Abbildung 4.16). Um die Rauheit zu verringern wurden die Testkörper mit einem ABS-Lack (Bondupal-2K-Verchromungsgrund) der Firma Lörken Lacke lackiert (tauchen und sprühen).

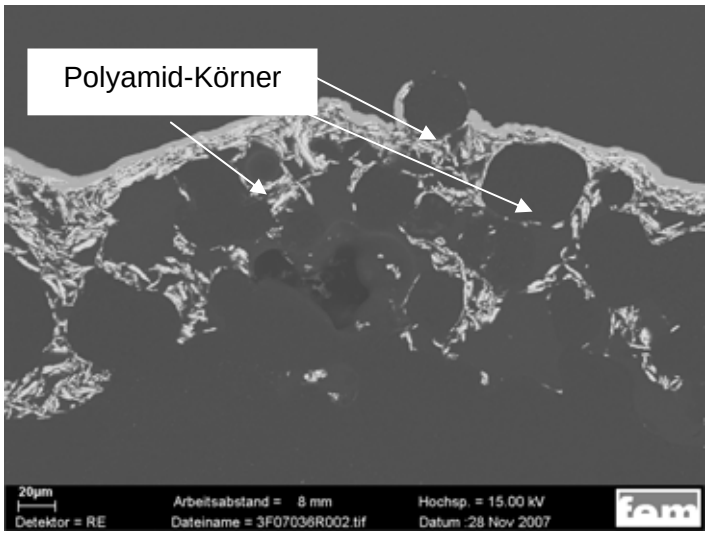


Abbildung 4.16: Polyamid-Körner an der Testkörperoberfläche

Die Polyamid-Testkörper konnten mit dem ABS-Lack auf beide Arten lackiert und anschließend gleichmäßig beschichtet werden. Es konnte eine deutliche Verringerung der Oberflächenrauheit mit dem ABS-Lack erzielt werden (Abbildung 4.17).

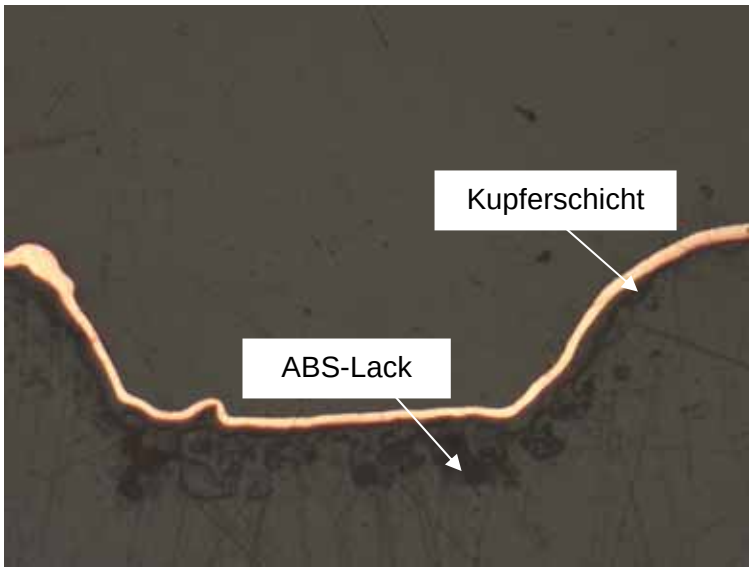


Abbildung 4.17: lackierter Polyamid-Testkörper

Es gab bei dieser Methode jedoch auch einen bedeutenden Nachteil. Zum einen verteilte sich der Lack nicht immer gleichmäßig und es kam zu dickeren Lackschichten in den Kanälen (Abbildung 4.18 und Abbildung 4.19). Ein Grund hierfür ist, dass das Material eine schlechte Benetzungsfähigkeit aufweist. Die Strukturtreue bei der Galvanoformung kann dadurch nicht wiedergegeben werden.

Abbildung 4.18: lackierter Polyamid-Testkörper ohne Benetzungsprobleme

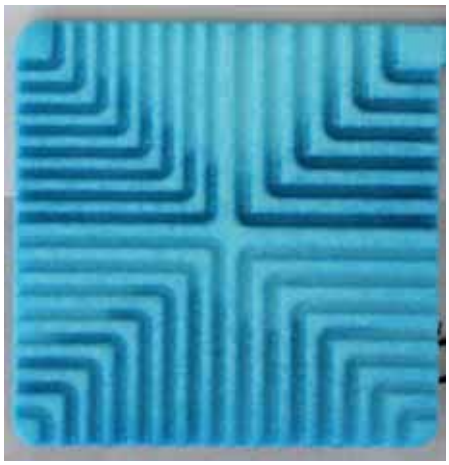


Abbildung 4.19: lackierter Polyamid-Testkörper mit Benetzungsproblemen

Der Polystyrol-Testkörper wurde von dem Lösemittel im ABS-Lack angegriffen und der Testkörper begann sich aufzulösen. Polystyrol ist nicht ABS-Lack beständig.

4.2 Optimierung der Trennschicht (Passivierung)

4.2.1 Funktion und Wirkungsweise der Trennschicht

Die Trennschicht zwischen dem vorbehandelten Testkörper (Positiv) und dem Werkzeug (Galvanoform, Negativ) hat die Funktion, dass die Haftung der abgeschiedenen Galvanoform reduziert wird und diese ohne Probleme von dem Positiv getrennt werden kann. Die Trennschicht wird durch das Eintauchen in eine Passivierungslösung erzeugt. Die Lösung passiviert die zuvor aufgebrachte Nickelschicht und reduziert so die Haftung der anschließend abgeschiedenen Galvanoform. Die Trennung der gewünschten Bauteile kann nun einfach und ohne großen Kraftaufwand bewerkstelligt werden. Bemerkung: Die Entformung des Positivs vom Negativ kann aber nur funktionieren, wenn keine hohe Oberflächenrauheit des Ausgangsmaterials vorliegt.

4.2.2 Passivierungs-Lösungen

Passivierung 1: 5% Natriumdisulfit-Lösung

Bestandteile	Tauchzeit [sec.]	Temperatur [°C]
Natriumdisulfit	30 – 60	Raumtemperatur

Passivierung 2: Eiweiß-Lösung

Bestandteile	Tauchzeit [sec.]	Temperatur [°C]
2g/l Albumin, 2 g/l Borax, 1g/l Netzmittel	30 – 60	Raumtemperatur

4.2.3 Untersuchung der Passivierungs-Lösungen

Die Wirkungsweise der zwei ausgewählten Passivierungslösungen wurde zunächst an strukturierten großen Messing-Testkörpern (Maße: 3,5 x 3,5 mm) durchgeführt. Die Testkörper wurden für die Untersuchungen am fem gefertigt. Im Anschluss wurde die optimierte Passivierungslösung für die Versuche an den verschiedenen Testkörpern aus dem Kapitel 4.1.4 verwendet. Die durchgeführten Arbeitsschritte können in Tabelle 4.3 nachgelesen werden.

Tabelle 4.3: Übersicht der Arbeitsschritte

Testkörper	Leitfähige Startschicht	Elektrolyte zur Einebnung (galvanischer Schichtaufbau)	Trennschicht	Galvanoformung
Messing	-	-	5% Natriumdisulfit-Lösung	Nickel (Sulfamat-Basis)
	-	-	Eiweiß-Lösung	
Polyamid	Kolloidale Bekeimung + chem. Nickel	Kupfer (sauer) Nickel (Hochglanz)		
Graphitgefülltes Polyamid	-	Kupfer (sauer) Nickel (Hochglanz)		
Lackiertes Polyamid	Kolloidale Bekeimung + chem. Nickel	Kupfer (sauer) Nickel (Hochglanz)		
Wachs	Silberleitlack	-	-	
	Graphitpulver	-	-	
NanoCure RCP 100	Kolloidale Bekeimung + chem. Nickel	Kupfer (sauer) Nickel (Hochglanz)	Eiweiß-Lösung	

Die Versuche mit den Messing-Testkörpern zeigten, dass die Passivierungslösung 2, also die Eiweiß-Lösung, am besten funktioniert hat. Die Trennung der Galvanoform (Negativ) von dem Testkörper (Positiv) konnte mit dieser Passivierungslösung ohne großen Kraftaufwand durchgeführt werden. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass Strukturen des Testkörpers in der Galvanoform 1:1 nachgebildet werden.

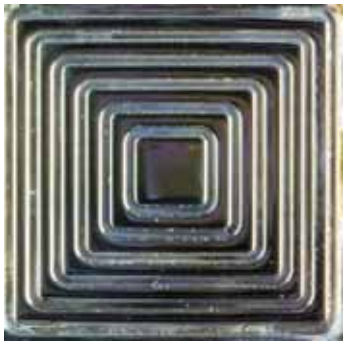


Abbildung 4.20: vernickeltes Messing-Positiv (Positiv)

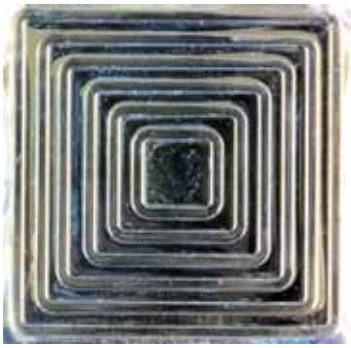


Abbildung 4.21: Galvanoform

Die Ergebnisse mit dem graphitgefüllten Polyamid zeigen, dass die Ausgangsrauheit nicht mit Hilfe des aufgebrachten einebnenden galvanischen Mehrschichtaufbaus verbessert wurde (Abbildung 4.22). Die Galvanoform konnte trotz des zusätzlichen Mehr-

schichtaufbaus aufgrund zu hoher Rauhigkeit in den Kanälen (Markierung) nicht von dem Testkörper getrennt werden. Der Spalt zwischen der passivierten hocheinebnenden Nickelschicht und der Galvanoform zeigt jedoch, dass die Passivierungslösung funktioniert hat. Ohne die störenden Schichtaufbauten hätte die Galvanoform von dem Testkörper getrennt werden können. Der Werkstoff ist aufgrund der zu hohen Rauheit für das Vorhaben nicht geeignet und wurde nicht weiter untersucht.

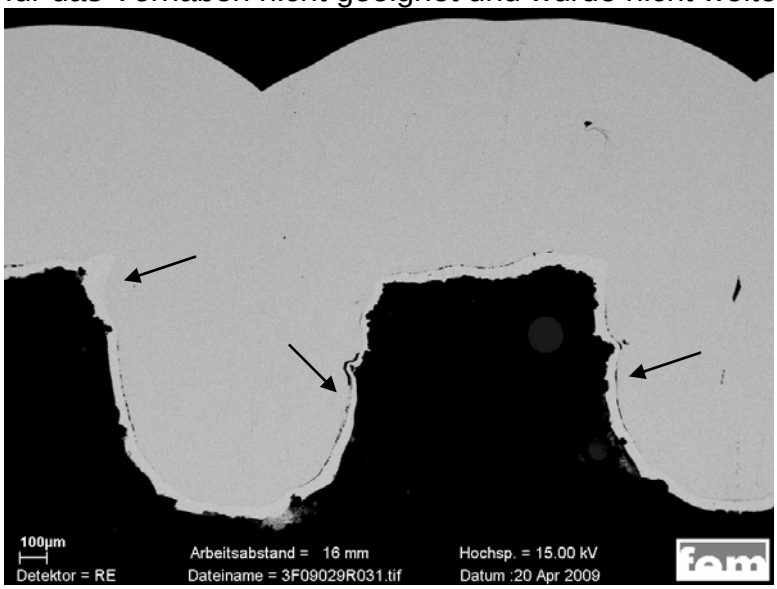


Abbildung 4.22: Entformungsversuch: graphitgefüllten Polyamid und Galvanoform

Die Versuchsdurchführung mit den Wachs-Testkörpern konnte aufgrund der guten Oberflächenqualität der Testkörper vereinfacht werden. Bei der Galvanoformung wurde daher auf einen einebnenden Schichtaufbau und eine Trennschicht verzichtet. Auf die Trennschicht wurde deshalb verzichtet, da die Wachs-Testkörper einfach herausgeschmolzen wurden.

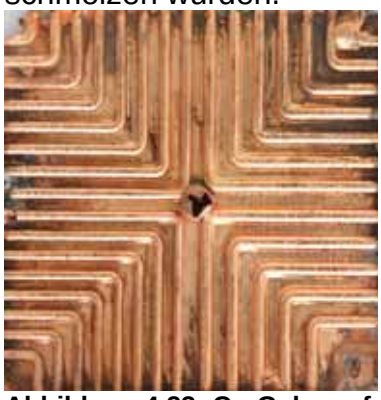


Abbildung 4.23: Cu-Galvanoform Wachs

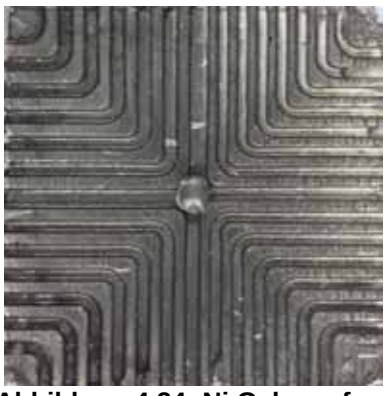


Abbildung 4.24: Ni Galvanoform Wachs

Bei den Untersuchungen mit dem Werkstoff NanoCure RCP 100 konnten die Galvanoformen ohne großen Kraftaufwand von dem Testkörper getrennt werden. Die geringe Oberflächenrauheit des Werkstoffs war für die Entformung von großem Vorteil.

Abbildung 4.25: Galvanoform Nanocure

4.3 Galvanoformung

Bei der Galvanoformung wird mit Hilfe des Testkörpers (Positiv) durch Abformung eine Galvanoform (Negativ) hergestellt. Die 5 – 8 mm dicke Galvanoform wird aus einem sulfamathaltigen Nickelelektrolyten abgeschieden. Nach der Abscheidung kann das Positiv einfach von dem Negativ getrennt werden.

4.3.1 Verwendeter Elektrolyt

Für die Galvanoformung wurde ein Nickelsulfamat-Elektrolyt der Firma Schlötter verwendet Der Elektrolyt wurde, bis auf das vom Hersteller vorgeschlagene Netzmittel (Slotonik 20, Konzentrationsbereich 4 – 6 ml/l) ohne weitere Zusätze betrieben. Die Abscheidungen wurden bei niedrigen Stromdichten (optimal 1,8 A/dm²) durchgeführt, um den Einbau von Spannungen in die Galvanoform zu verringen. Mit dem Nickelsulfamat-Elektrolyten konnten Galvanoformen mit Härten von 276 bis 282HV 0,5 erzielt werden.

4.3.2 Versuchsaufbau

Für die Galvanoformungsversuche an den Bipolarplatten wurde extra eine kleine Versuchsanlage gebaut (Abbildung 4.26 und Abbildung 4.27).
Zur Filtration wurde ein grober Filter (Maschenweite 5 µm) und ein feiner Filter (Maschenweite 0,5 µm) verwendet, zusätzlich bestand die Möglichkeit einen Aktivkohlefilter im Bypass zu verwenden (Abbildung 4.28). Die Elektrolytanströmung konnte stufenlos geregelt werden (Abbildung 4.29).

Abbildung 4.26: Versuchsanlage für die Galvanoformung

Abbildung 4.27: Elektrolytbehälter (links), Temperaturregler für die Heizung (Mitte), Stromversorgung (Galvanostat, rechts)

Abbildung 4.28: Pumpe mit drei Filtereinheiten (mit einem groben und einem feinen Filter und Aktivkohlefilter)

Abbildung 4.29: Elektrolytwanne mit stufenloser Anströmung

4.3.3 Optimierung der Stromdichteverteilung mit Hilfe von Blenden

Die Stromdichteverteilung spielt bei der galvanischen Abscheidung eine wichtige Rolle. Eine Simulation der Stromdichteverteilung wurde mit Hilfe des Simulationstools Cell-Design 2000 der Firma L-Chem aus Ohio durchgeführt, mit dem sich Stromdichte- und Schichtdickenverteilung im 2D-Schnitt darstellen lassen.

Es kann daraus die notwendige Schichtdicke des galvanischen Schichtaufbaus zur Einebnung bestimmt werden. Auch die Kantenverrundungen, die bei dickeren Schichten auftreten, können bei der Simulation berücksichtigt werden. Mit den Ergebnissen der Simulation kann die Schichtdickenverteilung mit Hilfe von gezielt eingesetzten Blenden optimiert werden. Die für den Entformungsprozess störenden Schichtaufbauten und Hinterschneidungen können somit vermieden werden.

Vor dem Galvanoformungsprozess mit den Bipolarplatten-Testkörpern wurden Simulationen der Schichtdickenverteilung durchgeführt. Die Abbildung 4.30 zeigt die Stromdichteverteilung im 2D-Schnitt nach einer simulierten Abscheidung. Die rot markierte Anode liegt der blau markierten Kathode, dem Testkörper, gegenüber. Die ge-

zeichneten Linien (außen) stellen die Galvanoformungszelle (Isolator), in der sich der Testkörper befindet, dar.
Die örtliche Stromdichte ist abhängig von den Feldlinien, die sich zwischen der Anode und der Kathode bilden. Diese Feldlinien konzentrieren sich an den Spitzen, Ecken und Kanten des Bauteils, während sie sich in den Vertiefungen (Kanälen) vermindern. Somit herrscht an den Spritzen eine größere Niederschlagsdichte. Durch die gezielte Positionierung der Blenden kann nun die Stromdichteverteilung und damit die Schichtdickenverteilung über der Testoberfläche bei der Abscheidung gleichförmiger gestaltet und verbessert werden.

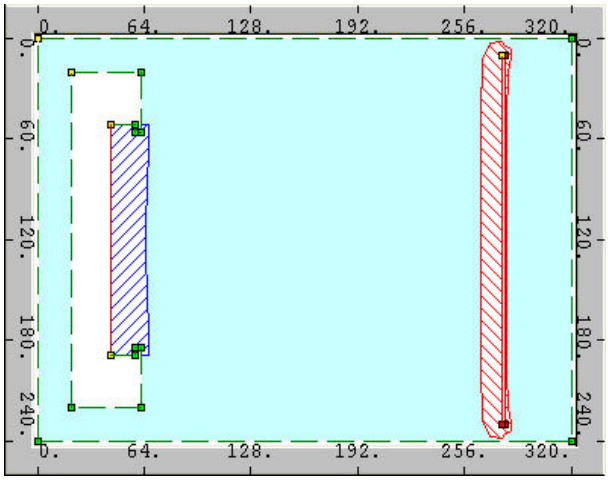


Abbildung 4.30: Stromdichteverteilung nach der Simulation

In Abbildung 4.31 sind die Abwicklungen der Schichtdickenverteilung entlang der x-Koordinaten aus dem vorherigen 2D-Schnitt dargestellt. Die grüne Linie zeigt die Schichtdickenverteilung ohne Verwendung einer Blende und die gelbe Linie unter gleichen Bedingungen mit einer Blende. Die Schichtdickenverteilung konnte mit Hilfe einer gezielt positionierten Blende auf +/- 3% optimiert werden.

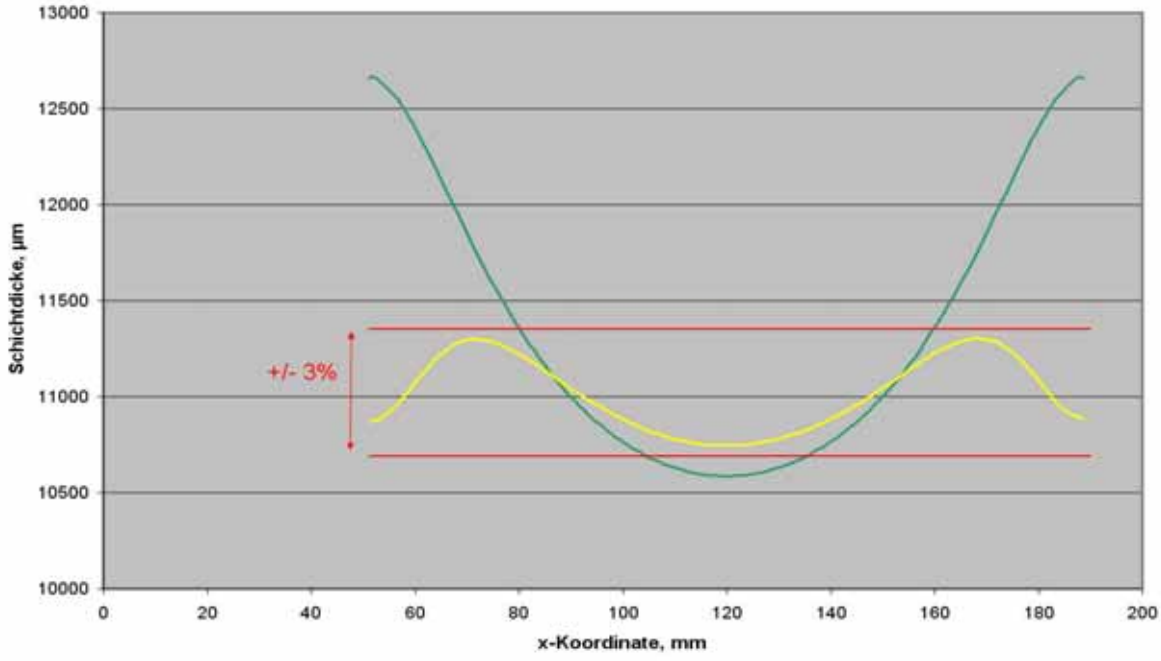


Abbildung 4.31: Abwicklungen der Schichtdickenverteilung entlang der x-Koordinaten aus dem vorherigen 2D-Schnitt.

4.3.4 Konstruierte Zellen für die Galvanoformung

Aus den zuvor gewonnenen Ergebnissen der Simulation wurde für die Galvanoformungszelle 1 eine Blende konstruiert und so auf dem Rahmen befestigt und positioniert, dass man die optimale simulierte Schichtdickenverteilung erhielt.
Die Zelle besteht also aus fünf Einzelteilen (Abbildung 4.32). Dem Rahmen, der Kontaktierung, der Dichtung, dem Deckel und der Blende. Die Blende, der Rahmen und der Deckel sind aus Kunststoff. Als Kontaktierung der Bauteile diente eine Kupferplatte. Die Öffnung zeigte die Fläche des Testkörpers, der abgeformt werden soll.

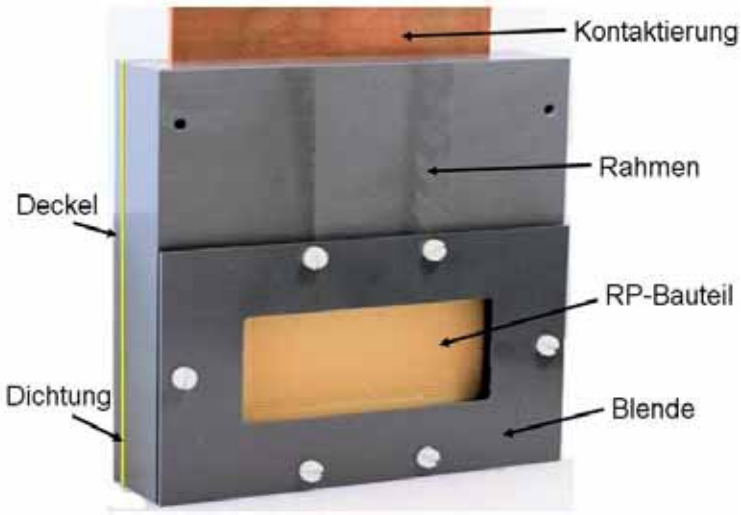


Abbildung 4.32: Galvanoformungszelle 1

Die Galvanoformungszelle 2 wurde erst nach mehreren Versuchen mit der Zelle 1 angefertigt (Abbildung 4.33). Beim Start des Projektes wurde noch geplant, die Geometrie des Spritzgusswerkzeuges genau an die des Werkzeugeinsatzes anzupassen, um das mechanische Nacharbeiten der Galvanoform zu umgehen. Im Laufe des Projektes wurde nach Absprache mit dem ZBT beschlossen, die Geometrie des galvanogeformten Werkzeuges zu verändern. Nach der Galvanoformung sollte die Form nachbearbeitet werden. Dies erleichterte den Abscheidungsprozess enorm. Die Zelle 2 bestand nur aus einem Rahmen und wurde im Gegensatz zur Zelle 1 für jeden Versuch neu gefertigt, da die Testkörper genau eingepasst wurden.

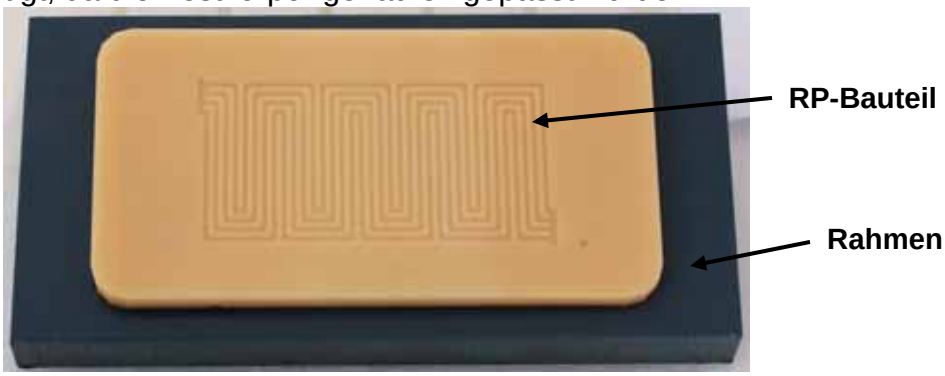


Abbildung 4.33:Galvanoformungszelle 2

4.3.5 Untersuchung der inneren Spannungen

Bei der elektrolytischen Abscheidung entstehen in den Metallschichten mechanische Spannungen. Deren Größe wird von verschiedenen Punkten beeinflusst. Dazu gehö-

ren die Unterschiede in den Gitterkonstanten von Substrat und Schicht, die Abscheidungsparameter, die Art und der Zustand des Elektrolyten. Es können sowohl Druck- und Zugspannungen auftreten. Man spricht von Druckspannungen, wenn die nachfolgenden Schichten mehr Raum beanspruchen als die vorher abgeschiedenen und von Zugspannungen, wenn die nachfolgenden Schichten weniger Raum benötigen als die vorangegangenen.
Die Untersuchungen wurden mit MSM 200 (Eigenbau fem) durchgeführt. Das MSM 200 ist ein in-situ-Messsystem für innere Spannungen in galvanischen Überzügen. Untersucht wurden der in der Anlage verwendete Nickelsulfamat-Elektrolyt und jeweils ein Neuansatz mit verschiedenen Netzmittelkonzentrationen. Die Abscheidebedingungen (Stromdichte, Rührung, Temperatur und Abscheidezeit) wurden für einen späteren Vergleich bei allen Versuchen konstant gehalten. Die Ergebnisse wurden zusammengefasst und können in Abbildung 4.34 angeschaut werden.
Das Ergebnis des netzmittelfreien Neuansatzes zeigte, dass keine inneren Spannungen in der abgeschiedenen Nickelschicht vorliegen.
Gibt man nun das Netzmittel Slotonik 20 dazu und erhöht Konzentration schrittweise von 1 auf 8 ml/l, dann nimmt mit zunehmender Netzmittelkonzentration der Wert der Druckspannungen (negatives Vorzeichnen) zu. Die Werte der Druckspannungen liegen jedoch dicht beieinander.
Der Nickelelektrolyt aus der Anlage liefert hingegen Schichten mit Zugspannungen (positives Vorzeichnen). Dies kann mehrere Ursachen haben, z.B. die Verunreinigung des Elektrolyten durch Schmutz oder durch das Herauslösen von Komponenten aus den Testkörpern.

Die Ergebnisse der Versuche haben verdeutlicht, dass die Kontrolle des Elektrolytverhaltens während der Abscheidung von großer Bedeutung ist, denn eine Formtreue der Galvanoform kann nur mit spannungsarmen Schichten erzielt werden.

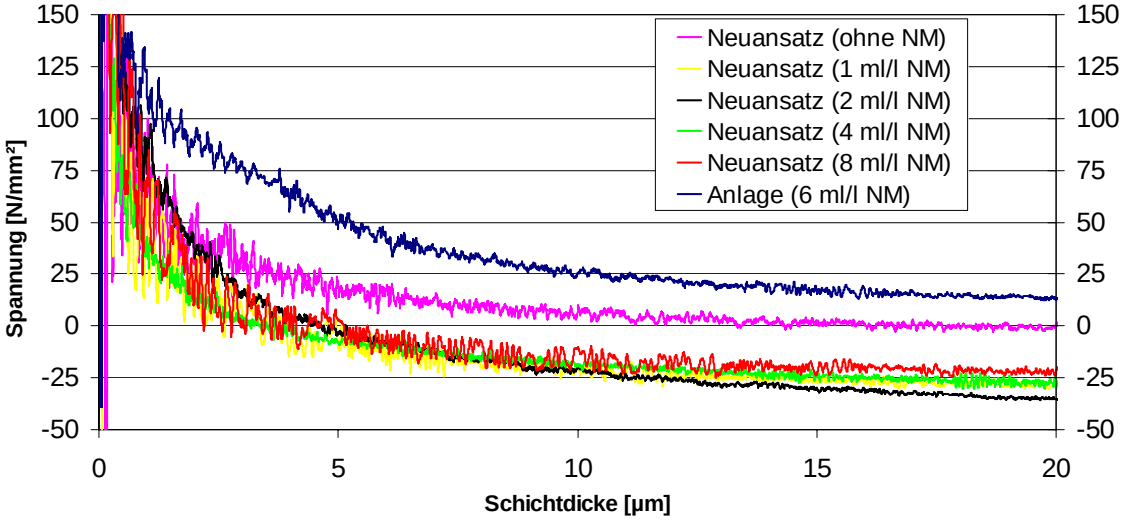


Abbildung 4.34: Verlauf der inneren Spannungen in mit verschiedenen Netzmittelkonzentrationen abgeschiedenen Nickelniederschläge

4.3.6 Untersuchungen der Bipolarplatten-Testkörper

Die ersten Untersuchungen wurden mit einer Kupferplatte, in die das Bipolarplatten-Design am ZBT gefräst wurde, durchgeführt (Abbildung 4.35 und Abbildung 4.36). An der Kupferplatte sollte schnell und ohne großen Aufwand die Funktionalität der ausgewählten Passivierungslösung an dem Bipolarplatten-Design untersucht werden.

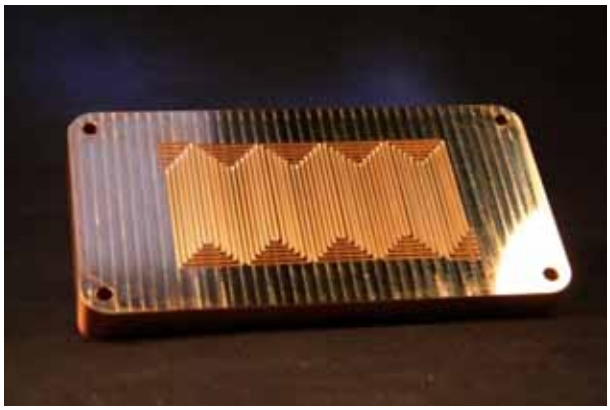


Abbildung 4.35: Gefräster Kupfer-Träger

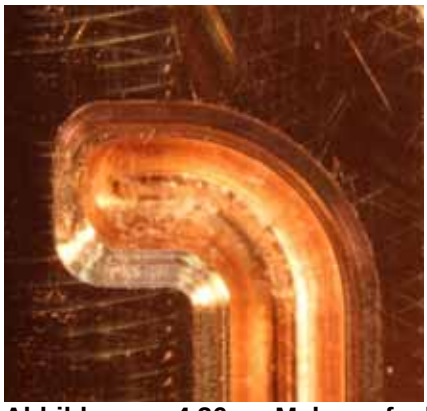


Abbildung 4.36: Makroaufnahme einer Flowfield-Nut

Im Anschluss wurden die Versuche mit Bipolarplatten-Testkörpern (Design des Spritzgusswerkzeugs) aus den geeigneten Werkstoffen untersucht. Zur Verfügung standen die ausgewählten Testkörper aus dem Wachs TJ88 und dem Photopolymer AccuGen 100HC. Die durchgeführten Arbeitsschritte können in Tabelle 4.4 nachgelesen werden. Die Dicke der Galvanoformen wurde vom ZBT vorgegeben. Die Form musste mindestens 7 mm dick sein, damit die Rückseite plan gefräst und die Gewindebohrungen für den Einbau und die Fixierung der Platte eingebracht werden konnten (siehe Kapitel 5).

Tabelle 4.4: Übersicht der Arbeitsschritte

Testkörper	**Leitfähige Startschicht**	**Elektrolyte zur Einebnung (galvanischer Schichtaufbau)**	**Trennschicht**	**Galvanoformung**
Wachs	Graphitpulver	-	-	Nickel (Sulfamat-Basis)
	Silberleitlack			
Polymerharz	Silberleitlack			

Die Untersuchungen der Eiweiß-Lösung an der Kupferplatte zeigten, dass die Lösung auch bei Testkörpern im Bipolarplatten-Design gut funktioniert hat. Die Galvanoformen konnten von der Kupferplatte entformt (Abbildung 4.37) und die Kupferplatte für weitere Versuche wieder verwendet werden.

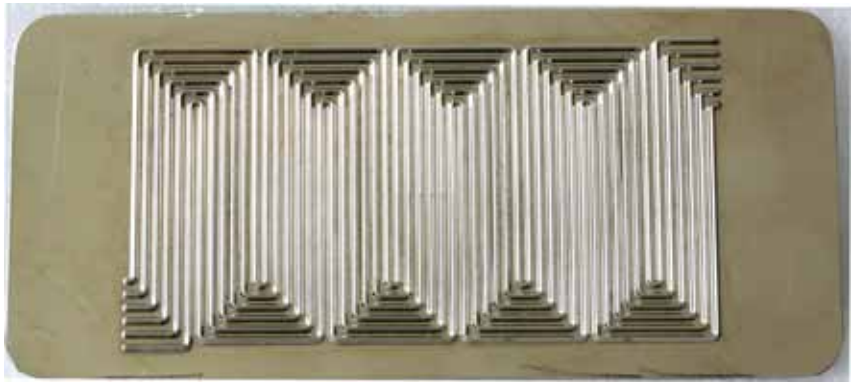


Abbildung 4.37: Galvanoform von der Kupferplatte

Mit den Bipolarplatten-Testkörpern aus Wachs konnten ebenfalls Galvanoformen hergestellt werden, die jedoch nie die ausreichende Dicke hatten, um damit Spritzgussversuche durchzuführen.

Zusätzlich zu den Versuchen am fem wurden auch Versuche bei der Firma Galvanoform (Mitglied im Projektbegleitenden Ausschuss) durchgeführt. Es wurden zwei Wachs-Testkörper an die Firma geschickt und dort abgeformt. Die Galvanoformen mit der Kennzeichnung Galvanoform 4 (Abbildung 4.38) und 5 (Abbildung 4.39) wurden an das fem zurückgeschickt und an das ZBT für die ersten Spritzgussversuche weitergeleitet. (siehe Kapitel 5)

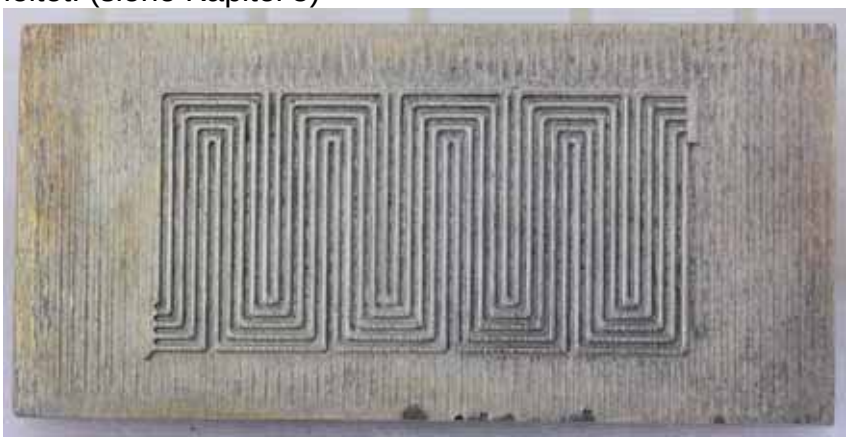


Abbildung 4.38:Galvanoform 4 (gefertigt bei Firma Galvanoform in Lahr)

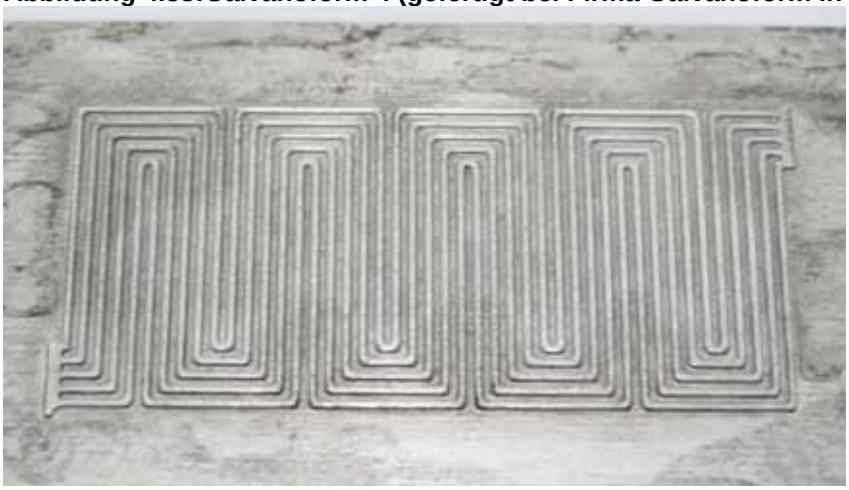


Abbildung 4.39: Galvanoform 5 (gefertigt bei Firma Galvanoform in Lahr)

Das Photopolymer AccuGen 100HC wurde kurz vor Projektende gefertigt und für Beschichtungsversuche zur Verfügung gestellt. Mit diesem Testkörper konnten daher im Voraus keine Beschichtungsversuche durchgeführt werden. Aufgrund der Ergebnisse aus den vorherigen Untersuchungen wurde hier mit einem Silberleitlack als leitfähige Startschicht gearbeitet. Auf einen Schichtaufbau wurde wegen der geringen Oberflächenrauheit verzichtet, sowie auf eine Trennschicht und die Galvanoform direkt auf dem Lack abgeschieden. Die Entformung der Galvanoform vom Testkörper erfolgte mit Hilfe von Aceton. Durch das Aceton wurde die Silberleitlackschicht angelöst und die Haftung aufgehoben.
Die Galvanoform war für die Weiterverarbeitung zu einem Spritzgussformeinsatz dick genug und wurde für die Spritzgussversuche nach Duisburg ans ZBT geschickt (Abbildung 4.40 und Abbildung 4.41).

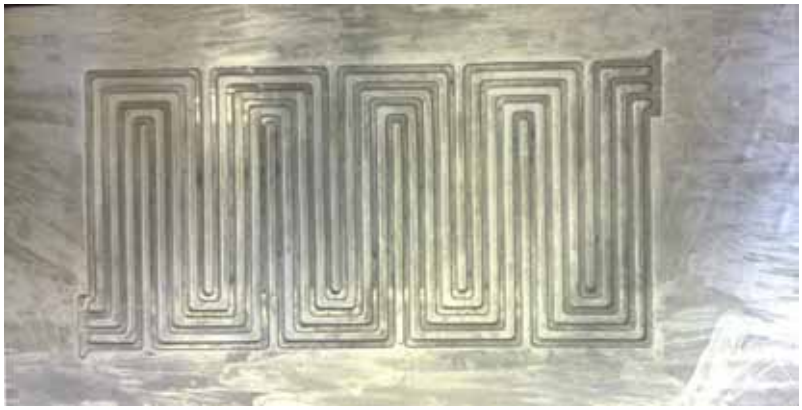


Abbildung 4.40: Galvanoform 7 AccuGen 100HC

Abbildung 4.41: Galvanoform 7 AccuGen 100HC, Detail

5 Weiterentwicklung des Flowfield-Designs und Spritzgießprozess

5.1 Einleitung

Mit den Erfahrungen in der Herstellung und Verarbeitung hochgefüllter Graphit-Compounds sowie der Entwicklung und Konstruktion von Bipolarplatten und Brennstoffzellenstacks wurden innerhalb der ersten Projektphase verschiedene Bipolarplattendesigns entwickelt und für den Bau erster RP-Positive beim IPE herangezogen. Diese wurden bezüglich Oberflächenqualität, in enger Absprache mit dem fem und IPE optimiert. Darauf basierend wurden finale Versionen von Flowfield-Designs konstruiert, welche bereits interessante Alternativen zu dem Standard-Design darstellen, aber auch in Hinblick auf verwendete RP-Verfahren optimiert sind. Damit einhergehend wurde das Fundament zur Aufnahme der Galvanoform entwickelt, welches anstatt des Standardformeinsatzes in dem Spritzgießwerkzeug montiert wird. Nach Fertigstellung einer geeigneten Galvanoform und der dazugehörigen Aufnahme sind erste Kleinserien spritzgießtechnisch hergestellt worden.

5.2 Design der Bipolarplatten

In einem ersten Schritt wurde ein Testkörper entworfen, welcher auf einer Fläche von 33 x 33 mm² 4 unterschiedliche, systematisch variierte Gasverteilungsgeometrien, auf Basis der etablierten ZBT Geometrie, beinhaltet (Abbildung 5.1). Dadurch ist es möglich, den Einfluss unterschiedlicher Geometrien auf den Bauprozess und die Oberflächenqualität anhand eines einzigen kleinen Probenkörpers zu ermitteln. Die Kanalgeometrien wurden, dem Entformungsprozess des galvanischen Dickschichtauftrags vom RP-Teil und der Bipolarplatte vom Spritzgießwerkzeug entgegenkommend, mit entsprechenden Entformungsschrägen und Verrundungen ausgelegt.

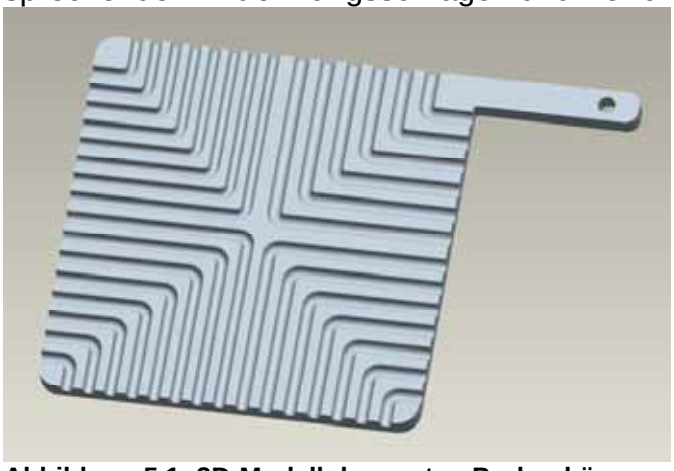


Abbildung 5.1: 3D-Modell des ersten Probenkörpers

Anhand dieser Geometriedaten wurden erste Testkörper beim IPE aus Polyamid und Polystyrol erstellt und bezüglich Oberflächenqualität beim ZBT mittels eines berührungslosen optischen 3D Messverfahrens untersucht.
Im Rahmen eines ersten Projekttreffens wurde eine Anpassung der Testkörpergeometrie beschlossen, um dem RP-Prozess entgegenzukommen (Abbildung 5.2).

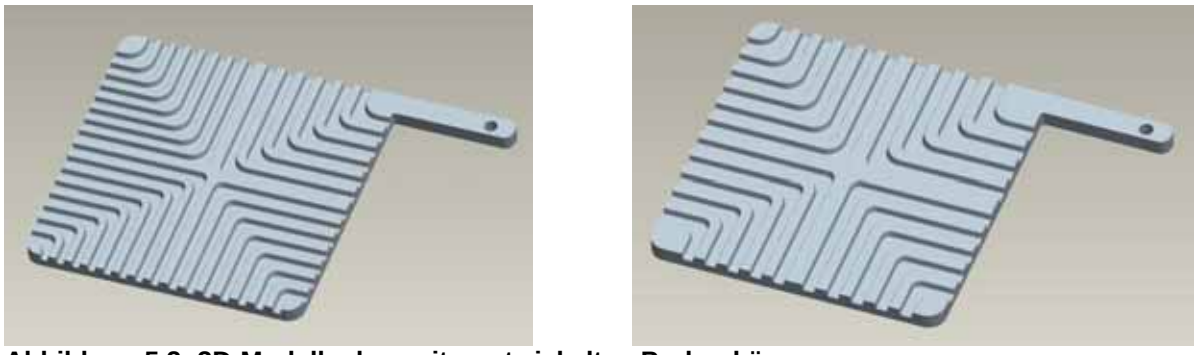


Abbildung 5.2: 3D-Modelle der weiterentwickelten Probenkörper

Demnach wurden die Nutgrundradien reduziert sowie die Kanalquerschnittsfläche im Bereich der Richtungswechsel vergrößert, indem der Kurveninnenradius größer als der Außenradius definiert wurde. Dies sollte nicht nur dem RP-Prozess entgegenkommen, sondern auch im Brennstoffzellenbetrieb für einen geringeren Druckverlust und für eine homogenere Gasströmung im Bereich der Richtungswechsel sorgen. Darüber hinaus wurde in diesem Rahmen ein weiterer Testkörper erstellt, welcher durch Vergrößerung der Nutmittenabstände und Kanalbreiten 4 gröbere Kanalgeometrien aufweist. Die gröberen Geometrien sorgen für eine bessere Entformbarkeit sowohl beim Spritzgießen wie auch bei der Herstellung des Formeinsatzes, jedoch bewirken sie auch potentiell schlechtere Betriebseigenschaften der Brennstoffzelle aufgrund der gröberen Medienverteilung. Jede dieser 12 unterschiedlichen Kanalgeometrien lässt sich auf das Standard-ZBT-Bipolarplattendesign übertragen.

Im Laufe der Optimierung der Oberflächen und nach Festlegung der Außenkontur der bearbeiteten Galvanoform wurden 2 finale Designs mit 4 bzw. 5 Nuten anstatt der üblichen 6 Nuten auf die Bipolarplatte (Abbildung 5.3) übertragen. Die Nutenanzahl wurde reduziert, um das voraussichtlich schlechtere Entformungsverhalten zu kompensieren. Dabei wurde das Nut- Stegbreitenverhältnis identisch gehalten, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die CAD-Modelle sind dabei voll parametrisch und formelbasiert aufgebaut, um notwendige Anpassungen der Geometrie mit geringem Aufwand zeitnah durchführen zu können.

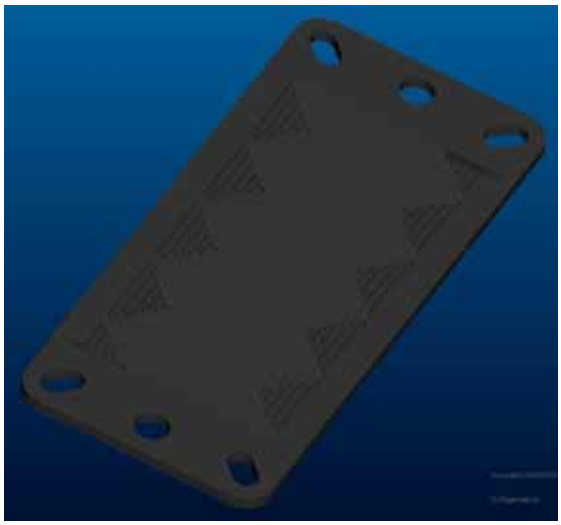


Abbildung 5.3: CAD-Modell der Bipolarplatte mit 5 Nuten

Der bereits in den Probenkörpern enthaltene modifizierte Umlenkungsbereich wurde ebenfalls in den Nutstrukturen der Bipolarplatten vorgesehen. Darüber hinaus wurde der Gaseinlassbereich modifiziert (Abbildung 5.4), um zum Einen das Einströmverhal-

ten der Gase zu verbessern und zum Anderen die Nachbearbeitung der Bipolarplatten zu vereinfachen. Sollte ein Grat entstehen, müsste dieser nicht maschinell spanend entfernt werden, da eine manuelle Entgratung ausreichend wäre.

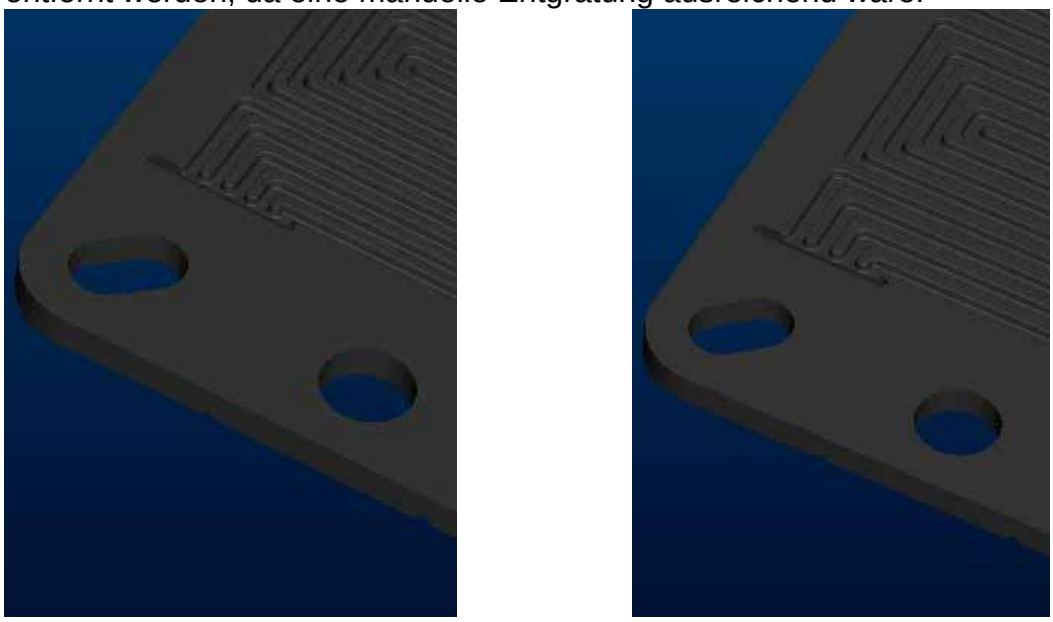


Abbildung 5.4: Gaseinlassbereich mit 5 bzw. 4 Nuten

5.3 Werkzeugaufnahme

Das am ZBT vorhandene Spritzgießwerkzeug zur Herstellung von Bipolarplatten in den Abmessungen 137,5 mm x 62 mm besteht pro Seite aus einer Rahmenplatte und einem Formeinsatz in Artikelgröße (Abbildung 5.5). Beide Teile sind mit Kühlbohrungen versehen, um die eingebrachte Wärme der Schmelze abzuführen und das Formteil auf Auswerftemperatur abzukühlen.

Abbildung 5.5: Rahmenplatten und Formeinsätze der Auswerfer- und Düsenseite

Zur Variation des Flowfields mit galvanogeformten Formeinsätzen ist somit eine Konstruktion nötig, welche aus einer Werkzeugaufnahme (Fundament) von der Größe der Formeinsätze mit Kühl-, Auswerferstiftbohrungen und einer Befestigungsmöglichkeit für eine Galvanoform besteht.

Dabei müssen sowohl die Galvanoform wie auch das Fundament hohe Anforderungen erfüllen. Sie müssen über eine hohe Verschleißfestigkeit verfügen, um den Einspritzdrücken von ca. 3000 bar bei Einspritzgeschwindigkeiten von mehr als 500 cm^3/s unter dem Einsatz von höchstgefüllten Graphit-Compounds mit abrasiven Bestandteilen in Form von Rußen bzw. CNT dauerhaft standhalten zu können. Eine hohe Temperaturbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit müssen ebenfalls gewährleistet sein, da die Schmelze mit bis zu 400 °C in die Form gespritzt und anschließend innerhalb von 5 Sekunden auf eine Entformungstemperatur unter 100 °C gebracht wird. Vor allem der Wärmeübergang, zwischen der nur passiv gekühlten Galvanoform und dem Fundament, spielt eine entscheidende Rolle, dieser kann gegebenenfalls durch Einsatz von Wärmeleitpaste oder stoffschlüssigen Fügeverfahren verbessert werden. Darüber hinaus muss vor allem die Galvanoform über ausgeprägte Entformungsschrägen und Verrundungen verfügen, da sonst die BPHP nicht sauber entformt werden können und es zu Sprödbrüchen und Rissbildungen kommen kann. Die Oberfläche muss für gute Formfülleigenschaften und Entformbarkeit möglichst poliert sein.
Auf schlechtere Oberflächenbeschaffenheiten kann durch die Auswahl des Flowfielddesign mit 4 Nuten reagiert werden.
Die Galvanoform muss solide, mit einer möglichst reversiblen Methode, an dem Fundament befestigt werden können. Somit disqualifizieren sich stoffschlüssige Verfahren wie Kleben und Schweißen, weil damit pro Galvanoform ein Fundament nötig wäre, was wirtschaftlich nicht vertretbar ist. Die Verbindung über eine kraftschlüssige Verschraubung hat die Vorteile eine reversible Verbindung darzustellen und für einen homogenen Wärmeübergang, aufgrund der gleichmäßigen Flächenpressung, zu sorgen. Nachteilig wirkt sich die größere Materialstärke der Galvanoform für die Unterbringung der Gewinde aus, was die Galvanisierzeit erhöht. Ein weiterer Nachteil ist die aufwendigere Bearbeitung der Galvanoform, aufgrund der Gewinde. Nichtsdestotrotz ist eine Verschraubung der Galvanoform für Losgrößen im einstelligen Bereich sinnvoll. Bei höheren Losgrößen wäre eine aufwendigere Konstruktion mit Niederhalter erstrebenswert, wodurch die Galvanoformen weniger aufwendig bearbeitet werden müssten.
Aus diesen Überlegungen heraus sind 2 Varianten der Galvanoform-Fundament-Baugruppe entstanden. Trotz der Vorteile von Variante 1 (Abbildung 5.6 links), dass die gesamte Bipolarplatte abgebildet wird und die Werkzeugaufnahme einfach zu fertigen ist, überwiegen die Nachteile, da die Galvanoform sehr aufwändig bearbeitet werden muss und verschleißanfällig ist (Auswerferstiftbohrungen mit Passungen), der vorhandene Luftkühleinsatz der Gegenseite nicht verwendet werden kann und die unbearbeitete Außengeometrie exakt passen muss. Variante 2 (Abbildung 5.6 rechts) beinhaltet bereits einige Verbesserungen. So können die vorhandenen Kerneinsätze (blau) und der düsenseitige Formeinsatz weiterverwendet werden, die Außengeometrie spielt jedoch nach wie vor eine Rolle. Außerdem sind zahlreiche Auswerfer über die Galvanoform gepasst, was eine erhöhte Verschleißanfälligkeit bedingt.

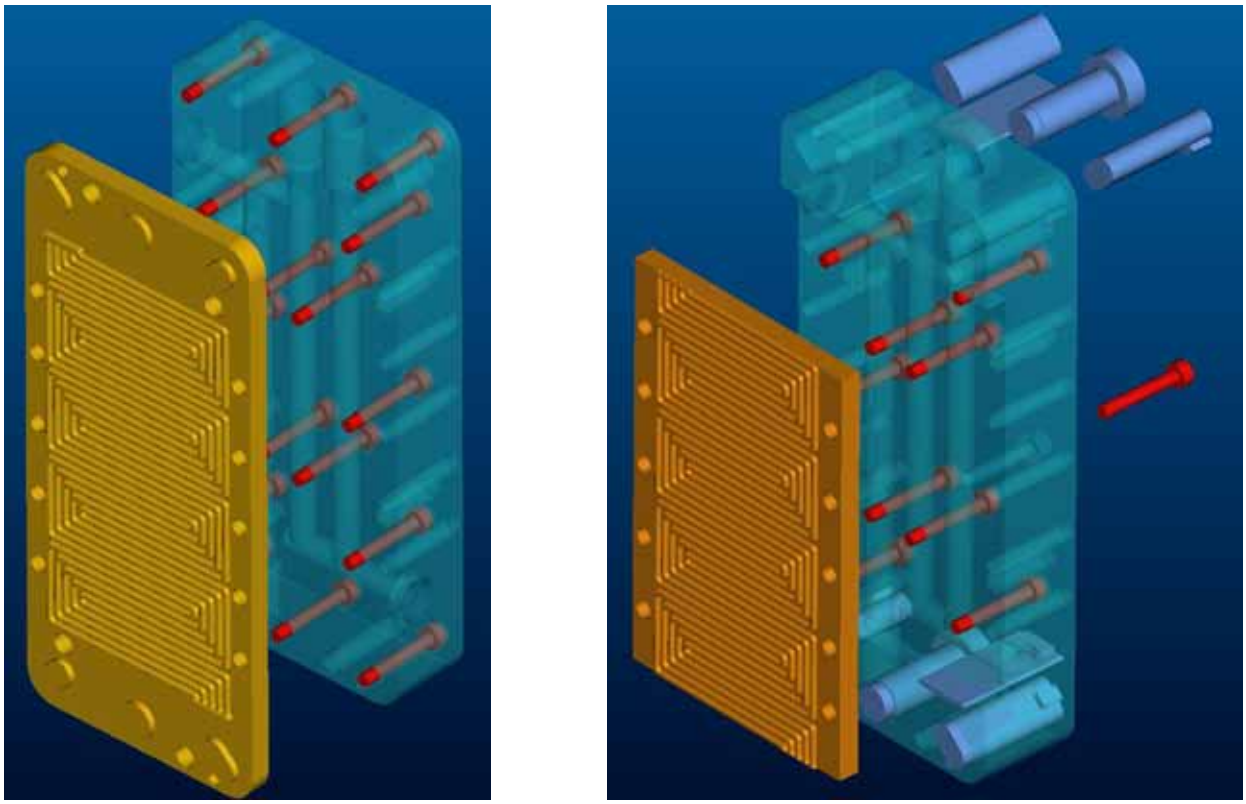


Abbildung 5.6: 2 Konstruktionsvarianten von Galvanoform und Fundament

Aufgrund der Nachteile der beiden ersten Varianten wurde ein 3. Konzept entwickelt, welches ausschließlich den Flowfieldbereich als Austauschteil vorsieht (Abbildung 5.7, links). Dadurch ist die Außenkontur der unbearbeiteten Galvanoform irrelevant und die Galvanoform ist frei von Auswerferstiften, was deren Fertigung vereinfacht. Die Vorteile werden jedoch durch einige Nachteile erkauft, so musste die aktive Flowfieldfläche geringfügig verkleinert werden, damit die Restwandstärke zu den Auswerfern im Fundament nicht zu gering wird. Außerdem ist das Fundament, aufgrund der notwendigen Taschenfräsung und der drahterodierten Kerndurchführungen, aufwändiger zu bearbeiten. Hier überwiegt jedoch der Vorteil, dass das Fundament, im Gegensatz zu den Galvanoformen, nur einmal angefertigt werden muss.

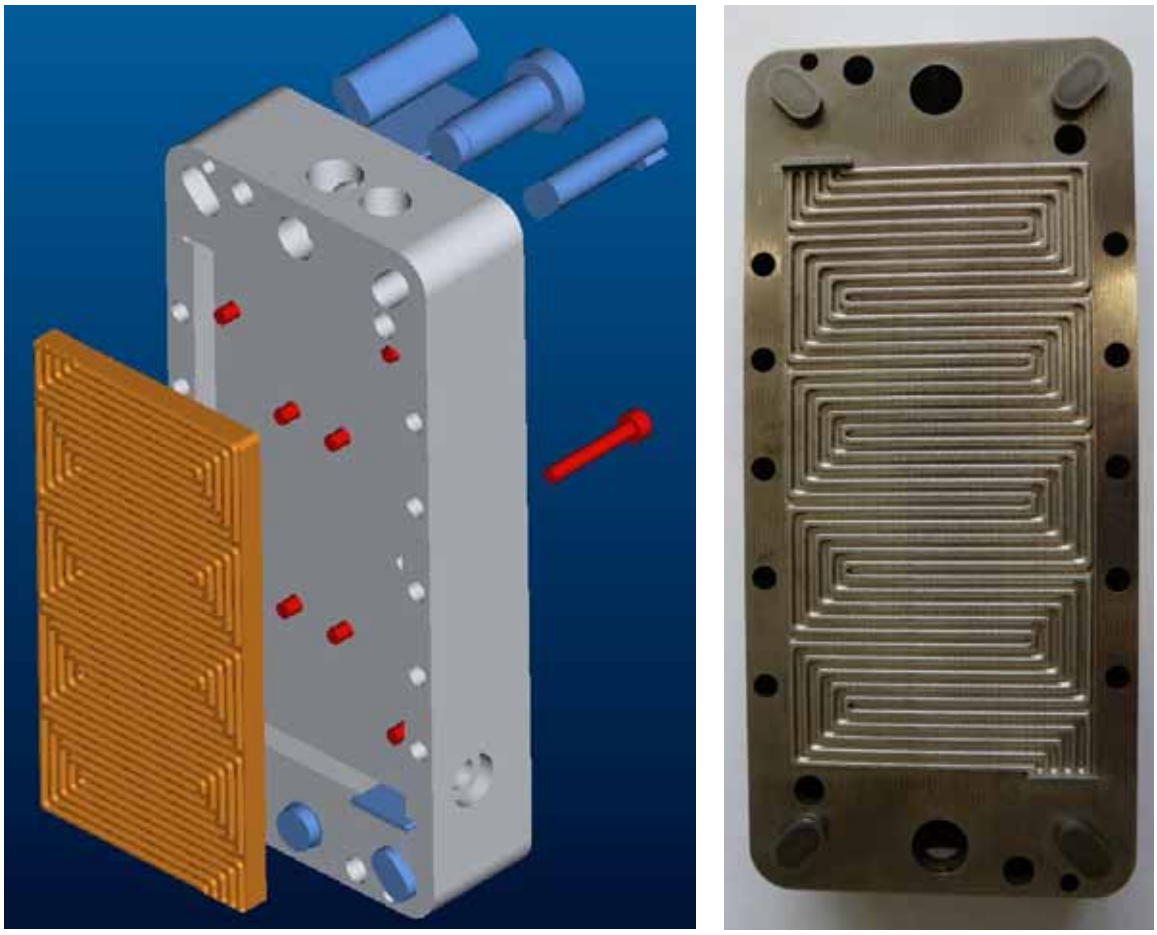


Abbildung 5.7: Variante 3 der Galvanoform-Fundament-Baugruppe, links CAD-Modell, rechts fertiges Bauteil mit eingesetzter Galvanoform

Das Fundament wurde von der Werkzeugbaufirma Geweku aus Halver angefertigt und von der selbigen Firma bezogen.
Bei dem gewählten Konzept muss die Galvanoform zunächst umseitig auf Maß gefräst werden, dabei ist darauf zu achten, dass die vorgegebenen Passungen exakt eingehalten werden, damit die Gratbildung möglichst gering bleibt. Anschließend wird die Rückseite so bearbeitet, dass eine plane und glatte Auflagefläche entsteht und die Galvanoform die geforderte Dicke aufweist. Danach können die Gewinde eingebracht werden. Ist die Galvanoform soweit bearbeitet, kann diese in das Fundament eingesetzt, verschraubt und verwendet werden (Abbildung 5.7, rechts).

5.4 Optimierung Oberflächenqualität

Um geeignete RP-Verfahren zu identifizieren wurde zunächst am IPE ein Verfahrens- und Materialscreening anhand der Testkörper durchgeführt. Unterstützend dazu sind diese Probenkörper am ZBT mittels 3D–Messsystem untersucht worden.
Nach der Materialauswahl wurden Proben in Originalgröße hergestellt, um diese ebenfalls zu vermessen und ggf. einen galvanischen Abzug davon herzustellen. Durch Vermessen der Galvanoform und den Ergebnissen des Substrates ist ein Abgleich zwischen beiden möglich, um Aussagen treffen zu können, inwiefern die Galvanik Einfluss auf Form- und Lagetoleranzen hat. Zu guter letzt wird ein Abgleich zwischen der Galvanoform und den damit hergestellten BPP durchgeführt, ein eventueller Verschleiß an der Galvanoform festgestellt, sowie die Bipolarplatten bezüglich sämtlicher Nuttiefen, Dicken und Durchbiegung charakterisiert.

5.4.1 3D Messsystem Micro Prof TTV von FRT

Die Messungen wurden mit dem optischen 3D-Messsystem Micro Prof TTV der Firma FRT durchgeführt. Es verfügt über 3 Sensoren, eine Kamera und ist mit einem Linear-tisch zur Probenaufnahme versehen. Der feine Sensor ist mit einem Messbereich von 600 µm und einer Genauigkeit in z-Richtung von 10-30 nm nur für flache Geometrien bzw. für Rauheitsmessungen geeignet. Die zwei sich exakt gegenüberstehenden Sensoren mit einem jeweiligen Messbereich von 3 mm und einer Genauigkeit von 100 nm ermöglichen die beidseitige Messung von Profilen, Konturen und Topographien sowie die Bestimmung der dazugehörigen Probendicken. Das Messgerät wird verwendet, um zum einen hochauflösende Detailscans von interessanten Bereichen oder ganzen Proben vorzunehmen und um zum anderen vorprogrammierte Messungen einzelner Linien automatisiert mit anschließend automatisierter Auswertung durchzuführen. Die Detailscans können herangezogen werden, um mit der Analysesoftware Mark 3 umfangreiche Untersuchungen durchzuführen.

5.4.2 Messungen an Testkörpern

Die 3 Testkörpergeometrien wurden seitens des IPE genutzt, um mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren und Materialien Probenkörper herzustellen bzw. extern herstellen zu lassen, die bezüglich Form- und Maßhaltigkeit, Oberflächenqualität und Bekeimbarkeit zum Auftrag elektrisch leitfähiger Schichten untersucht werden können. Die ursprüngliche Probenkörpergeometrie wurde weiterhin genutzt, da die anspruchsvollere Formgebung Schwächen von Herstellverfahren besser aufdecken kann. Seitens des ZBT wurden die mittels Lasersintern, Multijet-Modeling (MJM) und Stereolithographie (SL) hergestellten Proben bezüglich Oberflächenbeschaffenheit, Maßhaltigkeit und Ebenheit untersucht.

Die mittels Lasersintern hergestellten Proben aus Polyamid (Abbildung 5.8) und Polystyrol weisen vergleichsweise hohe Rauheiten, Ra > 10 bzw. > 40 µm auf, was sehr hohe Anforderungen an die einebnenden Beschichtungen stellt, um eine porenfreie und möglichst glatte Werkzeugoberfläche zu erhalten. Darüber hinaus weisen die Probenkörper aus Polystyrol einen nicht unerheblichen Verzug auf.

Eine weitere getestete Verfahrensvariante war das Polyamidpulver mit Graphit zu mischen, um intrinsisch leitfähige RP-Körper herzustellen, die eine leitfähige Startschicht überflüssig machen. Jedoch wurde die Oberflächenbeschaffenheit durch Beigabe von Graphit nicht verbessert.

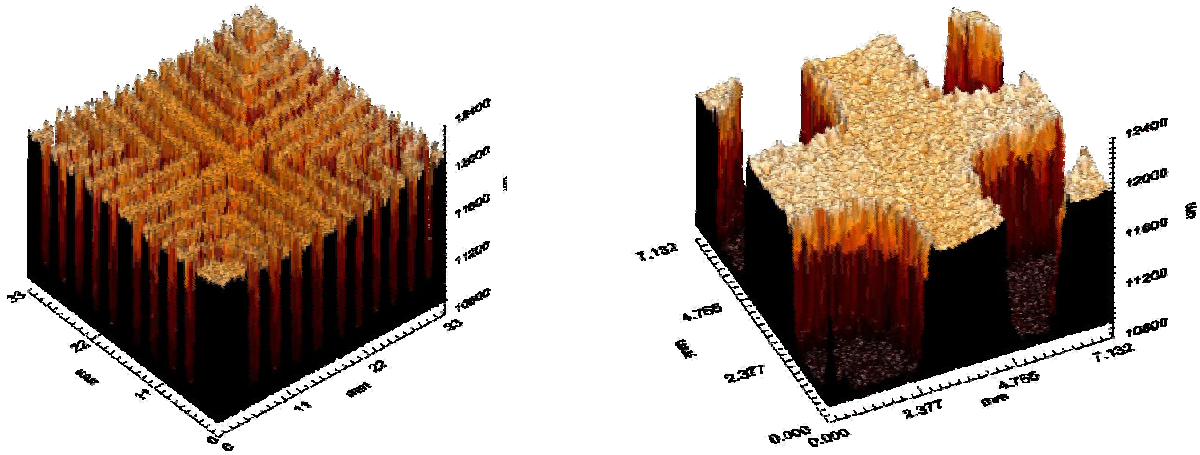


Abbildung 5.8: Überhöhte 3D Darstellung Polyamid-Testkörper, links Gesamtdarstellung, rechts Vergrößerung des Zentrums

Da die Oberflächenbeschaffenheit der Polyamid und Polystyrol Probenkörper auch durch einebnende Maßnahmen nicht ausreichend verbessert werden konnte, wurde Abstand von diesen Verfahren genommen.

Mittels Multijet-Modeling hergestellte Proben aus Wachs (Abbildung 5.9) haben vergleichsweise geringe Oberflächenrauheiten, mit RA Werten von 1 – 2 µm. Da die Proben eine Oberflächenstrukturierung quer zur Plotrichtung aufweisen sind die gemessenen Rauheitswerte richtungsabhängig. Bezüglich Ebenheit und Planarität zeigen sich bei diesem Material jedoch auch Schwachpunkte. Darüber hinaus ist das Material nur im mittleren 2stelligen Temperaturbereich thermisch stabil, was einen modifizierten Beschichtungsprozess verlangt, welcher im Regelfall bei höheren Temperaturen abläuft.

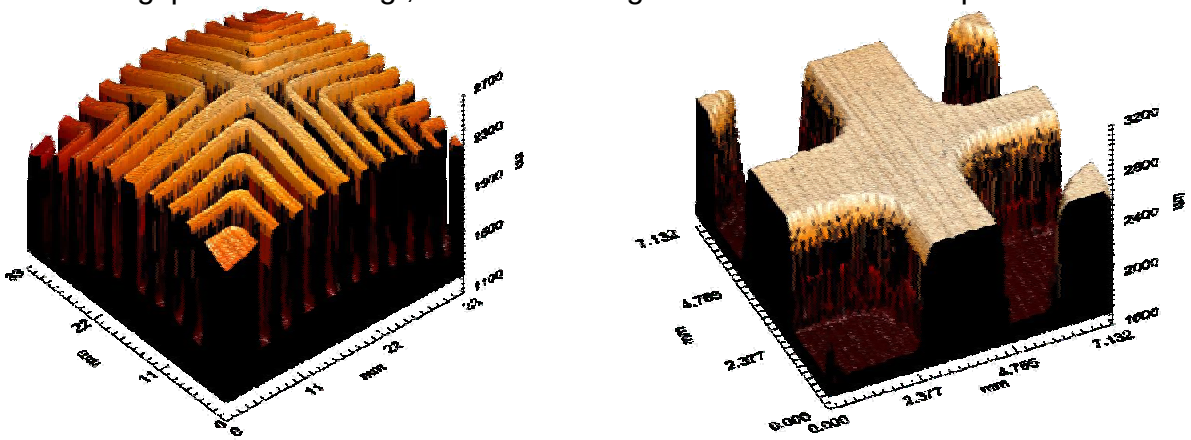


Abbildung 5.9: Überhöhte 3D Darstellung Multijet-Modeling-Testkörper aus Wachs, links Gesamtdarstellung, rechts Vergrößerung des Zentrums

Die Verwendung von Multijet-Modeling Modellen wird dennoch weiter verfolgt, da Sollmaße der Nutgeometrie gut eingehalten werden und eine Krümmung der Oberfläche durch einen nachfolgenden Richtprozess wieder ausgeglichen werden kann.
Am aussichtsreichsten bezüglich Oberflächenqualität, Planarität sowie Form- und Maßhaltigkeit zeigten sich einige stereolithographisch hergestellte Probenkörper. Dazu gehörten die Materialien Accura 60 von der Anlage 3D-Systems 3000 und Vero Blue (Abbildung 5.10) von der Anlage Objet-Eden350V (PolyJetModeling). Die Testkörper weisen ähnliche Rauheiten wie die Testkörper aus Wachs und ebenfalls eine richtungsabhängige Strukturierung der Oberfläche auf.

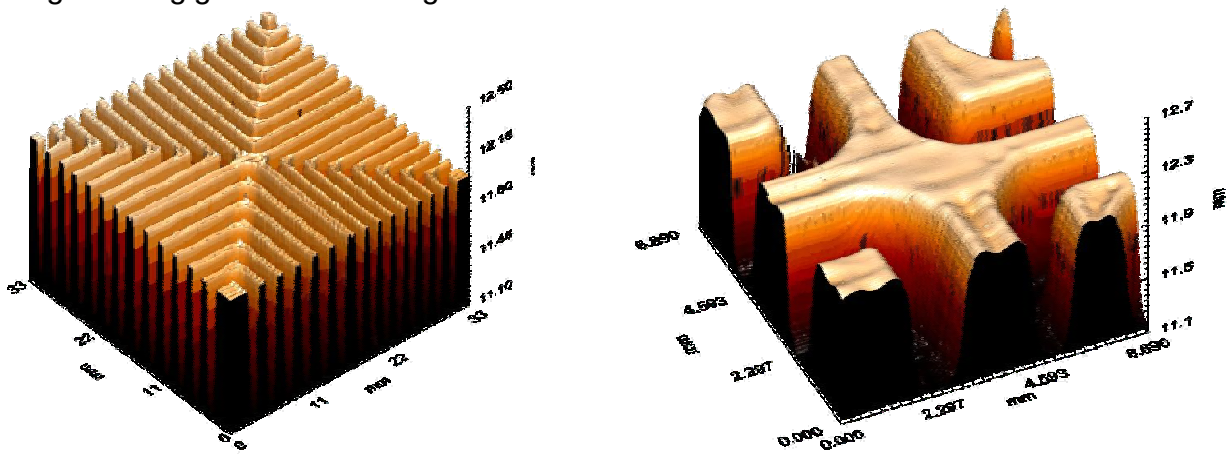


Abbildung 5.10: Überhöhte 3D-Detailscan Vero Blue – Objet-Eden350V, links Gesamtdarstellung, rechts Vergrößerung des Zentrums

Im weiteren Projektverlauf wurde, aufgrund der Messungen an den Testkörpern, weiterhin auf SLA-Proben und auf MJM-Proben aus Wachs zurückgegriffen und sofern möglich deren Qualität optimiert.

5.4.3 Messungen an RP-Positiven in Originalgröße

Durch die Messungen an Testkörpern konnte ein erster Eindruck von der Qualität der RP-Verfahren gewonnen werden und ein Auswahlprozess erfolgen. Die weitere Optimierung erfolgte an RP-Positiven in Originalgröße, da die auftretenden Effekte nicht mit

denen kleiner Testkörper vergleichbar sind. Aufgrund der guten Anlagenverfügbarkeit wurde ein Großteil der Optimierungen mit Wachsbauteilen im Multijet-Modeling Verfahren durchgeführt.
Zunächst soll das Auswertverfahren der 3D-Messungen anhand eines nicht optimierten MJM Bauteils aufgezeigt werden. Alle weiteren Auswertungen laufen äquivalent ab.
Die überhöhte 3D-Darstellung des gesamten RP-Bauteils (Abbildung 4.11) gibt einen ersten Einblick über die Verformung bzw. Krümmung des Bauteils und die Strukturierung der Oberfläche.

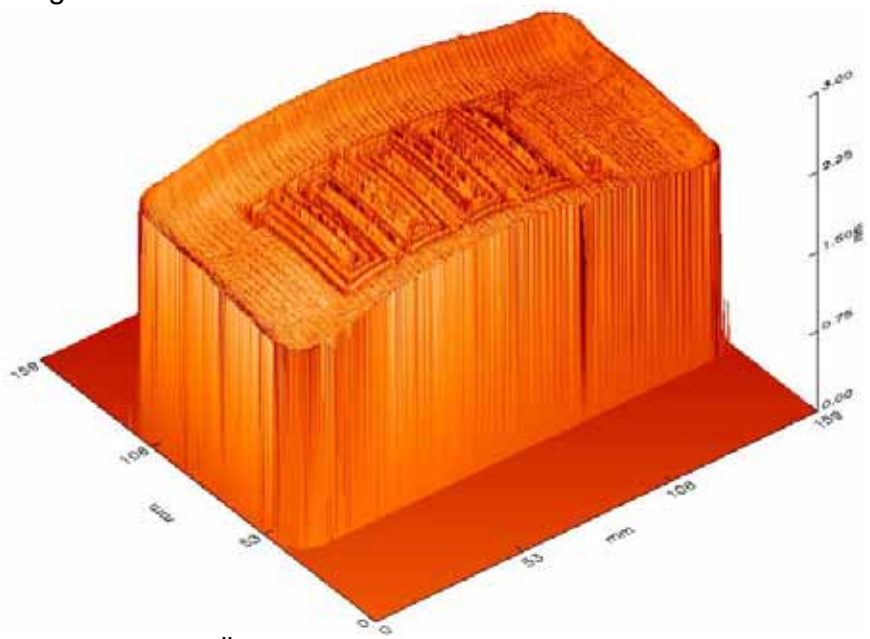


Abbildung 5.11: Überhöhte 3D Darstellung eines MJM RP-Positivs aus Wachs mit Strukturierung parallel zur kurzen Seite

In diesem Fall verläuft die Strukturierung parallel zur kurzen Seite der Platte und somit auch parallel zur späteren Einspritzrichtung im Werkzeug, was sich positiv auf die Spritzgießbarkeit auswirken könnte. Ebenfalls ist eine Krümmung der Oberfläche des Bauteils erkennbar, die sich allerdings am stärksten außerhalb des Flowfieldbereichs zeigt.
Da nach dem ausgewählten Galvanoform-Fundament-Konzept nur der Kernbereich der Galvanoform mit Flowfield Verwendung findet, sollte auch nur dieser für die weitere Auswertung berücksichtigt werden. Die überhöhte Darstellung dieses Bereichs (Abbildung 5.12) lässt eine Krümmung erkennen. Da die dargestellte Krümmung einen stetigen Verlauf aufweist, ist diese in einem späteren Richtvorgang des Wachsteils oder der Galvanoform besser zu beheben, als wäre der Verlauf unstetig. Dennoch soll die Krümmung möglichst reduziert werden.

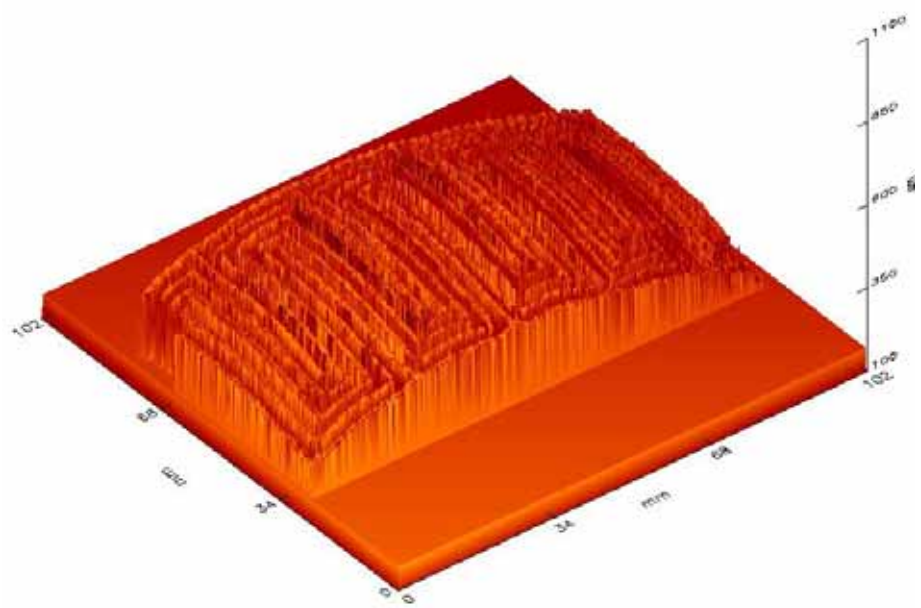


Abbildung 5.12: Überhöhte 3D Darstellung des Flowfieldbereichs eines MJM RP-Positivs aus Wachs

Die bisherigen Darstellungen liefern einen ersten optischen Eindruck der Qualität der Bauteile. Um quantitative Aussagen bezüglich Krümmung und Einhaltung von Sollwerten treffen zu können, wurden 4 Messlinien definiert (Abbildung 5.13).

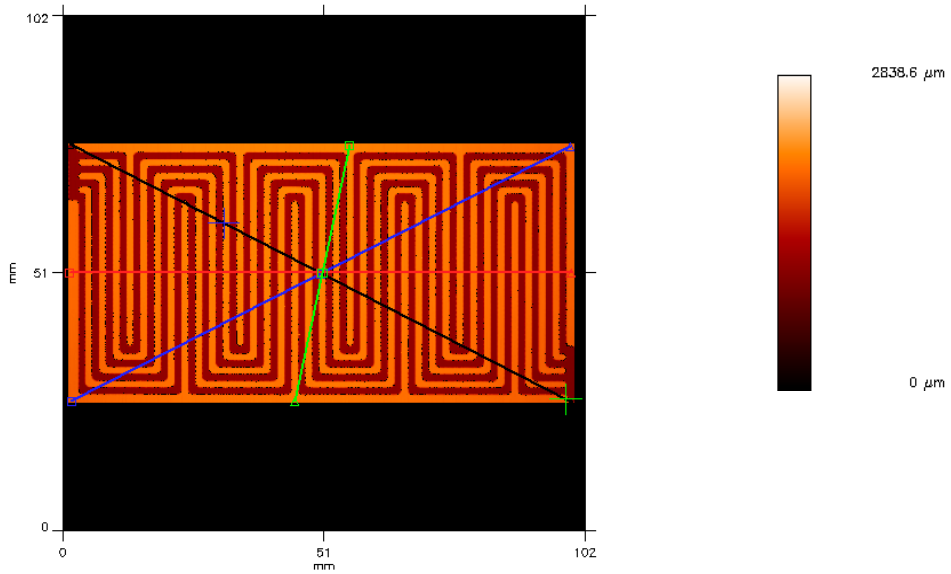


Abbildung 5.13: Messlinien zur Bestimmung von Krümmung & Nuttiefe

Abbildung 5.14 zeigt die graphische Darstellung der Profilverläufe, exemplarisch für die Stegstruktur skaliert. Die maximale Krümmung bestimmt durch Subtraktion des minimalen vom maximalen Wert ergibt in diesem Fall 275 µm. Zur Anwendung in der Brennstoffzelle sind Werte größer 100 µm nicht tolerierbar, weil die äußere Krümmung der Bipolarplatten sich durch die Nachbearbeitung direkt auf die Nuttiefen auswirkt, was die Betriebseigenschaften der BZ negativ beeinflusst.

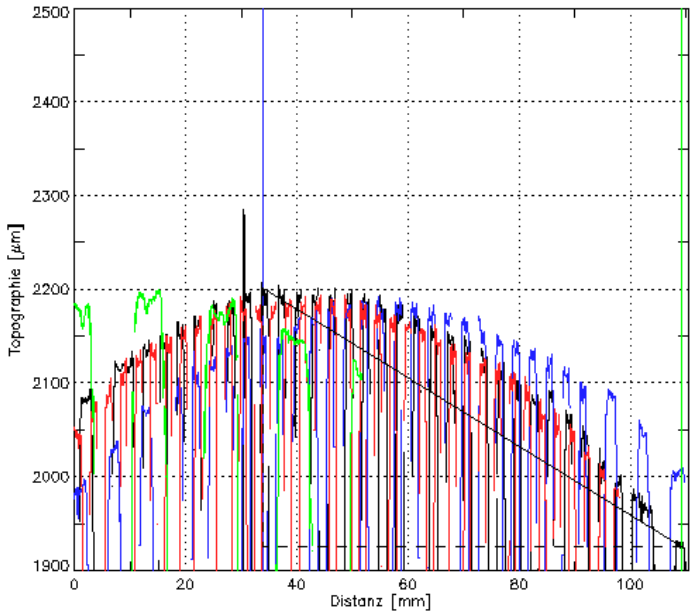


Abbildung 5.14: Profilverläufe der Stegstruktur Max.-Min.: 275µm

Die Krümmung der Nutstruktur ist mit 261 µm nur geringfügig geringer. Die Krümmung von Nut- und Stegstruktur sollten weitestgehend identisch sein, weil dies ansonsten ein Indiz für unterschiedliche Nuttiefen wäre. In diesem Fall lag die Nuttiefe mit 863 µm leicht unter dem Sollwert von 900 µm, d.h. an dieser Stelle gibt es ebenfalls noch Optimierungsbedarf.

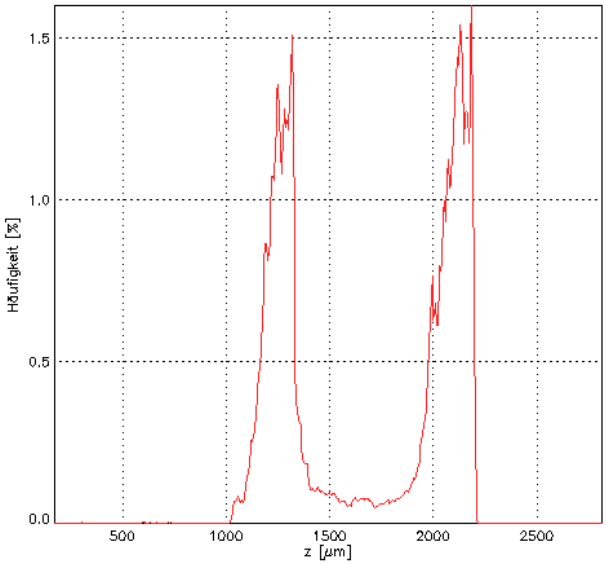


Abbildung 5.15: Histogramm des Flowfieldbereichs

Ein weiteres sehr gutes Tool zur Analyse der Qualität eines RP-Bauteils oder einer Galvanoform ist die Darstellung in einem Histogramm (Abbildung 5.15). Das Histogramm stellt die Häufigkeit aller Höhenmesswerte graphisch dar. Im Fall der Flowfieldstruktur sollten 2 möglichst hohe Peaks mit umseitig stetigen Verläufen (aufgrund der Verrundungen) sichtbar sein. Im dargestellten Diagramm ist, aufgrund der wenig stark und unpräzise ausgeprägten Peaks noch deutliches Optimierungspotential erkennbar, vor allem in Hinblick auf die Krümmung der Oberfläche.

Da das Abkühlverhalten der Wachsbauteile nach Entnahme aus der Anlage signifikanten Einfluss auf eine Verformung haben kann, wurden diverse Abkühlversuche durchgeführt. Abbildung 5.16 zeigt die 3D-Darstellung eines solchen Versuchs. Nach

wie vor sind die Flanken des Bauteils erhöht. Der Flowfieldbereich zeigt jedoch eine sehr gute Qualität.

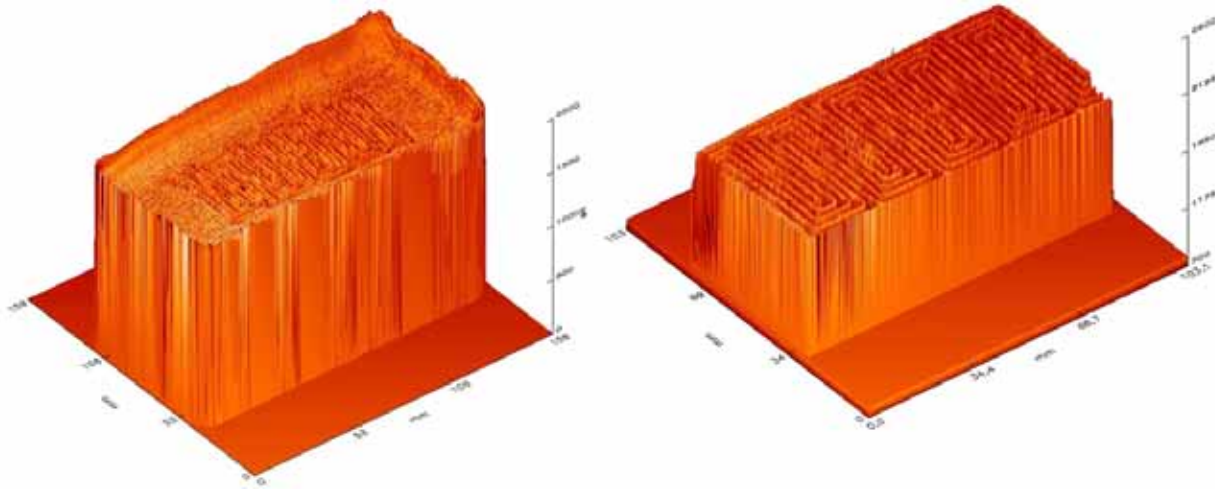


Abbildung 5.16: 3D Darstellung eines MJM RP-Positivs aus Wachs aus einem Abkühlversuch, links Gesamtdarstellung, rechts Flowfieldausschnitt

Bestätigt wird der erste Eindruck der 3D-Darstellungen durch das Histogramm und die Auswertung der 4 Profile (Abbildung 5.17). Das Histogramm beinhaltet 2 ausgeprägte Peaks und dazwischen einen stetigen Verlauf, was für eine sehr gute Qualität des Bauteils spricht.

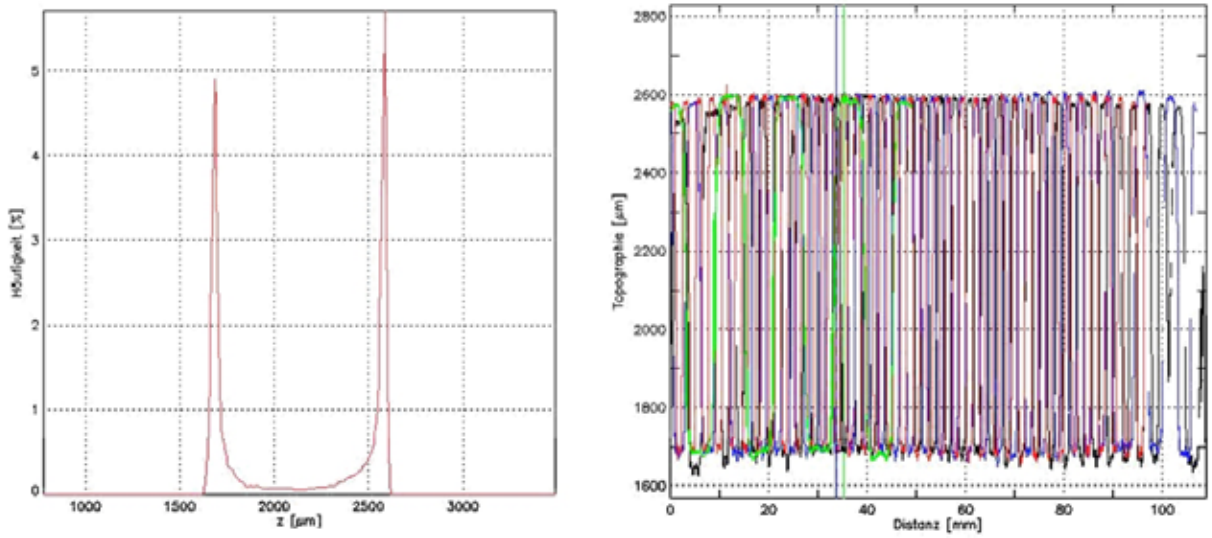


Abbildung 5.17: Histogramm (links) und Profilverläufe (rechts) aus eines MJM RP-Positivs aus Wachs aus einem Abkühlversuch

Anhand der Profilverläufe konnten wie gehabt die Nuttiefen sowie die Maximalwerte der Krümmung bestimmt werden. Die Nuttiefe ist mit 902 µm eindeutig optimiert worden und trifft den Sollwert fast perfekt. Die Messwerte zur maximalen Krümmung zeigen ebenfalls eine deutliche Verbesserung. Die Krümmung der Stegstruktur liegt bei 74 µm, die der Nutstruktur bei 61 µm. Der definierte Grenzwert von 100 µm wurde damit deutlich unterschritten. Da die Ergebnisse erst gegen Ende des Projektes erzielt werden konnten, war es nicht mehr möglich derart optimierte Wachs-Bauteile zur Herstellung von Galvanoformen heranzuziehen.

Daneben wurden weitere Versuche mit anderen Bauplattformen in Form von Blechen oder geschliffenen Aluminiumplatten durchgeführt, welche allerdings keine ausreichende Verbesserung der Wachsbauteile herbeiführten.

Neben den MJM RP-Positiven aus Wachs wurden ebenfalls gute Oberflächenqualitäten, wie im nachfolgenden Unterkapitel näher erläutert, von SL Bauteilen aus AccuGen

100 HC, hergestellt auf einer EOS Anlage, festgestellt. Als ungeeignet erwiesen sich DLP RP-Bauteile, hergestellt auf einer Envisiontec – MiniMultiLens Anlage, aus den Werkstoffen Envisiontec R11 und RCP 30, aufgrund zu starken Verzugs von teilweise über einem Millimeter.

5.4.4 Abgleich RP-Positiv Galvanoform

Der Abgleich zwischen RP-Positiv und der daraus entstandenen Galvanoform ist sinnvoll, um den Einfluss des galvanischen Prozesses auf die Geometrie untersuchen zu können, denn Eigenspannungen im Elektrolyt können für Verzug sorgen. Hierfür wurde das erste von der Firma NRU gelieferte SL Bauteil aus AccuGen 100 HC (Abbildung 5.18), hergestellt auf einer EOS Anlage, einem Detailscan unterzogen und anschließend dem fem zur Herstellung einer Galvanoform zur Verfügung gestellt. Die daraus entstandene Galvanoform wurde für den Vergleich unbearbeitet vermessen.

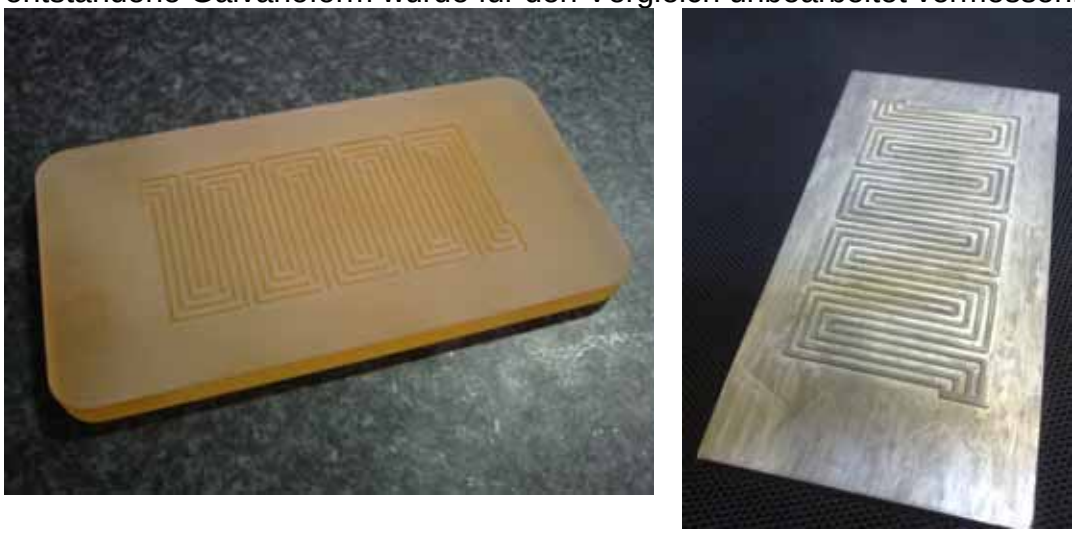


Abbildung 5.18: SLA RP-Positiv von NRU 001 aus AccuGen 100 HC und daraus hergestellte Galvanoform 007

Abbildung 5.19 stellt die Gesamtdarstellung beider Messungen vergleichend gegenüber. Auf dem PR-Positiv sind leichte Fehlstellen zu erkennen, diese beschränken sich aber auf den irrelevanten Randbereich. Die Galvanoform bildet diese sehr gut ab, was für die Güte des Prozesses spricht.

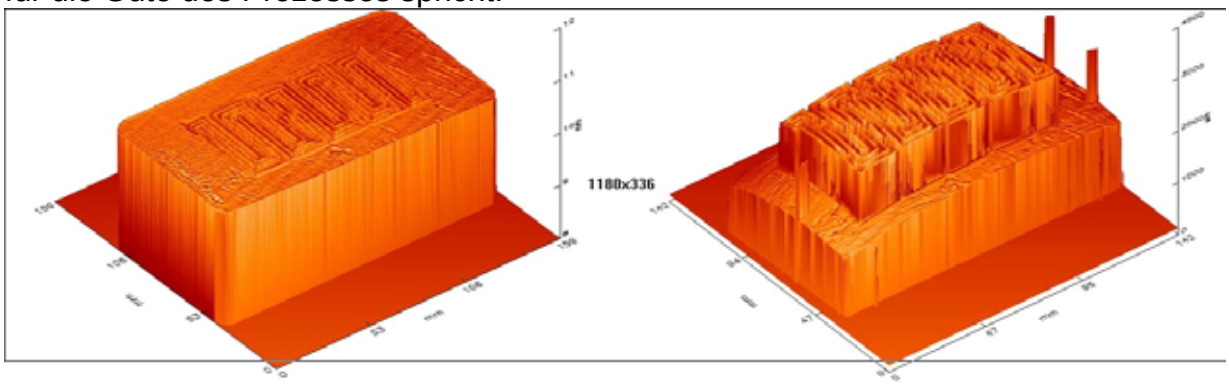


Abbildung 5.19: 3D Darstellung des RP-Positivs von NRU 001 aus AccuGen 100 HC (links) und daraus hergestellte Galvanoform 007 (rechts)

Darüber hinaus ist eine Krümmung der Galvanoform erkennbar, welche in Abbildung 5.20 noch deutlicher ersichtlich wird. Demnach ist eine Krümmung in x- und y-Richtung entstanden.

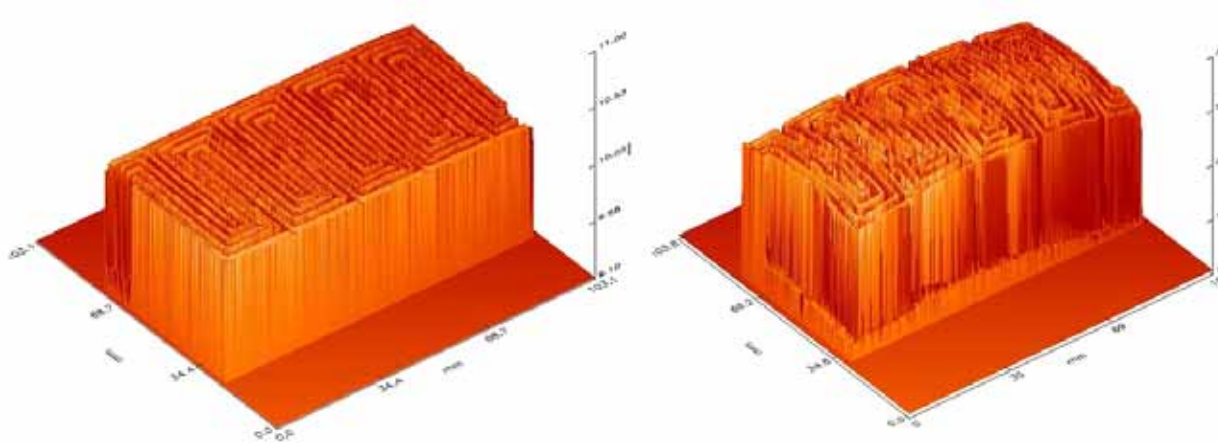


Abbildung 5.20: 3D Darstellung des Flowfieldbereichs des RP-Positivs von NRU 001 aus AccuGen 100 HC (links) und der daraus hergestellten Galvanoform 007 (rechts)

Der Maximalwert der Krümmung des Stegbereichs hat sich gemäß Abbildung 5.21 von 105 µm auf 253 µm verschlechtert (Nutbereich: 102 µm -> 269 µm). Diese Krümmung kann durch einen nachfolgenden mechanischen Richtprozess weitestgehend rückgängig gemacht werden, dennoch wäre es sehr zweckmäßig, wenn auf diesen verzichtet werden könnte. Somit besteht noch Optimierungsbedarf im Bereich der Galvanoformung.

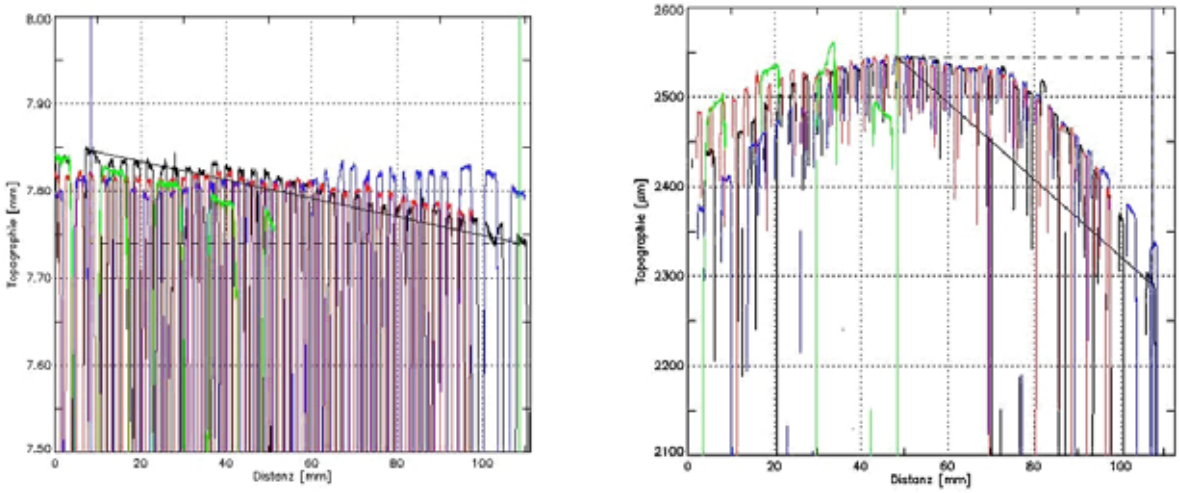


Abbildung 5.21: Profillinien des Stegbereichs des RP-Positivs von NRU 001 aus AccuGen 100 HC (links) und der daraus hergestellten Galvanoform 007 (rechts)

Die ermittelten Nuttiefen liegen bei dem RP-Positiv bei exakt 900 µm und weichen bei der Galvanoform nur geringfügig davon ab.

Da Galvanoform und RP-Positiv, im Gegensatz zur Verwendung eines Positivs aus Wachs, nicht durch Herausschmelzen, sondern mechanisch getrennt werden, war es möglich das RP-Positiv nachfolgend nochmals zu vermessen. Die Maximalwerte der Krümmung lagen bei 137 µm im Steg- und bei 130 µm im Nutbereich und somit nur geringfügig höher als im Urzustand, dagegen aber weitaus geringer als die maximale Krümmung der Galvanoform. Hieraus lässt sich die Erkenntnis gewinnen, dass der Verzug erst im späteren Verlauf des Galvanoformens auftritt, wenn die Nuten bereits vollständig abgebildet sind. Somit wäre ein denkbarer Lösungsansatz zur Vermeidung von Verzug eine erste Schicht mit Nickel aufzubauen und anschließend mit einem anderen Elektrolyten den restlichen Dickschichtaufbau spannungsfrei vorzunehmen.

5.4.5 Mechanisches Richten

Die gelieferten Galvanoformen waren zum Teil deutlich verzogen, zum einen aufgrund der Qualität der RP-Positive, zum anderen aufgrund des Aufbaus innerer Spannungen

beim Galvanoformen. Um die Galvanoformen trotzdem einsetzen zu können mussten sie mechanisch gerichtet werden. Dies wurde am ZBT mit einer 100 Tonnen Hydraulikpresse durchgeführt.
Richtversuche, die an ersten Versuchs-Galvanoformen durchgeführt wurden, führten teilweise zum Delaminieren und somit zum Zerstören der Galvanoform. Hierdurch sensibilisiert wurde seitens des FEM besonderer Wert auf einen passivschichtfreien Aufbau der Galvanoformen gelegt. Dieser Schritt war erfolgreich, da sich nachfolgende Galvanoformen problemlos zerstörungsfrei Richten ließen.
Exemplarisch werden die Ergebnisse des Richtens anhand Galvanoform 004 auf Basis eines MJM Wachs Positivs aufgezeigt (Abbildung 5.22).

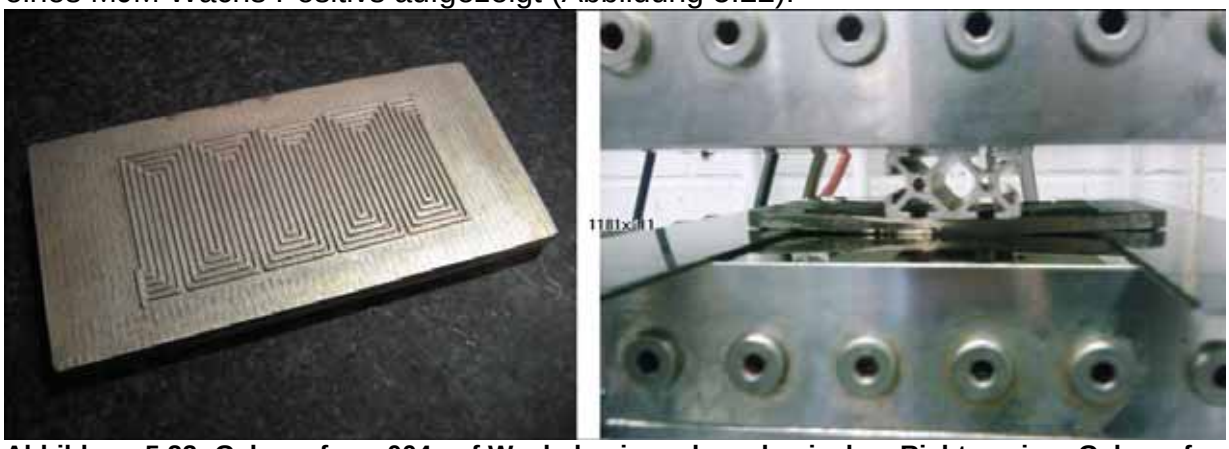


Abbildung 5.22: Galvanoform 004 auf Wachsbasis und mechanisches Richten einer Galvanoform in der 100 to. Hydraulikpresse

Bereits die 3D-Darstellung (Abbildung 5.23) zeigt, dass der Richtprozess die Krümmung in biaxialer Richtung, deutlich verbessert.

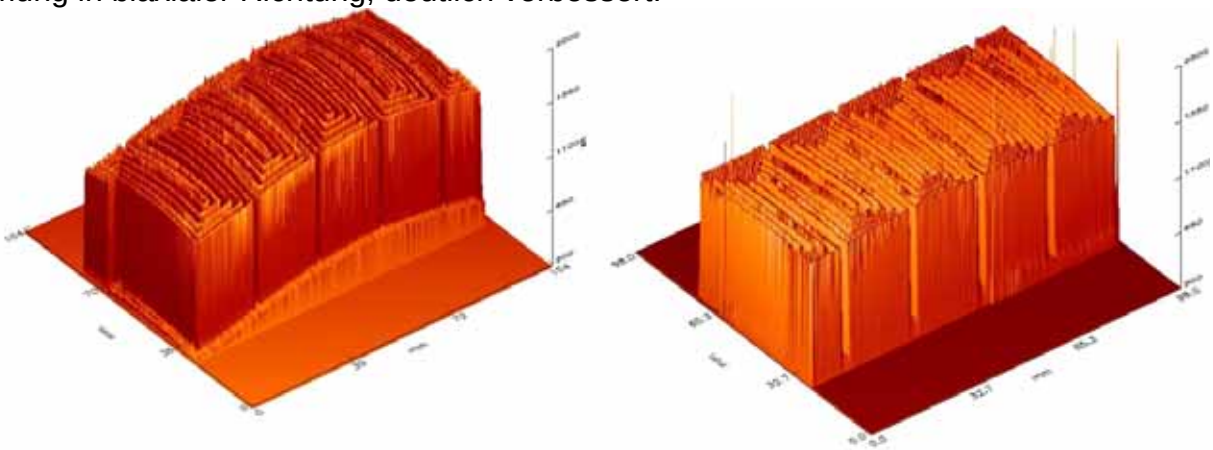


Abbildung 5.23: 3D Darstellung des Flowfieldbereichs von Galvanoform 004 vor und nach dem Richten

Anhand der Profillinien konnte der erste Eindruck quantitativ belegt werden (Abbildung 5.24). Die Krümmung der Stegstruktur konnte von 445 µm auf 87 µm, die der Nutstruktur von 422 µm auf 96 µm, reduziert werden. Somit konnte die geforderte Grenze von 100 µm als maximale Abweichung zum Herstellen von Bipolarplatten eingehalten werden.

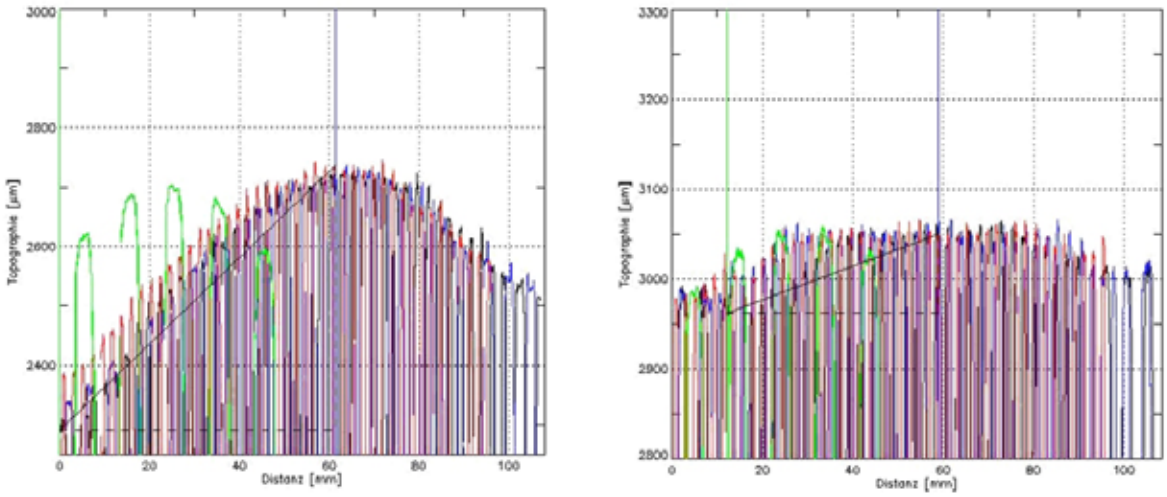


Abbildung 5.24: Profillinien des Stegbereichs von Galvanoform 004 vor und nach dem Richten

Da das mechanische Richten der anderen Galvanoformen ähnlich gute Ergebnisse liefert, werden diese nicht näher erläutert.

5.5 Galvanoform als Spritzgießwerkzeug

Zum Spritzgießen stehen 3 Galvanoformen zur Verfügung. Galvanoform 004 & 005 sind auf Wachs-Basis (MultiJet-Modeling) entstanden und weisen eine Oberflächenstrukturierung (Riefen) längs (004), bzw. quer zur Spritzrichtung (005) auf. Um den RP-Verfahren entgegenzukommen, verfügen diese Galvanoformen, im Unterschied zur Standard-BPP, über 5 anstatt 6 Flowfield-Nuten, sowie über eine modifizierte Kanalgeometrie. Das Nut-Stegbreiten-Verhältnis wurde dabei identisch gehalten. Die erst später erhaltene Galvanoform 007 mit nur 4 Flowfield-Nuten auf Basis eines SL RP-Bauteils weist keine sichtbare Oberflächenstrukturierung auf.

5.5.1 Spritzgießen mit Galvanoform 004

Für erste Versuche wurde Galvanoform 004 herangezogen, weil die Strukturierung parallel zur Spritzrichtung für einen potentiell besseren Formfüllvorgang und somit für geringere Einspritzdrücke sorgen soll. Diese Versuche wurden aufgrund der Maschinenverfügbarkeit auf der Spritzgießmaschine KM 300 von Krauss Maffei durchgeführt. Alle weiteren Versuche liefen auf der KM 500 mit identischen Produktionsparametern und sofern möglich mit automatischem Handlingsystem zur Entnahme und Angussseparierung.

Trotz ergiebigen Einsatzes von Formtrennmittel konnte die Bipolarplatte nicht an einem Stück entformt werden (Abbildung 5.25). In der Nähe der Auswerfer gelang die Entformung problemlos, wohin gegen im Kernbereich des Flowfields, also im Bereich der längs zur Spritzrichtung verlaufenden Nuten, die Haftung zwischen Formteil und Werkzeug sehr stark war.

Abbildung 5.25: 1. Entformung mit Galvanoform 004

Die starke Haftung lässt auf Hinterschnitte in diesem Bereich schließen, woraufhin Galvanoform 004 stereomikroskopisch untersucht wurde (Abbildung 5.26). Der rot markierte Bereich rechts zeigt eine Längsflanke mit „riefenhafter“ Strukturierung entgegen der Entformungsrichtung, welche die Entformungsschwierigkeiten hervorrufen kann. Der blau markierte Bereich auf der linken Seite sieht stark verzahnt aus, was ebenfalls auf Hinterschnitte hindeutet. Die gute Entformbarkeit in diesem Bereich lässt jedoch vermuten, dass die Hinterschnitte weniger gravierend sind. Diesem Bereich kommt allerdings zugute, dass die Entformung durch die Nähe zu den Auswerferstiften begünstigt wird.

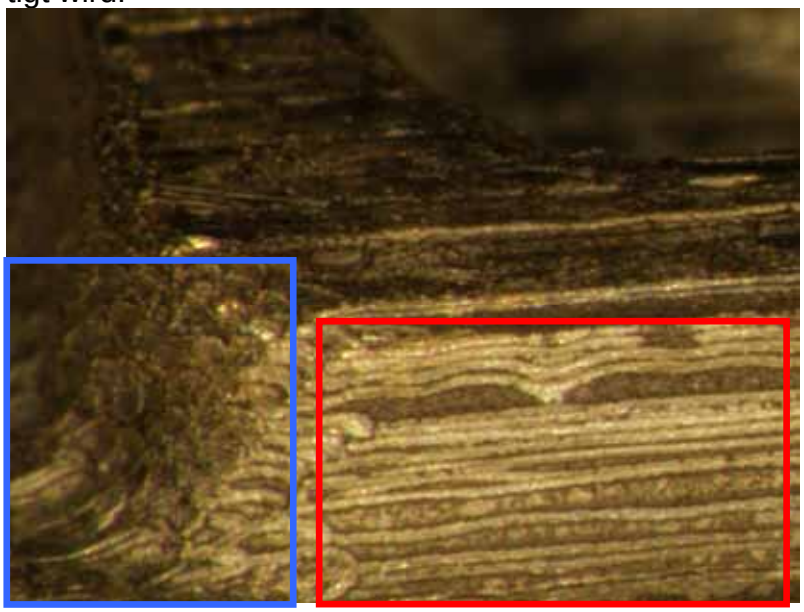


Abbildung 5.26: Stereomikroskopische Aufnahme Galvanoform 004

Weitere Versuche mit Galvanoform 004 erfolgten nachdem diese gesandstrahlt wurde, was sich zumindest optisch deutlich bemerkbar machte, erkennbar an der weitestgehenden Einebnung der Oberflächenstruktur. Die Spritzgießversuche zeigten jedoch keine Verbesserung der Entformbarkeit. Somit wurden die Versuche mit Galvanoform 004 eingestellt. Die zunächst erhoffte Verbesserung des Einspritzverhaltens, aufgrund

der spritzgießbegünstigenden Strukturierung, bewahrheitete sich unter Nutzung von Standardparametern jedoch nicht.

5.5.2 Spritzgießen mit Galvanoform 005

Aufgrund der Erfahrungen mit Galvanoform 004 wurde Nr. 005 bereits vor dem 1. Einsatz gesandstrahlt. Das Sandstrahlen wirkt sich bei dieser Galvanoform weniger deutlich auf die Oberflächenqualität aus, da diese an der Oberfläche aus einem härterem Nickel (ca. 600 HV) besteht. Die quer zur Spritzrichtung verlaufende Strukturierung deutet auf ein schlechteres Einspritzverhalten hin, was es zu untersuchen gilt.

Abbildung 5.27: Kleinserie mit Galvanoform 005

Unter Einsatz von Formtrennmittel war es möglich eine Kleinserie von ca. 40 BPHP herzustellen (Abbildung 5.27). Der Prozess lief jedoch nicht stabil, da sich etwa jede 2. BPHP nicht zuverlässig entformen ließ (Abbildung 5.28, links).

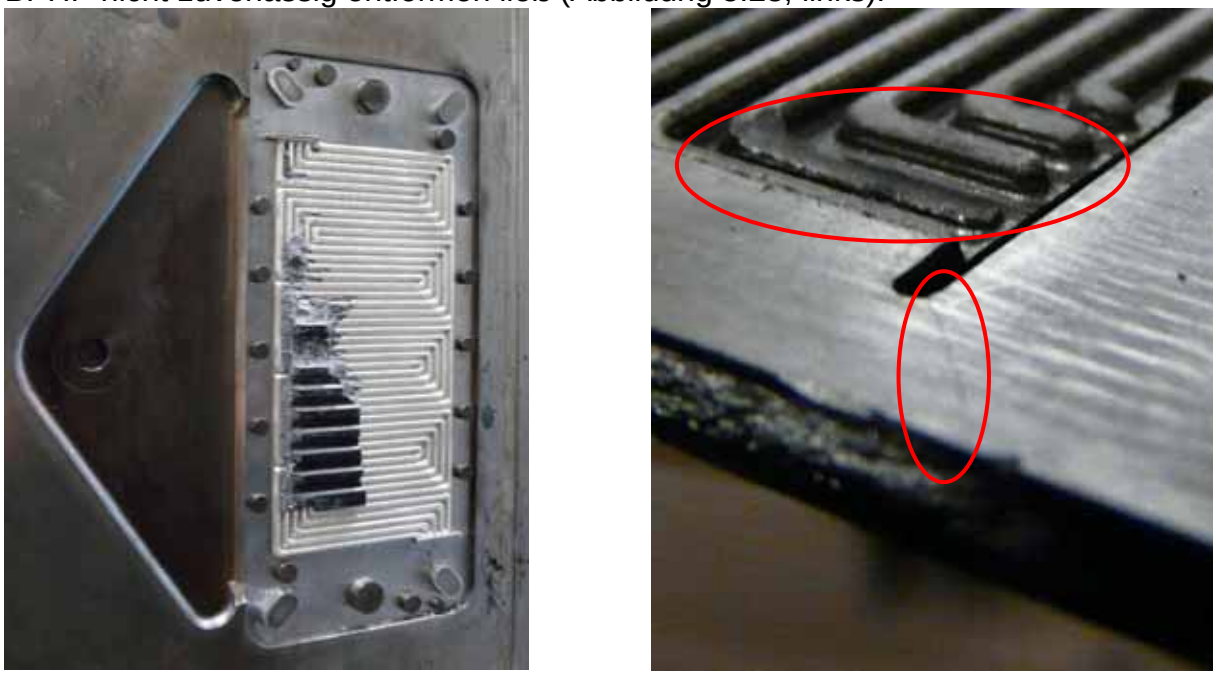


Abbildung 5.28: Teilweise schlechte Entformbarkeit mit Galvanoform 005 und Ausbrüche im Flowfieldbereich sowie Haarrisse im Angussbereich des Gaseinlassschlitzes

Darüber hinaus weist ein Großteil der BPHP Ausbrüche im Flowfieldbereich, sowie atypische Haarrisse im Gaseinlassbereich der Angussseite auf (Abbildung 5.28,

rechts). Die Ausbrüche sind auf das mäßige Entformungsverhalten zurückzuführen, was dazu führt, dass Stegpartien in der Kavität haften bleiben. Die entstandenen Risse sind erfahrungsgemäß nur auf der Angussgegenseite aufgetreten, für die Angussseite sind sie ungewöhnlich. Da neue Gasdurchführungskerne mit dem Fundament geliefert wurden, war es möglich diese einzukürzen (die alten Kerne bleiben unverändert nutzbar), so dass die Rissgefahr und Bindenahtbildung bei nachfolgenden Versuchen minimiert werden kann (Abbildung 5.29).

Abbildung 5.29: Überarbeiteter Langloch-Kern, eingesetzt

Das zunächst vermutete schlechtere Einspritzverhalten hat sich nicht signifikant gezeigt. Die Einspritzdrücke sind auf Standardniveau, die Form ließ sich jedoch schlechter Füllen. Ursache hierfür kann aber auch der Einsatz des Formtrennmittels sein, da an den schlecht gefüllten Regionen, deutliche Rückstände hiervon auszumachen sind. Weitere Versuche mit Galvanoform 005 konnten aufgrund der Maschinenauslastung mit der Galvanoform 007 nicht mehr durchgeführt werden. Diese wären aber sinnvoll, um BPHP aus Galvanoform 005 zu erhalten, welche zum Stackaufbau verwendet werden können. Dazu sollte es ausreichen die Galvanoform nochmals zu strahlen und zwar zunächst mit abrasivem Korund, zur Entfernung gröberer Hinterschnitte und anschließend polierend mit feinsten Glasperlen. Die überarbeiteten Langlochkerne sollten ihr Übriges dazu beitragen, um verwendbare BPHP zu erhalten. Mit diesen BPHP könnte ein Funktionsmuster eines BZ-Stacks aufgebaut werden, um den Einfluss der Strukturierung der Nut auf das Betriebsverhalten zu untersuchen (Abbildung 5.30).

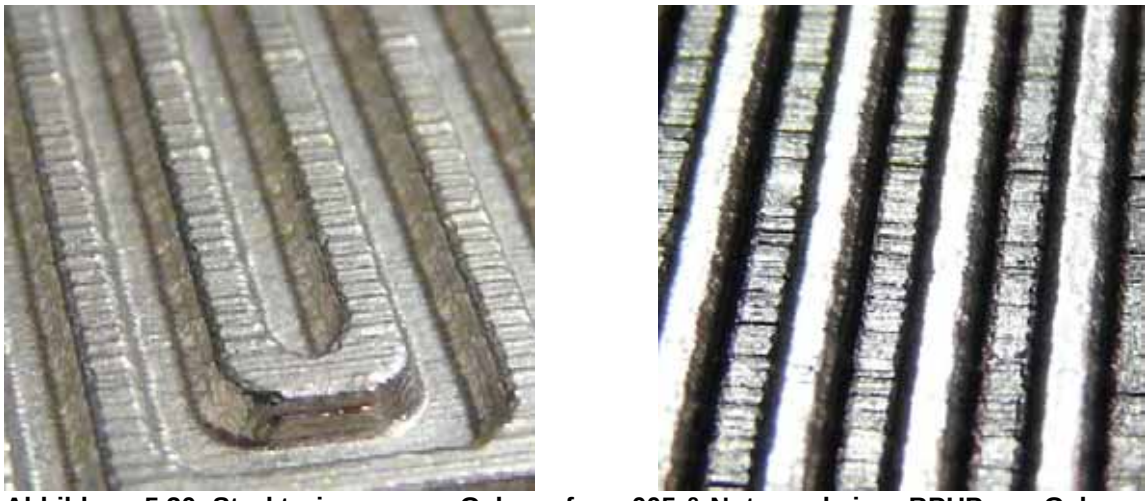


Abbildung 5.30: Strukturierung von Galvanoform 005 & Nutgrund einer BPHP aus Galvanoform 005

Ein Einfluss der Strukturierung auf das Distributionsverhalten der Gase ist wahrscheinlich, aber auch auf die Abfließeigenschaften von Wasser. Erste Tests mit Wassertropfen deuten daraufhin, dass die Strukturierung, obwohl orthogonal zur Strömungsrichtung verlaufend, die Wasserabfuhr begünstigt. Praxistests in Form eines Funktionsmusters müssten diesen Effekt bestätigen. Ein interessanter Aspekt diesbezüglich ist, dass eine derartige Strukturierung kaum gezielt durch spanende Verfahren realisierbar ist. Erst die generative Fertigung ermöglichte die Erzeugung derartiger Strukturen, wenngleich dies zunächst nicht beabsichtigt wurden.

5.5.3 Spritzgießen mit Galvanoform 007

Galvanoform 007 ist auf Basis eines stereolithographisch hergestellten RP-Positivs, auf einer EOS Anlage bei der Firma NRU, entstanden (Abbildung 5.18). Eine sichtbare Oberflächenstrukturierung ist nicht auszumachen. Es scheinen sich einige Kanäle vermutlich bei der galvanischen Abscheidung verschoben zu haben, was jedoch keine großen Auswirkungen haben sollte. Im unbearbeiteten Zustand waren Rückstände des zur Galvanisierung verwendeten Silberleitlacks auszumachen. Diese Rückstände wurden durch vorsichtiges Glasperlstrahlen mit geringem Druck entfernt.
Aufgrund der kurzen verfügbaren Zeitspanne zwischen Eintreffen der Galvanoform und den geplanten Spritzgießversuchen, sowie eingeschränkter Maschinenverfügbarkeit zum spanenden Nachbearbeiten der Galvanoform, mussten Kompromisse hinsichtlich der Qualität hingenommen werden. So wurde diese Galvanoform vor dem Richten nicht vorgefräst, was eine erhebliche Vereinfachung dargestellt hätte. Die Ebenheit konnte somit nicht die Qualität von den Formen 004 & 005 erreichen. Darüber hinaus wurde die Form nicht auf einer CNC- sondern auf einer konventionellen Fräse bearbeitet, mit der Folge entsprechender Qualitätseinbußen. Zum Einhalten des Zeitplans war diese Vorgehensweise jedoch erforderlich.
Die Spritzgießversuche dagegen konnten überzeugen, da problemlos über 300 BPHP ohne messbaren Verschleiß der Galvanoform und mit robotischer Entnahme produziert werden konnten (Abbildung 5.31). Diese BPHP weisen bei Standard-Spritzgießparametern eine bessere Formfüllung als die konventionellen BPHP auf. Dieser Umstand ist auf die gröbere Struktur mit geringerer Nutanzahl von 4 anstatt 6 zurückzuführen.

Mit dem Versuch konnte gezeigt werden, dass das Verfahren ausgehend von einem RP-Positiv, über die Galvanisierung zur Galvanoform, Nachbearbeitung, Einsatz im Spritzgießwerkzeug zu verwendbaren Bipolarplatten realisierbar ist. Das Projektziel wurde somit erreicht.

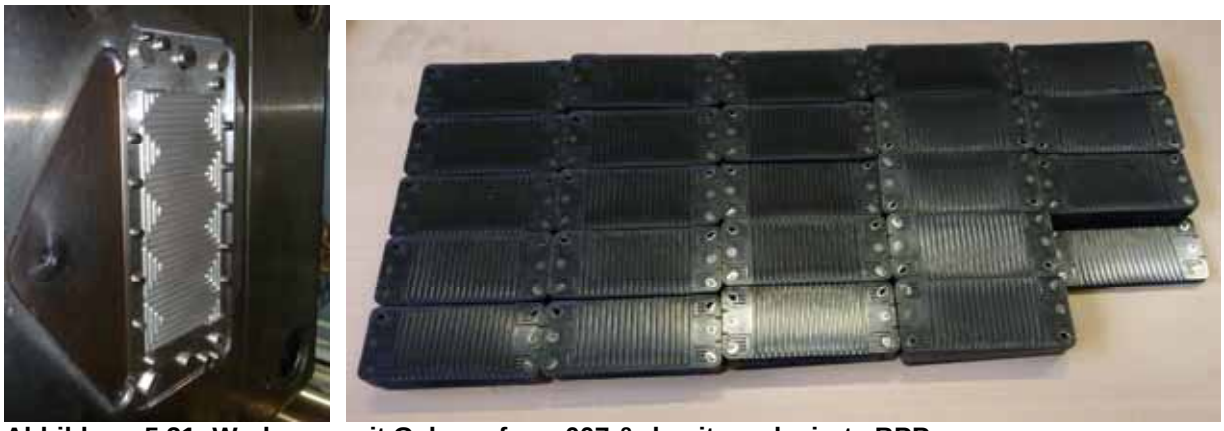


Abbildung 5.31: Werkzeug mit Galvanoform 007 & damit produzierte BPP

Zudem konnte in weiteren Versuchen gezeigt werden, dass bei einer Reduzierung des maximalen Einspritzdrucks von 3100 bar bis auf 2750 bar noch vollständig gefüllter BPHP produziert werden konnten. Dieses Druckniveau kommt den Anforderungen an eine Standardmaschine schon sehr nahe und hätte somit wirtschaftlich betrachtet eine große Tragweite. Ursächlich für diesen positiven Effekt ist auch die gröbere Flowfieldstruktur.
Mit den unter Standardbedingungen hergestellten Bipolarplatten soll zudem ein Funktionsmuster einer Brennstoffzelle aufgebaut werden, um die Betriebseigenschaften mit der veränderten Geometrie zu überprüfen. Es gilt zu ermitteln inwiefern Druckverlust, Wasserabfuhr und Performance aufgrund der reduzierten Nutanzahl bei vergrößerter Querschnittsfläche eines Einzelkanals und modifizierten Umlenkungsbereichen, beeinflusst werden. Ein geringfügig negativer Einfluss könnte in Hinblick auf die bessere Spritzgießbarkeit, also Wirtschaftlichkeit, abhängig vom Einsatzziel, hingenommen werden. Vor dem Einsatz in einer BZ werden die BPHP qualitätssichernden Maßnahmen unterworfen, um die Funktion sicherzustellen und zellbeeinflussende Parameter bereits im Vorfeld zu ermitteln.

5.6 Qualitätssicherung der hergestellten Bipolarplatten

Als qualitätssichernde Maßnahme der BPHP wurden die SG-Maschinenparameter aufgezeichnet und die automatische Gut-Schlechtteilsortierung der Spritzgießmaschine aktiviert. Anhand dieser Parameter sind keine Auffälligkeiten festgestellt worden. Darüber hinaus wurden die elektrischen Widerstände vermessen und 3D-Messungen an den Platten durchgeführt.

5.6.1 Elektrische Widerstände von BPHP aus Galvanoformen

Die Widerstandmessungen wurden an unbearbeiteten BPHP durchgeführt, um den Einfluss einer ggf. strukturierten Spritzhaut bewerten zu können (Diagramm 5.1).

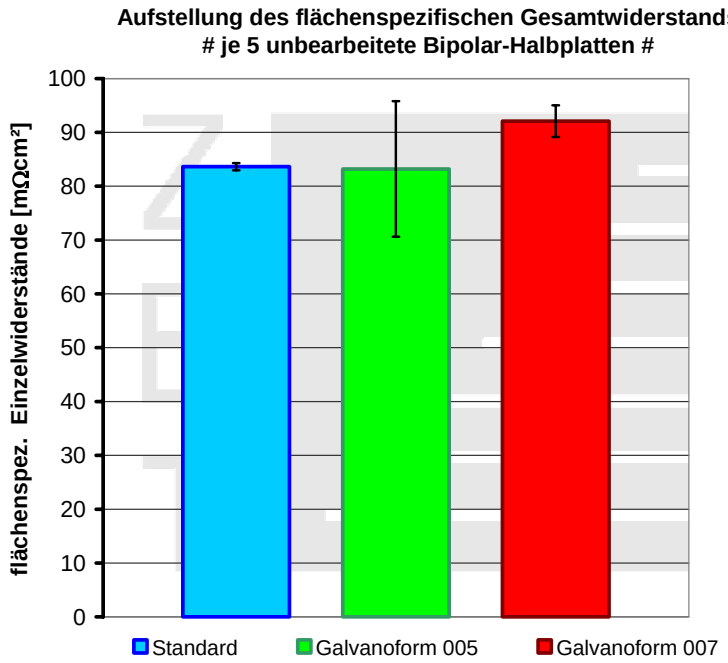


Diagramm 5.1: Vergleich Gesamtwiderstand bei 20 bar Anpressdruck

Die Widerstände aus Galvanoform 005 sind auf identischem Niveau wie von Standard BPHP, was nicht verwunderlich ist, da alle Versuche mit identischem Compound durchgeführt wurden. Lediglich die Varianz ist deutlich erhöht, was vermutlich auf den Einsatz des Formtrennmittels zurückzuführen ist. Die Widerstände der BPHP aus Galvanoform 007 liegen geringfügig höher als beim Standard. Ursache dafür könnte sein, dass das Nut-Stegbreitenverhältnis nicht exakt den Vorgaben entspricht, sondern etwas breitere Stege vorliegen, was bei identischen Messeinstellungen einen geringeren Anpressdruck und somit höhere Widerstände hervorruft. Die Abweichung vom Sollwert des Nut-Stegbreitenverhältnisses konnte mit der vorhandenen Messtechnik nicht ermittelt werden. Die Varianz dieser Messung ist ebenfalls höher als beim Standard, jedoch noch im Toleranzbereich.
Die Vermessung von bearbeiteten BPHP liefert ein vergleichbares Bild, was nicht verwundert, da vor allem der Nachbearbeitungsprozess selbst den größten Einfluss auf das Widerstandsverhalten hat. Von den elektrischen Kennwerten her können die mit Galvanoformen hergestellten Bipolarplatten somit bedenkenlos eingesetzt werden.

5.6.2 3D-Vermessung von BPHP aus Galvanoformen

Zur Überprüfung der Nuttiefen, Plattendicke, Restwandstärke und der übrigen relevanten geometrischen Daten der BPHP wurden 3D Messungen durchgeführt. Diese Messungen liefen nach dem Standard QS-Prozedere für luftgekühlte BPHP ab. Dazu musste die Position jedes einzelnen Messpunkts, aufgrund der geänderten Geometrie, auf 4 bzw. 5 Nuten angepasst werden. Anhand der Restwandstärke und Plattendicke konnten keine Auffälligkeiten festgestellt werden.
Die Nuttiefen der BPP aus Galvanoform 005 sind durchweg geringer als der Sollwert 0,9 mm, bei akzeptablen Standardabweichungen (Diagramm 5.2). Die geringere Nuttiefe ist evtl. auf die Nachbearbeitung der Galvanoform durch Glasperlstrahlen zurückzuführen, da die unbearbeitete Galvanoform, wie auch die dazugehörigen Wachspositive im Rohzustand geringere Abweichungen zum Sollwert aufweisen.

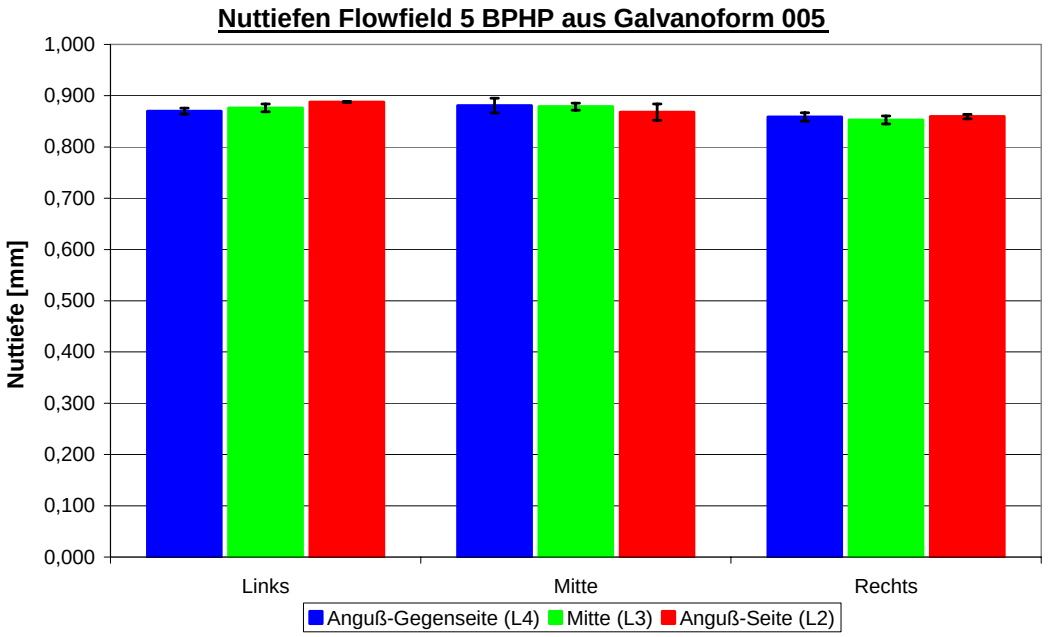


Diagramm 5.2: Nuttiefen von 5 BPHP aus Galvanoform 005

Die Nuttiefen der QS-BPHP (jede 40. wurde entnommen) aus Galvanoform 007 erreichen die Sollwertvorgaben sehr genau (Diagramm 5.3). Auch die Standardabweichungen sind auf gutem Niveau, so dass aus dieser Perspektive nichts gegen den Einsatz der BPP in einer BZ spricht.

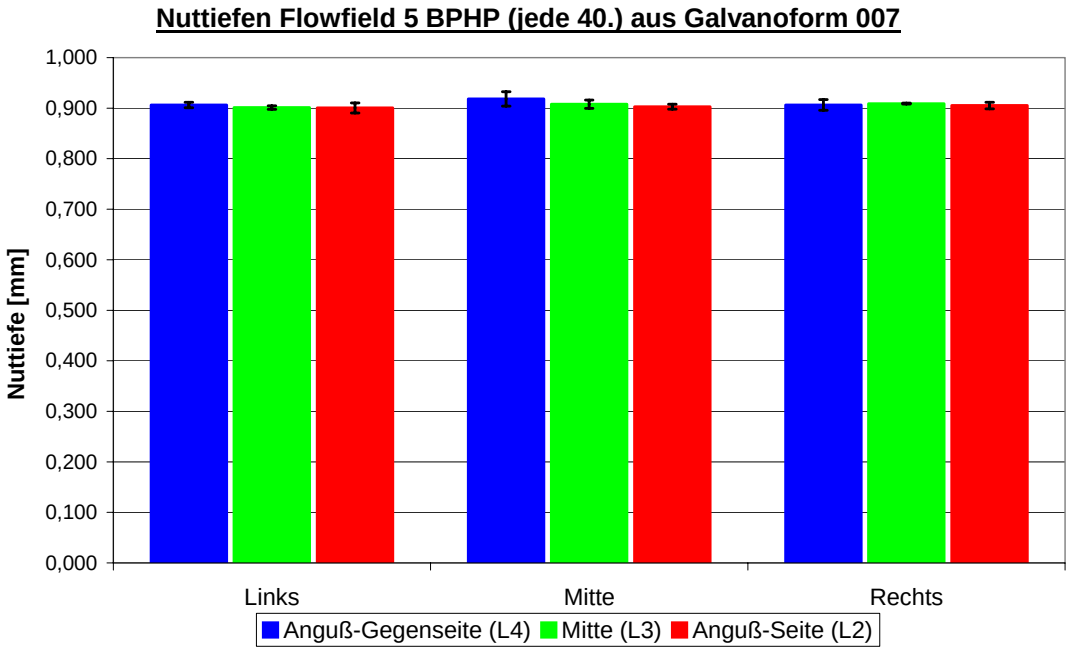


Diagramm 5.3: Nuttiefen von 5 BPHP (jede 40.) aus Galvanoform 007

Einziger Punkt der derzeit noch nicht exakt überprüft werden kann, ist die Nutbreite bzw. die gesamte Nutquerschnittsgeometrie. Bei Galvanoform 007 und dem dazugehörigem RP-Positiv von NRU haben erste Messergebnisse ergeben, dass die Nutbreite durchgehend zu gering ist. Quantitativ kann dies jedoch noch nicht bestimmt werden. Sobald quantifizierbare Ergebnisse vorliegen, sollten diese in die Herstellung neuer RP-Positive einfließen, damit Sollwertvorgaben genauer eingehalten werden.

6 Gesamtprozess-Richtlinie

6.1 Designrichtlinien für die Bipolarplatte

Die Entformungsschrägen und –radien müssen abhängig von der Oberflächenrauheit des Substratmaterials definiert werden. Unter Verwendung von Accugen 100 HC als Substratmaterial für die Galvanoformung waren 10° Entformungsschräge und Radien von 0,2 mm ausreichend, um Bipolarplatten zuverlässig entformen zu können. Dabei basierte die Konstruktion auf 4 Kanälen mit einer Nuttiefe von 0,9 mm und identischer Kontaktfläche sowie identischem Quotienten aus Nutmittenabstand und Nutbreite im Vergleich zur Standard BPHP mit 6 Kanälen. Aufgrund der guten Entformbarkeit ist es durchaus möglich Entformungsschrägen und –radien weiter zu reduzieren bzw. die Kanalanzahl wieder zu erhöhen.
Unter Verwendung des MJM Verfahrens mit dem Material Thermojet 88 und einer Strukturierung des Substrats quer zur Spritzrichtung war unter o.g. Bedingungen, allerdings mit 5 Kanälen, nur eine mäßige Entformbarkeit gegeben. Hier müsste durch geeignete Maßnahmen für eine bessere Oberflächenqualität bzw. geringere Rauheit gesorgt werden. Alternativ dazu könnten die Entformungsschrägen und –radien vergrößert werden, was jedoch nur in geringem Maße zweckmäßig ist, da ansonsten die Kanalquerschnittfläche bei identischer Kontaktfläche zu stark reduziert wird und somit negative Auswirkungen auf Brennstoffzellenanwendungen absehbar sind.
Die RZ-Werte der Substrate sollten kleiner 20 µm an den planen Oberflächen betragen. Wichtiger ist eine möglichst geringe Rauheit an den Flanken der Nutstruktur. Bestenfalls liegt diese in polierter Qualität vor, um möglichst zuverlässige Entformungseigenschaften zu gewährleisten.

6.2 Richtlinien zur Konstruktion der Galvanoform

Die Konstruktion der Galvanoform hängt direkt mit der Konstruktion des Fundaments zur Aufnahme der Galvanoform zusammen. Bestenfalls wird für die Nutzung von Galvanoformen für bestimmte Anwendungen ein darauf ausgelegtes Spritzgießwerkzeug angefertigt. Wird auf ein vorhandenes Werkzeug zurückgegriffen, muss die Konstruktion die Gegebenheiten wie Temperierung und Auswerferplatzierung berücksichtigen. Darüber hinaus ist die Konstruktion abhängig von der geplanten Variantenvielfalt und Häufigkeit der Variantenwechsel. Für eine hohe Variantenvielfalt und häufige Wechsel ist am besten ein von vorne zugängliches System mit Niederhalter geeignet. Allerdings stellt dies besondere Herausforderungen an das Auswerfersystem und die Temperierung. Dafür sind schnelle Formwechsel garantiert und die Galvanoformen können sehr dünn ausgeführt werden und benötigen weniger Nachbearbeitungsaufwand.
Bei weniger häufigen Variantenwechseln ist eine Konstruktion denkbar, welche die Galvanoform durch Schrauben direkt am Fundament befestigt. Dazu müssen in der Galvanoform rückseitig Gewinde vorgesehen werden, was eine dickere Galvanoform voraussetzt. Dadurch kann das Fundament jedoch einteilig ausgeführt werden, was den Konstruktions- und Fertigungsaufwand reduziert sowie Vorteile bezüglich der Temperierung bietet.
Die Temperierung der Galvanoform kann aktiv oder passiv ausgelegt werden. Eine aktive Temperierung ist konstruktiv und fertigungstechnisch aufwändiger zu realisieren als die passive Variante. Zur Herstellung von Bipolarplatten mit galvanogeformten Formeinsätzen hat sich die passive Kühlung nicht nachteilig ausgewirkt. Voraussetzung dafür ist eine flächige Anpressung von der Galvanoform an das Fundament. Sollte sich eine hohe Flächenpressung als nicht ausreichend erweisen, können zusätzlich Wärmeleitpaste oder stoffschlüssige Fügeverfahren in Erwägung gezogen werden, um den Wärmeübergang zu verbessern.

6.3 Richtlinien zur Nachbearbeitung und Verwendung der Galvanoform

Abhängig von der Art der leitfähigen Startschicht auf dem RP-Körper können sich noch Rückstände davon auf der Galvanoform befinden. Diese sollten vor der weiteren Bearbeitung entfernt werden, z.B. durch Glasperlstrahlen mit geringen Drücken. Durch Sandstrahlen mit höheren Drücken besteht gegebenenfalls die Möglichkeit die Oberflächenrauheit zu reduzieren, um bessere Entformungseigenschaften zu erhalten.
Eine Galvanoform mit zu starkem Verzug muss gerichtet werden. Dies kann auf einer hydraulischen Presse unter zu Hilfenahme von Lehrenblechen erfolgen, wobei darauf zu achten ist, dass die Form nicht delaminiert. Um den Richtprozess zu erleichtern sollten vorher die Rückseite und die Außenflächen auf End- plus allseitig geringes Übermaß bearbeitet werden. Die Bearbeitung kann frästechnisch, funken- oder drahterosiv erfolgen. Nach dem erfolgreichen Richten erfolgt die mechanische Bearbeitung nach o.a. Verfahren auf Sollmaß. Damit bei der Verwendung im Spritzgießwerkzeug möglichst wenig Grat zwischen Galvanoform und Fundament entsteht, sollte die Galvanoform auf Nullmaß zur Tasche im Fundament gefertigt werden.
Beim Einsatz der Galvanoform ist darauf zu achten, dass die Oberflächen nicht beschädigt werden, da die galvanischen Nickelschichten, abhängig vom eingesetzten Elektrolyten, recht weich und somit kratzempfindlich sein können. Somit ist auch mit einem höheren Verschleiß einer Galvanoform gegenüber einer gehärteten Form aus Stahl zu rechnen. Auf die Haltbarkeit kann durch Auswahl geeigneter Einspritzparameter Einfluss genommen werden.

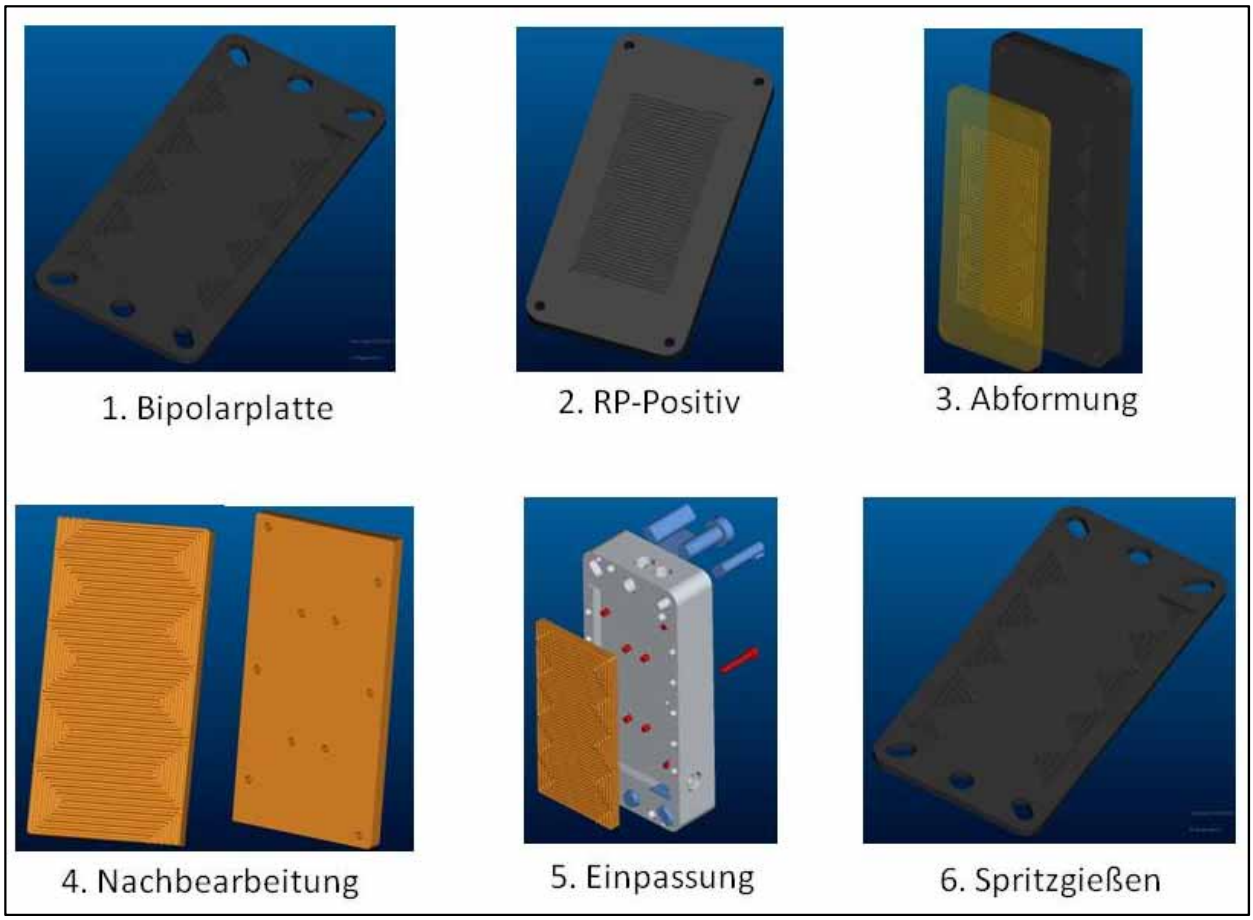


Abbildung 6.1: Prozessschritte zur Herstellung von Standardspritzgussformeinsätzen auf Basis galvanisch abgeformter RP-Bauteile

7 Ergebnisauswertung und Schlussfolgerung

Die bisherigen Ausführungen zeigen deutlich, dass die wesentlichen Projektziele erreicht werden konnten. Die Machbarkeit des Verfahrens ist bewiesen und erste Optimierungen wurden durchgeführt. Zudem ist von einer wirtschaftlichen Durchführbarkeit des neuen Verfahrens auszugehen. Auch wenn bereits eine erste Kleinserie mit einem galvanogeformten Spritzgießwerkzeug hergestellt wurde, konnten während der Durchführung des Projektes auch einige Aspekte herausgestellt werden, die es weiter zu verbessern gilt. Dazu zählen:

- Minimierung der Oberflächenrauheit und des Treppenstufeneffektes der RP–Teile
- Minimierung des Bauteilverzugs der RP–Teile
- Optimierung der Nachbearbeitung der RP-Teile
- Untersuchungen weiterer potentieller Verfahren
- Weitere Versuche bzw. Umsetzung der einebnenden Schicht
- Reduzierung der Spannungen und des resultierenden Bauteilverzuges während des Galvanoprozesses
- Größere Wannenvolumina für stabilere Bedingungen bei der Abscheidung
- Optimierung der Blendentechnik
- Optimierung der Elektrolytanströmung
- Untersuchung reduzierter Einspritzdrücke aufgrund reduzierter Nutanzahl
- Untersuchung des Betriebsverhaltens von Brennstoffzellen mit reduzierter Nutanzahl

Erste Gespräche über eine gemeinsame Bearbeitung der genannten Aspekte wurden bereits geführt.

8 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittelständische Unternehmen

Um die wirtschaftliche Bedeutung der entwickelten Verfahrenskombination abschätzen zu können erfolgte eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Vergleich zur konventionellen Herstellung von Spritzgussformen. Dabei wurde lediglich eine Werkzeughälfte betrachtet, da die Rückseite der BPP unverändert bleiben sollte. Die Berechnungen basieren auf Angeboten aus der Industrie, sowie auf Versuchsproduktionen im RP – Bereich, die am Lehrstuhl für Fertigungstechnik durchgeführt wurden. Tabelle 8.1 stellt die entstehenden Kosten gegenüber. Alle aufgezeigten Kosten sind dabei netto Angaben.

Tabelle 8.1: Kosten für die Werkzeugherstellung

Formteil	Konventionelle Fertigung	Neue Prozesskette (MJM)	Neue Prozesskette (LS)
Stammform	9500 €	9500 €	9500 €
Formeinsatz	7500 €	-	-
Fundament	-	5200 €	5200 €
Galvanoeinsatz	-	3926 €	3730 €
Summe	17000 €	18626 €	18430 €

In der Tabelle ist zu sehen, dass unabhängig von der Art der Herstellung immer eine Stammform benötigt wird. Bei konventioneller Fertigung kommt ein Formeinsatz hinzu der bei der neuen Prozesskette durch ein Fundament und einen Galvanoeinsatz ersetzt wird. Zunächst wird deutlich, dass die Werkzeugherstellung durch die neue Verfahrenskombination geringfügig höhere Kosten verursacht. Dieser Kostennachteil ändert sich allerdings, wenn davon ausgegangen wird, dass durch das neue Verfahren Versuchsformen hergestellt werden. Dabei kommt in der Regel nicht nur eine Variante zum Einsatz, gerade wenn schon in frühen Stadien der Produktentwicklung Probeabgüsse erfolgen sollen. Zudem ist grundsätzlich eine Tendenz zu höherer Variantenvielfalt und somit zu Kleinserien zu sehen. In diesem Fall können für alle drei verglichenen Verfahren die Stammformen für unterschiedliche Varianten verwendet werden. Bei der neuen Verfahrenskombination kommt das Fundament als widerverwendbar hinzu. Somit belaufen sich die fixen Kosten für die konventionelle Fertigung auf 9500 €, für die neue Verfahrenskombination auf 14700 €. Pro Variante kommen bei der konventionellen Fertigung als variable Kosten der Formeinsatz (7500 €) und bei der neuen Prozesskette der Galvanoformeinsatz (ca. 3900 bzw. 3700 €) hinzu. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich ein Break – Even – Point ab einer Variantenzahl 2, wie in Abbildung 8.1 zu sehen ist.

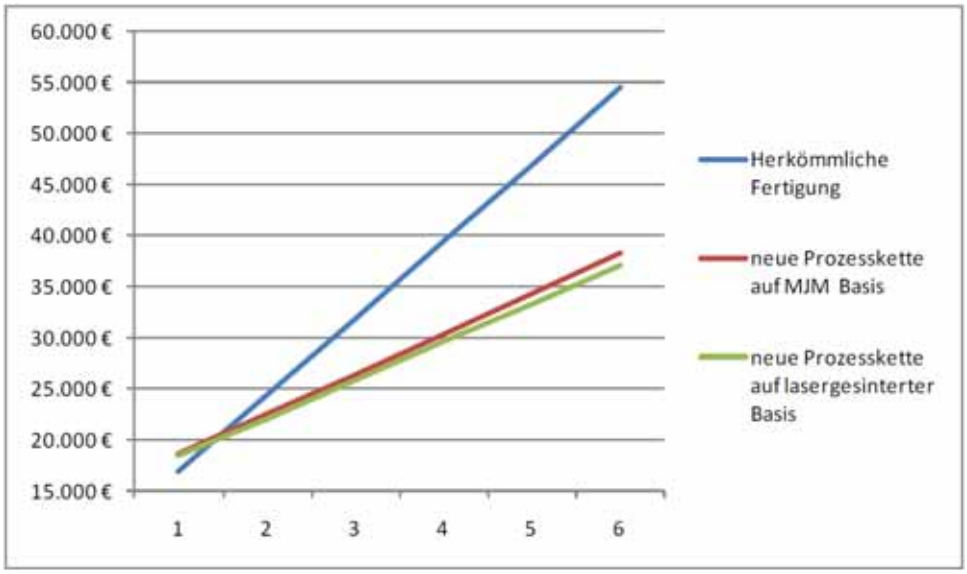


Abbildung 8.1: Kostenvergleich bei mehreren Varianten

8.1 Voraussichtliche Nutzung der Forschungsergebnisse

Das entwickelte Verfahren bietet durchaus Potential zur Anwendung in der Industrie. Durch bereits getätigte und geplante Veröffentlichungen bleibt abzuwarten, ob Unternehmen das Verfahren annehmen um es in ihren Bereichen umzusetzen. Gerade im Bereich von Versuchsformen bzw. Erstmustern sind die kürzere Fertigung und die voraussichtlichen Kostenersparnisse bei hoher Variantenvielfalt zu nennen, die für industrielle, aber auch für Forschungszwecke von Bedeutung sein könnten. So könnten beispielsweise in frühen Phasen der Produktentwicklung, bei noch nicht sicherem endgültigem Produktdesign bereits Gussversuche durchgeführt werden, ohne dadurch die Kosten für die Entwicklung in nicht vertretbarem Ausmaß zu steigern. Zudem ist es durchaus möglich, die Stammform, in die der Galvanoformeinsatz eingelegt wird auch für ein späteres Serienwerkzeug zu verwenden. Dadurch sinkt der Kostenaufwand für Gussversuche weiter. Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich in diversen Bereichen des Spritzgusses, wobei die Bauteilgröße durch die Möglichkeiten des eingesetzten RP – Verfahrens limitiert ist.

8.2 Möglichkeiten zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von KMU

Die Entwicklung des neuen Verfahrens kann sich positiv auf die Wettbewerbsfähigkeit von Galvanik – Dienstleistern, welche in der Regel KMU sind, auswirken. Mit der neuen Verfahrenskette haben Galvanik – Unternehmen zum Einen die Möglichkeit ihren Unternehmenswert durch die Anschaffung einer RP – Anlage zu steigern, oder sie gehen Kooperationen mit RP – Dienstleistern ein, welche wiederum meist selbst KMU sind. Durch die Anwendung des neuen Prozesses können beide Unternehmensarten neue Arbeitsgebiete erschließen und Kontakte aufbauen, die potentielle Aufträge sichern und den Marktwert der Unternehmen steigern. Neben den genannten Möglichkeiten für Galvano – und RP – Unternehmen besteht auch das Potential einer Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit für den Betriebsmittel- und Formenbau.

8.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Da die untersuchte Verfahrenskombination in dieser Form laut der Recherchen der Forschungsstellen bisher nicht eingesetzt wurde, ist der vollzogene Forschungsaufwand in jedem Fall angemessen. Die neue Prozesskette konnte erfolgreich eingesetzt werden, wodurch ein neues Einsatzgebiet für zwei Spezialverfahren, das Galvanoformen und die generativen Fertigungsverfahren, entstanden ist. Somit ergeben sich für potentielle Anwender, aber auch für die weitere Forschung neue Aspekte hinsichtlich des Verfahrens. Die genutzten Kontakte zur Industrie, wie auch die Kooperationen mit Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses haben gezeigt, dass Interesse an den Forschungsergebnissen besteht. Zudem zeigt die Bereitschaft eines großen Teils der Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses bei einem eventuellen Folgeprojekt erneut mitzuwirken die Angemessenheit der geleisteten Arbeit.

9 Ergebnistransfer / Veröffentlichungen

- Zwischenbericht 2008
- Zwischenbericht 2009
- Schlussbericht

Publikationen:

Bermayer, N.; Derrer, J-P; Galvanisieren von RP-Bauteilen; Vortrag Messe Erfurt: RapidTech 2009

Brokamp, S.; Baier, O.; Esswein, N.: AiF Entwicklung eines neuen Verfahrens für die kostengünstige Fertigung von Bipolarplatten mit Hilfe galvanogeformter Spritzgusswerkzeuge; Posterbeitrag: Brennstoffzellen Allianz 2010

Esswein, N.; Pfund, A.; Brokamp, S.; Baier, O.: Entwicklung eines neuen Verfahrens für die kostengünstige Fertigung von Bipolarplatten mit Hilfe galvanogeformter Spritzgusswerkzeuge, Beitrag auf der fem Homepage

Esswein, N.: Entwicklung eines neuen Verfahrens für die kostengünstige Fertigung von Bipolarplatten mit Hilfe galvanogeformter Spritzgusswerkzeuge, fem Jahresbericht 2010

Derieth T.: Galvanogeformte Spritzgießwerkzeuge: Entwicklung eines neuen Verfahrens für die kostengünstige Herstellung von Bipolarplattenkleinserien mit Hilfe galvanogeformter Spritzgießwerkzeuge, ZBT, Statusbericht 2010

Geplante Publikationen:

Beitrag im RTejournal

Auf die Anmeldung gewerblicher Schutzrechte wurde verzichtet.

10 Organisatorische Durchführung

10.1 Durchführenden Forschungsstellen

Das Forschungsvorhaben wurde von drei Forschungsstellen, mit projektspezifischen Kompetenzfeldern auf dem Gebiet der Oberflächentechnik, Brennstoffzellentechnik und Fertigungstechnik, durchgeführt.

Forschungsinstitut Edelmetalle & Metallchemie (fem)

- Oberflächenoptimierung
- Kunststoffgalvanisierung
- Galvanoformung

Zentrum für Brennstoffzellen Technik (ZBT)

- Brennstoffzelle
- Bipolarplatte
- Spritzguss

Universität Duisburg-Essen, Institut für Produkt Engineering (IPE)

- Rapid Prototyping
- Fertigungstechnik
- Werkzeugbau

10.2 Projektbegleitender Ausschuss als Teil des Transferkonzepts

Der Projektbegleitende Ausschuss bestand aus insgesamt elf Mitgliedern der Industrie (Tabelle 10.1). Zehn Vertreter kamen von kleinen mittelständischen Unternehmen.

Tabelle 10.1: Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses

Unternehmen	Adresse	Bereich	kmU
Diener electronic GmbH & Co.KG	Nagolder Str. 61 72224 Ebhausen	Plasmabehandlung	Ja
ELEKTROFORM GmbH & Co.KG	Wilstedter Weg 13 22851 Norderstedt	Galvanoformung	Ja
EOS GmbH	Robert-Stirling-Ring 1 82152 Krailling	Rapid Prototyping	Ja
Fichtner & Schicht Galvanoformung GmbH	Germaniastr. 4 33189 Schlangen	Galvanoformung	Ja
FWB Kunststofftechnik GmbH	Blocksbergstr. 175 66955 Pirmasens	Brennstoffzellen-Technik	Ja
Galvanoform Gesellschaft für Galvanoplastik mbH	Raiffeisenstraße 8 77933 Lahr	Galvanoformung	Ja
Galvano-Technik GmbH	Raiffeisenstraße 8 51570 Windeck	Galvanoformung	Ja
GEWEKU GmbH	Märkische Str. 26 58553 Halver	Werkzeugbau	Ja
NovoPlan GmbH	Robert-Bosch-Str. 41 73431 Aalen	Galvanoformung	Ja
NRU Präzisionstechnologie GmbH	Südstraße 3 09221 Neukirchen	Rapid Prototyping	Ja
SKF Sealing Solutions GmbH	Düsseldorfer Str. 121 51379 Leverkusen	Dichtungstech-nologie	nein

Es fanden 3 Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses statt. Während der Sitzungen wurden Vorträge über die aktuellen Projektfortschritte gehalten und im Anschluss aufschlussreiche Diskussionen mit den Mitgliedern geführt. Die Gespräche sind ein wichtiger Teil des Transferkonzepts, das neben den Veröffentlichungen auf Tagungen und in Fachzeitschriften auch den direkten Kontakt mit der Industrie vorsieht. Weitere Kontakte sind im Rahmen der jährlichen Treffen der AiF-Brennstoffzellenallianz am ZBT in Duisburg geplant.

Datum	Veranstaltungsort	Veranstaltende Forschungsstelle	Anzahl der teilnehmenden PA-Mitglieder
13.11.2008	Duisburg	ZBT	7
30.06.2009:	Schwäbisch Gmünd	fem	5
15.06.2010:	Duisburg	ZBT	7

10.3 Verwendung der Zuwendung und Personaleinsatz

Arbeitspaket		**FS 1 (fem)**	**FS 2 (ZBT)**	**FS 3 (IPE)**
1 Design der Bipolarplatten	Wiss. Mitarbeiter		3.4	1.35
	Techn. Mitarbeiter			
	Stud. Hilfskraft			0.84
2.1 Übertragung auf RP-Positiv - Werkstoffe	Wiss. Mitarbeiter			3
	Techn. Mitarbeiter			
	Stud. Hilfskraft			4.12
2.2 Beschichtungsfähigkeit	Wiss. Mitarbeiter	4.35		2.74
	Techn. Mitarbeiter	4.45		
	Stud. Hilfskraft			1.77
2.3 Bau erster Prototypen	Wiss. Mitarbeiter			6.18
	Techn. Mitarbeiter			
	Stud. Hilfskraft			6.08
3.1 Optimierung Oberflächenqualität	Wiss. Mitarbeiter	1.25	8.6	3.23
	Techn. Mitarbeiter	1.65	1.5	
	Stud. Hilfskraft			4.39
3.2 Optimierung Trennschicht	Wiss. Mitarbeiter	1.15		
	Techn. Mitarbeiter	0.9		
	Stud. Hilfskraft			
3.3 Galvanoformung	Wiss. Mitarbeiter	6		
	Techn. Mitarbeiter	5		
	Stud. Hilfskraft			
4.1 Werkzeugaufnahme	Wiss. Mitarbeiter		2	
	Techn. Mitarbeiter		3.5	
	Stud. Hilfskraft			
4.2 Galvanoform als Spritzgusswerkzeug	Wiss. Mitarbeiter		5.9	
	Techn. Mitarbeiter		6.1	
	Stud. Hilfskraft			
5 Weiterentwicklung/Optimierung	Wiss. Mitarbeiter	2.25	1.9	2.5
	Techn. Mitarbeiter		0.9	
	Stud. Hilfskraft			3
6 Gesamtprozess-Richtlinie	Wiss. Mitarbeiter	0.5	0.2	0.25
	Techn. Mitarbeiter			
	Stud. Hilfskraft			
Koordination	Wiss. Mitarbeiter	4		
	Techn. Mitarbeiter			
	Stud. Hilfskraft			
Berichterstellung	Wiss. Mitarbeiter	1	0.5	0.75
	Techn. Mitarbeiter			
	Stud. Hilfskraft			
Veröffentlichung	Wiss. Mitarbeiter	0.5	0.5	1
	Techn. Mitarbeiter			
	Stud. Hilfskraft			
Summe IST		**33**	**35**	**41.2**
	Wiss. Mitarbeiter	21	23	21
	Techn. Mitarbeiter	12	12	0
	Stud. Hilfskraft	0	0	20.2
Soll laut Finanzierungsplan	Wiss. Mitarbeiter	21	33	21
	Techn. Mitarbeiter	12	0	0
	Stud. Hilfskraft	0	0	24

11 Literatur

[1] Gebhardt, A.; Rapid Prototyping; 2. Aufl.; Hanser; München, 2000
[2] Sauer, A.; Optimierung der Bauteileigenschaften beim Selektiven Lasersintern von Thermoplasten; Dissertation; 2005; (Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt)
[3] VDI – Verein Deutscher Ingenieure: VDI – Richtlinie 3404 (Entwurf), Generative Fertigungsverfahren, Rapid – Technologien (Rapid Prototyping), Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen, Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2007

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Spritzgegossene Bipolarplatte einer PEM-Brennstoffzelle (rechts: Flowfieldstruktur) [Quelle: ZBT, Duisburg] 5
Abbildung 2.2: Exemplarische Darstellung der Abformung eines Standardspritzgussformeinsatzes im Rahmen der Projektidee 6
Abbildung 2.3: Prozesskette der neuartigen Verfahrenskombination 6
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Prozesskette generativer Verfahren 9
Abbildung 3.2: Oben: Draufsicht auf Flowfieldstruktur einer BPP (137,5x62x2,9mm); Unten: Schnitt durch die BPP 11
Abbildung 3.3: Makroaufnahme einer Nut an TK1 aus PA 12
Abbildung 3.4: Galvanische Abscheidung auf RP-Träger aus PA 12
Abbildung 3.5: Übersicht über die verschiedenen Testkörper 13
Abbildung 3.6: Einflussgrößen auf den Lasersinterprozess [2] 14
Abbildung 3.7: Makroaufnahmen der Nutprofile in Abhängigkeit der Verfahrens- und Werkstoffkombination 17
Abbildung 3.8: Durchschnittswerte der gemittelten Rauheit Rz, Testkörper 1 17
Abbildung 3.9: Maßabweichung in %, Testkörper 1 18
Abbildung 3.10: Draufsicht auf Flowfieldstruktur des resultierenden RP-Trägers; Unten: Schnitt durch RP-Träger 19
Abbildung 3.11: BPP-WKZ aus Wachs; links: grundplattenparallele und um x=8° / y=8° gedrehte Bauweise; rechts: Oberflächen 20
Abbildung 3.12: Vergleich der Flächeninhalte einer Schicht bei grundplattenparalleler und geneigter Bauteilorientierung 20
Abbildung 3.13: links: BPP-WKZ-Modell auf Kupferplatte; rechts: Haftungsproblematik an Bauteilecken 21
Abbildung 3.14: BPP-WKZ-Modelle: links: DLP: R11; Mitte: DLP: RCP 30; rechts: SL: AccuGen 100HC 21
Abbildung 3.15: Gesamtübersicht der Nachbearbeitung von TJ88 22
Abbildung 3.16: Rauheitswerte der nachbehandelten Testkörper 23
Abbildung 3.17: Abgießversuche mit 2K-Harz (durchsichtig), Gießharz/Hagebaumarkt, Silikon 24
Abbildung 3.18: Temperaturverlauf beim MJM 25
Abbildung 3.19: Ergebnisse der Abkühlversuche 26
Abbildung 4.1: Prinzipieller Schichtaufbau bei der Herstellung der Galvanoform (Negativ-Werkzeug) aus einem RP-Positiv einer Bipolarplatte 27
Abbildung 4.2: vereinzelte Pd-Keime auf der Polyamidoberfläche 30
Abbildung 4.3: einzelner Pd-Keim (EDX-Analyse: Pd, Sn, Cl) 30
Abbildung 4.4: sehr viele Pd-Keime 31
Abbildung 4.5: Polyamid; bekeimt, chem. Ni, verkupfert (sauer) - Querschliff 31
Abbildung 4.6: Polyamid, unbeschichtete Stellen 31
Abbildung 4.7: Polystyrol bekeimt, chem. Ni + verkupfert (sauer) - Querschliff 32
Abbildung 4.8: Polyamid, lackiert und verkupfert (sauer) 32
Abbildung 4.9: Wachs; graphitisiert + verkupfert 33
Abbildung 4.10: NanoCure RCP 100, bekeimt + chem. Ni 33
Abbildung 4.11: NanoCure RCP 100, bekeimt + chem. Ni + Cu (sauer) 33
Abbildung 4.12: graphitgefülltes Polyamid, direkt verkupfert 33
Abbildung 4.13: mit Aktivierung (Ar) 34
Abbildung 4.14: mit Aktivierung (O2) 34
Abbildung 4.15: ohne Aktivierung 34
Abbildung 4.16: Polyamid-Körner an der Testkörperoberfläche 35

Abbildung 4.17: lackierter Polyamid-Testkörper 35
Abbildung 4.18: lackierter Polyamid-Testkörper ohne Benetzungsprobleme 36
Abbildung 4.19: lackierter Polyamid-Testkörper mit Benetzungsproblemen 36
Abbildung 4.20: vernickeltes Messing-Positiv (Positiv) 37
Abbildung 4.21: Galvanoform 37
Abbildung 4.22: Entformungsversuch: graphitgefüllten Polyamid und Galvanoform 38
Abbildung 4.23: Cu-Galvanoform Wachs 38
Abbildung 4.24: Ni Galvanoform Wachs 38
Abbildung 4.25: Galvanoform Nanocure 39
Abbildung 4.26: Versuchsanlage für die Galvanoformung 40
Abbildung 4.27: Elektrolytbehälter (links), Temperaturregler für die Heizung (Mitte), Stromversorgung (Galvanostat, rechts) 40
Abbildung 4.28: Pumpe mit drei Filtereinheiten (mit einem groben und einem feinen Filter und Aktivkohlefilter) 40
Abbildung 4.29: Elektrolytwanne mit stufenloser Anströmung 40
Abbildung 4.30: Stromdichteverteilung nach der Simulation 41
Abbildung 4.31: Abwicklungen der Schichtdickenverteilung entlang der x-Koordinaten aus dem vorherigen 2D-Schnitt. 41
Abbildung 4.32: Galvanoformungszelle 1 42
Abbildung 4.33:Galvanoformungszelle 2 42
Abbildung 4.34: Verlauf der inneren Spannungen in mit verschiedenen Netzmittelkonzentrationen abgeschiedenen Nickelniederschläge 43
Abbildung 4.35: Gefräster Kupfer-Träger 44
Abbildung 4.36: Makroaufnahme einer Flowfield-Nut 44
Abbildung 4.37: Galvanoform von der Kupferplatte 44
Abbildung 4.38:Galvanoform 4 (gefertigt bei Firma Galvanoform in Lahr) 45
Abbildung 4.39: Galvanoform 5 (gefertigt bei Firma Galvanoform in Lahr) 45
Abbildung 4.40: Galvanoform 7 AccuGen 100HC 46
Abbildung 4.41: Galvanoform 7 AccuGen 100HC, Detail 46
Abbildung 5.1: 3D-Modell des ersten Probenkörpers 47
Abbildung 5.2: 3D-Modelle der weiterentwickelten Probenkörper 48
Abbildung 5.3: CAD-Modell der Bipolarplatte mit 5 Nuten 48
Abbildung 5.4: Gaseinlassbereich mit 5 bzw. 4 Nuten 49
Abbildung 5.5: Rahmenplatten und Formeinsätze der Auswerfer- und Düsenseite 49
Abbildung 5.6: 2 Konstruktionsvarianten von Galvanoform und Fundament 51
Abbildung 5.7: Variante 3 der Galvanoform-Fundament-Baugruppe, links CAD-Modell, rechts fertiges Bauteil mit eingesetzter Galvanoform 52
Abbildung 5.8: Überhöhte 3D Darstellung Polyamid-Testkörper, links Gesamtdarstellung, rechts Vergrößerung des Zentrums 53
Abbildung 5.9: Überhöhte 3D Darstellung Multijet-Modeling-Testkörper aus Wachs, links Gesamtdarstellung, rechts Vergrößerung des Zentrums 54
Abbildung 5.10: Überhöhte 3D-Detailscan Vero Blue – Objet-Eden350V, links Gesamtdarstellung, rechts Vergrößerung des Zentrums 54
Abbildung 5.11: Überhöhte 3D Darstellung eines MJM RP-Positivs aus Wachs mit Strukturierung parallel zur kurzen Seite 55
Abbildung 5.12: Überhöhte 3D Darstellung des Flowfieldbereichs eines MJM RP-Positivs aus Wachs 56
Abbildung 5.13: Messlinien zur Bestimmung von Krümmung & Nuttiefe 56
Abbildung 5.14: Profilverläufe der Stegstruktur Max.-Min.: 275µm 57
Abbildung 5.15: Histogramm des Flowfieldbereichs 57

Abbildung 5.16: 3D Darstellung eines MJM RP-Positivs aus Wachs aus einem Abkühlversuch, links Gesamtdarstellung, rechts Flowfieldausschnitt .58
Abbildung 5.17: Histogramm (links) und Profilverläufe (rechts) aus eines MJM RP-Positivs aus Wachs aus einem Abkühlversuch 58
Abbildung 5.18: SLA RP-Positiv von NRU 001 aus AccuGen 100 HC und daraus hergestellte Galvanoform 007 59
Abbildung 5.19: 3D Darstellung des RP-Positivs von NRU 001 aus AccuGen 100 HC (links) und daraus hergestellte Galvanoform 007 (rechts).....59
Abbildung 5.20: 3D Darstellung des Flowfieldbereichs des RP-Positivs von NRU 001 aus AccuGen 100 HC (links) und der daraus hergestellten Galvanoform 007 (rechts) 60
Abbildung 5.21: Profillinien des Stegbereichs des RP-Positivs von NRU 001 aus AccuGen 100 HC (links) und der daraus hergestellten Galvanoform 007 (rechts).....60
Abbildung 5.22: Galvanoform 004 auf Wachsbasis und mechanisches Richten einer Galvanoform in der 100 to. Hydraulikpresse 61
Abbildung 5.23: 3D Darstellung des Flowfieldbereichs von Galvanoform 004 vor und nach dem Richten 61
Abbildung 5.24: Profillinien des Stegbereichs von Galvanoform 004 vor und nach dem Richten.....62
Abbildung 5.25: 1. Entformung mit Galvanoform 004.....63
Abbildung 5.26: Stereomikroskopische Aufnahme Galvanoform 004.....63
Abbildung 5.27: Kleinserie mit Galvanoform 005.....64
Abbildung 5.28: Teilweise schlechte Entformbarkeit mit Galvanoform 005 und Ausbrüche im Flowfieldbereich sowie Haarrisse im Angussbereich des Gaseinlassschlitzes.....64
Abbildung 5.29: Überarbeiteter Langloch-Kern, eingesetzt 65
Abbildung 5.30: Strukturierung von Galvanoform 005 & Nutgrund einer BPHP aus Galvanoform 005 66
Abbildung 5.31: Werkzeug mit Galvanoform 007 & damit produzierte BPP 67
Abbildung 6.1: Prozessschritte zur Herstellung von Standardspritzgussformeinsätzen auf Basis galvanisch abgeformter RP-Bauteile 71
Abbildung 8.1: Kostenvergleich bei mehreren Varianten.....74

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Auszuführende Tätigkeiten der kooperierenden Forschungsstellen 6
Tabelle 3.1: Generative Verfahren nach VDI 3404 [3] 10
Tabelle 3.2: Makroaufnahmen (3x Vergrößerung) der Nutgeometrien an Testkörper 1 15
Tabelle 3.3: Makroaufnahmen (3x Vergrößerung) der Nutgeometrien an Testkörper 2 15
Tabelle 3.4: Makroaufnahmen (3x Vergrößerung) der Nutgeometrien an Testkörper 3 16
Tabelle 3.5: optische Begutachtung der Nachbearbeitung 23
Tabelle 4.1: Übersicht der Werkstoffe und Prozessschritte 30
Tabelle 4.2: Versuchsparameter 34
Tabelle 4.3: Übersicht der Arbeitsschritte 37
Tabelle 4.4: Übersicht der Arbeitsschritte 44
Tabelle 8.1: Kosten für die Werkzeugherstellung 73
Tabelle 10.1: Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses 78