

AiF-Vorhaben Nummer: 16072 BG

Laufzeit: 01.05.2009 – 31.07.2011

Titel des Vorhabens: **Entwicklung einer Methode zur Qualitätssicherung bei der Fertigung von Bipolarplatten für Brennstoffzellen**

Forschungsstellen:

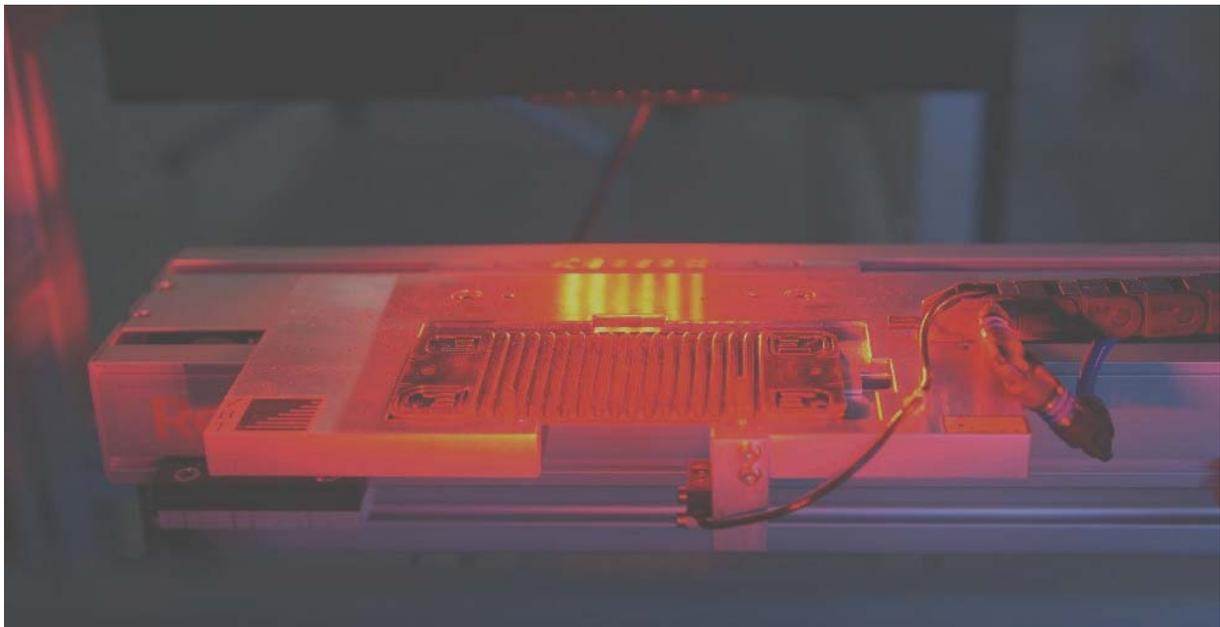
- 1.) Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH (ZBT)
- 2.) Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFaI)

Bearbeitung:

Dipl.-Ing. Tobias Grimm (ZBT)

Dipl.-Inf. Volker Kippelt (GFaI)

Duisburg und Berlin, Oktober 2011



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 16072 BG der Forschungsvereinigung Umwelttechnik wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Inhaltsverzeichnis

1	Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses.....	6
2	Zusammenfassung	7
3	Ausgangssituation / Problemstellung.....	8
4	Forschungsziel.....	11
5	Lösungsweg / Ergebnisse.....	12
5.1	Arbeitspaket 1.....	12
5.2	Arbeitspaket 2.....	20
5.3	Arbeitspaket 3.....	37
5.4	Arbeitspaket 4.....	41
6	Bewertung / Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse.....	43
7	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse.....	45
7.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen	45
7.2	Wirtschaftlicher Nutzen.....	46
7.3	Innovativer Beitrag der Ergebnisse.....	46
7.4	Industrielle Anwendungsmöglichkeiten.....	47
8	Notwendigkeit & Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.....	47
9	Transfermaßnahmen.....	47
9.1	Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und ggf. aktualisierten Transferkonzepts	49
10	Literaturverzeichnis.....	50
11	Anhang.....	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau und Funktionsweise einer PEM-Brennstoffzelle..	8
Abbildung 2: Bipolarplatte, FlowField-Seite	9
Abbildung 3: Bestimmung des flächenspezifischen Bulkwiderstandes.....	12
Abbildung 4: Bestimmung der Biegefestigkeit	12
Abbildung 5: Zeichnung einer Bipolarplatte mit Anguss	13
Abbildung 6: Allgemeine Abmessungen einer Bipolarplatte (qualitativ zwecks Technologieschutz)	14
Abbildung 7: Messpunkte Bipolarplatte	14
Abbildung 8: Ergebnis Dickenmessung (qualitativ).....	14
Abbildung 9: Mechanische Druckverteilung (qualitativ)	15
Abbildung 10: Form- und Lagetoleranzen: Ebenheit und Parallelität.....	15
Abbildung 11: Regions of Interest, FlowField-Seite	16
Abbildung 12: Regions of Interest, Kühlungs-Seite	17
Abbildung 13: Thermographieaufnahme Haarriss mechanisch unbearbeitet	18
Abbildung 14: Thermographieaufnahme Haarriss mechanisch bearbeitet	18
Abbildung 15: Prüfreihenfolge	18
Abbildung 16: Prüfreihenfolge Revision 1	19
Abbildung 17: Prüfung auf Gratfreiheit	21
Abbildung 18: Prüfung der Ebenheit.....	21
Abbildung 19: Detektierter Haarriss.....	22
Abbildung 20: Ausschlusskriterien für unvollständige FlowField-Füllung.....	25
Abbildung 21: Messpunkte Bipolarplatte	26
Abbildung 22: Laserliniendetektion zur Bestimmung der Nuttiefe.....	26
Abbildung 23: Detektierte Laserlinien (Blende 4).....	27
Abbildung 24: Detektierte Laserlinie (Blende 11).....	27
Abbildung 25: Plattenmarkierung Aufkleber	28
Abbildung 26: Plattenmarkierung Klartext	28
Abbildung 27: unterschiedliche Ausprägung einer fehlerhaften FlowField-Füllung.....	29
Abbildung 28: FlowField unter Auflichtbeleuchtung	30
Abbildung 29: FlowField unter Dunkelfeldbeleuchtung.....	30
Abbildung 30: Prinzip der FlowField-Vermessung	30

Abbildung 31: Erkannte Ausbrüche	30
Abbildung 32: „Luftauflage“	31
Abbildung 33: „Bandauflage“	31
Abbildung 34: Thermografiebild „Luftauflage“	32
Abbildung 35: Thermografiebild „Bandauflage“	32
Abbildung 36: Durchbiegung „Luftauflage“	32
Abbildung 37: Durchbiegung „Bandauflage“	32
Abbildung 38: Konzept Prüfstationszuführung.....	33
Abbildung 39: Realisierte Prüfstationszuführung	33
Abbildung 40: Schaltschema vertikale Achse	34
Abbildung 41: Messaufbau Seitenansicht.....	35
Abbildung 42: Messaufbau Aufsicht	35
Abbildung 43: Bipolarplatte während der Prüfung	35
Abbildung 44: Prüfstation.....	35
Abbildung 45: Ausbrüche Angussseite	39
Abbildung 46: Füllungsfehler Angussgegenseite.....	39
Abbildung 47: Zuführschlitten vor der Optimierung.....	42
Abbildung 48: Zuführschlitten nach der Optimierung.....	42
Abbildung 49: Ausschnitte Richtlinie – vollständiges Dokument im Anhang.....	43
Abbildung 50: Beispiel eines Rundtaktisches, Quelle: Fa. SITEC (Mitglied des PA) .	44

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Plattenstärke Keilform, unbearbeitet (qualitativ).....	28
Diagramm 2: Plattenstärke Keilform, bearbeitet (qualitativ).....	28
Diagramm 3: Nuttiefe Keilform, unbearbeitet (qualitativ)	29
Diagramm 4: Nuttiefe Keilform, bearbeitet (qualitativ)	29
Diagramm 5: Methode der kleinsten Quadrate [Quelle: Wikipedia]	38
Diagramm 6: Qualitativer Zusammenhang: Plattendicke und Einspritzvolumenstrom	38
Diagramm 7:Qualitativer Zusammenhang: Druck und Einspritzvolumenstrom.....	38
Diagramm 8: Qualitative Zusammenhänge FlowField-Füllung	39
Diagramm 9: Qualitative Darstellung der Einflussfaktoren auf die Ebenheit / Parallelität	40
Diagramm 10: Haarriss-Leckage	41
Diagramm 11: Qualitativer Zusammenhang zwischen Widerstand und Einspritzvolumenstrom.....	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mögliche Methoden zur Fehlererkennung.....	10
Tabelle 2: Fehlerklassen und eingesetzte Beleuchtungsverfahren.....	21
Tabelle 3: Auswertung des FlowFields unter Hellfeldbeleuchtung.....	22
Tabelle 4: Fehlerdetektion unter diffusem Auflicht.....	23
Tabelle 5: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	48

1 Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses

Die Forschungsstellen bedanken sich bei den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses für ihre konstruktive Unterstützung im Rahmen des Projektes:

ACS Engineering GmbH
Dr. Burghardt Schmidt
Am Höfgen 15, 41781 Haan

divis intelligent solutions GmbH
Prof. Dr. Thomas Bäck
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 20, 44227 Dortmund

Graphikon GmbH
Prof. Dr. Jürgen Saedler
Mandelstraße 16, 10409 Berlin

Integrierte Informationssysteme für Engineering
und Facility Management GmbH
Prof. Dr. Alfred Iwainsky
Albert-Einstein-Str. 16, 12489 Berlin

FIX Maschinenbau GmbH
Edgar Lederer
Daimlerstraße 23, 71404 Korb

Krauss Maffei Technologies GmbH
Martin Würtele
Krauss-Maffei-Straße 2, 80997 München

Schunk Kohlenstofftechnik GmbH
Sven Bornbaum
Rodheimer Straße, 35452 Heuchelheim

Wilhelm Eisenhuth GmbH & Co. KG
Dr. Thorsten Hickmann
Friedrich-Ebert-Straße 203, 37520 Osterode-Lerbach

SITEC Industrietechnologie GmbH
Prof. Dr. Bernd Hommel
Bornaer Straße 192, 09114 Chemnitz

2 Zusammenfassung

Im Rahmen des IGF-Vorhabens 16072BG „Entwicklung einer Methode zur Qualitätssicherung bei der Fertigung von Bipolarplatten für Brennstoffzellen“ wurde ein qualitätssicherndes, bildverarbeitendes Verfahren zur Fehlererkennung im Produktionsprozess von Bipolarplatten (BPP) entwickelt. Dabei waren neben der Realisierung einer sicheren Identifizierung von fehlerhaften Produkten auch Erkenntnisse zur Prozessoptimierung herauszuarbeiten.

Als Entwicklungsbasis wurden die Bipolarplatten zu Beginn des Projektes hinsichtlich möglicher Produktionsfehler analysiert und eindeutige Qualitätssicherungsparameter definiert. Dabei erfolgte einerseits die systematische Unterteilung in geometrische und prozesstechnische Parameter sowie andererseits ihre Klassifikation in zwei Prüfstufen – jeweils vor und nach der obligatorischen mechanischen Nachbearbeitung der Bipolarplatten. Diese Erkenntnisse wurden in einem Anforderungskatalog dokumentiert und dienten in Verbindung mit ausgewählten Probenkörpern zur Entwicklung der Bildverarbeitungsverfahren.

Zur Entwicklung geeigneter Prüfverfahren wurden in einem ersten Schritt zunächst für jede im Anforderungskatalog definierte Fehlerklasse die optimale Beleuchtungskonfiguration und die benötigte örtliche Auflösung bestimmt. Auf Basis des gewonnenen Bildmaterials wurden im Anschluss für alle Fehlertypen angepasste Auswertelgorithmen entworfen und implementiert, die sowohl eine Bewertung der Oberfläche als auch die Bestimmung der geometrischen Dimensionen der Bipolarplatten ermöglichen. Die entwickelten Bildverarbeitungsverfahren wurden mit Hilfe von gezielt durchgeführten Fehlproduktionen als Vorbereitung für eine Prozessintegration validiert. Letztgenannte realisierte anschließend erstmalig eine in den Produktionsprozess von Bipolarplatten implementierte Qualitätskontrolle. Bedingt durch die hohe Produktionsgeschwindigkeit des Spritzgießprozesses und den komplexen Anforderungen an die Qualitätssicherung wurde im Rahmen des IGF-Vorhabens dabei die prinzipielle Methodik einer 100 % Kontrolle umgesetzt. Mit der Unterstützung des Projektbegleitenden Ausschusses wurden überdies Lösungsansätze für eine industrielle Umsetzung aufgezeigt.

Durch die ausführliche Untersuchung des Herstellungsverfahrens, insbesondere auch im Grenzbereich des Spritzgießprozesses, wurden außerdem Möglichkeiten zur Optimierung aufgezeigt und zusammenfassend in einer Richtlinie dokumentiert.

Die Ergebnisse aus den einzelnen Arbeitspaketen und die gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf die Bildverarbeitungsverfahren und den Spritzgießprozess werden in diesem Abschlussbericht ausführlich dargestellt und diskutiert sowie in Form der Richtlinie im Anhang des Dokumentes zur Verfügung gestellt. Mit den erzielten Ergebnissen steht eine grundlegende Methodik zur Qualitätssicherung von Bipolarplatten zur Verfügung:

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

3 Ausgangssituation / Problemstellung

Der beschlossene Atomausstieg bis zum Jahr 2022 macht die Entwicklung von alternativen Energiequellen für die Bundesrepublik Deutschland zu einer unerlässlichen Notwendigkeit. Hierbei gelten Brennstoffzellen aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades, ihrer Schadstoffarmut und den mit regenerativen Energien gewinnbaren Reaktionsmedien als zukunftssträchtige Lösung. Der entscheidende Vorteil dieser Technologie liegt bei einer direkten Umsetzung des Brennstoffs (z.B. Wasserstoff) in elektrische Energie. Der verlustbehaftete Umwandlungsprozess eines konventionellen Stromerzeugers entfällt [Geit04].

Die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten der letzten Jahre haben zu funktionstüchtigen Brennstoffzellensystemen geführt. Um diese in Zukunft marktfähig, d.h. reproduzierbar und kostengünstig sowie in gesicherter, hoher Qualität [He02] herstellen zu können, sind zwingend automatisierte und hochpräzise Fertigungs- und Kontrollverfahren für die einzelnen Komponenten einer Brennstoffzelle erforderlich.

Bei dem vorliegenden Forschungsvorhaben stand die Entwicklung eines qualitätssichernden Verfahrens zur Fehlererkennung im Produktionsprozess von Bipolarplatten im Fokus. Letztgenannte stellen die Hauptwiederholkomponente einer Brennstoffzelle dar, deren Aufbau in der nachfolgenden Abbildung am Beispiel einer sog. „Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle“ (kurz PEM-Brennstoffzelle) schematisch dargestellt ist:

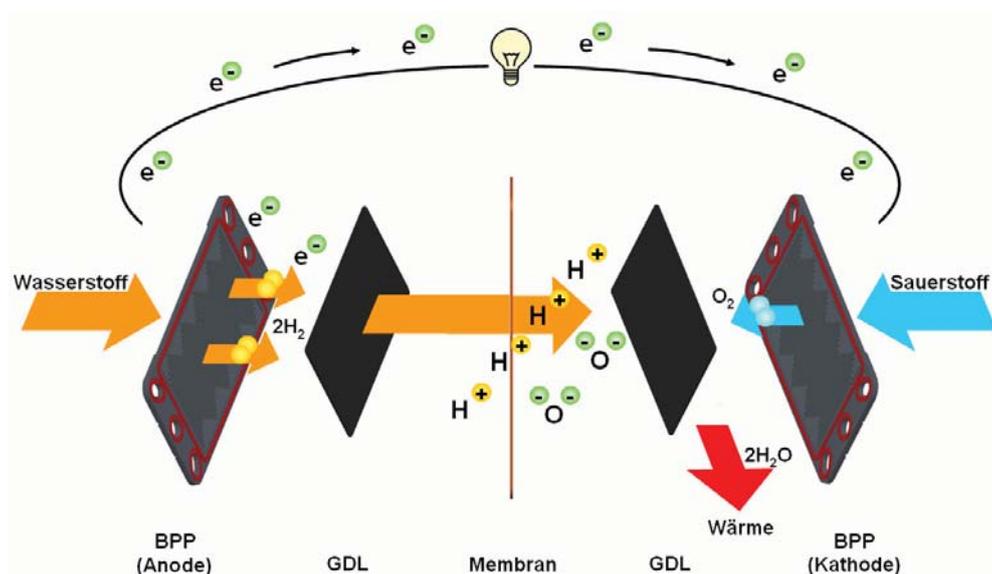


Abbildung 1: Schematischer Aufbau und Funktionsweise einer PEM-Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle besteht im Wesentlichen aus zwei Elektroden, der Anode und der Kathode, sowie einer Elektrolytmembran, die beide Elektroden und die zuzuführenden Reaktionsmedien voneinander trennt. Neben der PEM-Brennstoffzelle existieren weitere Typen, die sich im Aufbau sowie der Funktionsweise ähneln und lediglich im Elektrolytmaterial sowie der Brennstoffart und der Betriebstemperatur unterscheiden

[Hei06]. Aufgrund der weiten Verbreitung, der hohen Leistungsdichte sowie der kompakten Bauform stand jedoch die PEM-Brennstoffzelle im Fokus des Projektes.

Das Zentrum für BrennstoffzellenTechnik (ZBT) beschäftigt sich bereits seit mehreren Jahren mit der spritzgießtechnischen Herstellung von graphitischen Bipolarplatten für PEM-Brennstoffzellen. Mit Hilfe einer Hochleistungs-Spritzgießmaschine der Firma Krauss Maffei, Typ KM 500 - 1900C, die neben einer Schließkraft von 500 t einen maximalen Spritzdruck von 3500 bar aufweist, werden die punktsymmetrisch aufgebauten Bipolarplatten mit einer Länge von 137,5 mm und einer Breite von 62 mm produziert. Sie sind bei einer Dicke von 2,8 mm einseitig mit einer mäanderförmigen Anordnung von Kanälen durchzogen, dem sog. aktiven Bereich, bzw. FlowField. Durch diese Kanäle strömen während des Betriebs die beiden Reaktionsmedien. Das FlowField hat eine Gesamtfläche von 50 cm² und ein Kontakt-/Messflächen-Verhältnis von 44 %. Die Gegenseite des FlowFields ist durch Luftkühlungskanäle charakterisiert. Weitere geometrische Elemente einer Bipolarplatte sind Gasführungslöcher zur Medienversorgung und Positionierungs- bzw. Reservebohrungen.

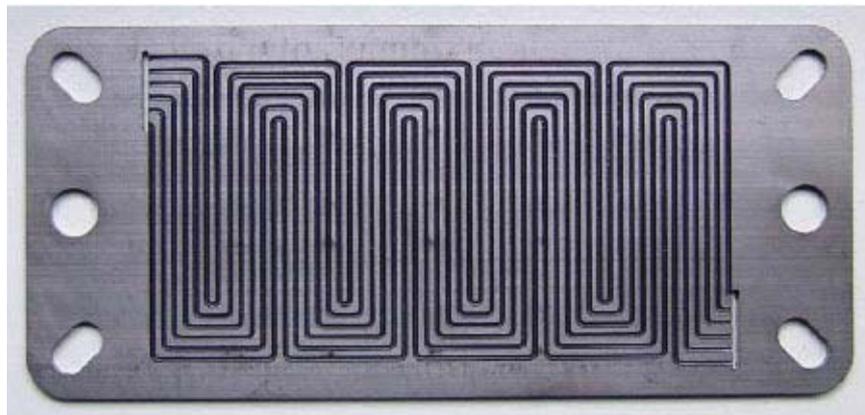


Abbildung 2: Bipolarplatte, FlowField-Seite

Im Herstellungsprozess werden die Oberflächen der Bipolarplatten durch das im Material enthaltene Bindemittel geglättet, was zu einer „Einhüllung“ der gut leitenden Graphit-Partikel und einem damit verbundenen Anstieg des elektrischen Widerstands führt [Kre08]. Daher werden die Bipolarplatten nach dem Urformen maschinell abgefräst, die Graphit-Partikel an den Oberflächen freigelegt und somit die elektrische Kontaktierung verbessert.

Die Qualitätskontrolle der spritzgegossenen Bipolarplatten erfolgte bisweilen sowohl vor als auch nach der mechanischen Bearbeitung durch einen stichprobenartigen, manuellen Prozess, der die Anforderungen an ein marktfähiges Produkt nur unzureichend erfüllt.

Für die Entwicklung des neuartigen Prüfverfahrens wurden bereits im Rahmen der Antragsstellung unterschiedliche Methoden zur Fehlererkennung analysiert und evaluiert. Dazu wurden Testreihen hinsichtlich der Detektierbarkeit ausgewählter Fehlerparameter durchgeführt. Das Ergebnis zeigt die nachfolgende Tabelle:

Tabelle 1: Mögliche Methoden zur Fehlererkennung

Fehler \ Prüfverfahren	Ultraschall	Röntgen	Bildverarbeitung
FlowField-Füllung	--	-	++
Haarriss	--	-	+
Krümmung	-	--	+
Bohrung	++	++	++

-- nicht geeignet - bedingt geeignet + geeignet ++ gut geeignet

Die Voruntersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass die Bildverarbeitung das passende Werkzeug für die Qualitätssicherung der Bipolarplatten ist. Allerdings wurde hier zu Beginn des Forschungsvorhaben technisches Neuland betreten, da zunächst Verfahren entwickelt werden mussten, um die einzelnen zu prüfenden Fehlerparameter sicher bildlich darstellen zu können. Entscheidend war neben der Wahl der richtigen Beleuchtungsgeometrien eine ausreichend hohe geometrische Auflösung um die extrem feinen Strukturen der Haarrisse im Kamerabild sichtbar zu machen. Weiterhin standen zwar Bildverarbeitungsalgorithmen, wie beispielsweise zur Texturbewertung, Kantendetektion, Soll-/Ist-Kontrolle [Hal10, Jae00, Son99] und auch Verfahren zur Ermittlung von 3D Maßen [3DNO, Gr06, Ho04] zur Verfügung, diese mussten jedoch für die konkreten Erscheinungsbilder der Bipolarplatten auf ihre Eignung hin geprüft und entsprechend adaptiert bzw. weiterentwickelt werden.

4 Forschungsziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines qualitätssichernden Verfahrens, das die Prüfung und Sicherung des Produktionsprozesses von hochgraphithaltigen Bipolarplatten gewährleistet. Dabei galt es auch die Grenzbereiche der Herstellungsverfahren (Compoundieren und Spritzgießen) zu betrachten. Bei der Prüfung sollten alle Fehlteile sicher als solche erkannt werden, um eine Verwendung von Ausschussprodukten in Brennstoffzellen zu vermeiden. Des Weiteren sollte der Spritzgießprozess durch eine systematische Datenauswertung und Informationsrückkopplung im Hinblick auf einen zukünftigen Serienprozess analysiert werden.

5 Lösungsweg / Ergebnisse

5.1 Arbeitspaket 1

Schaffung bzw. Definition der Grundlagen

1.1 Vorkonditionierung des Compoundmaterials

Für die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchzuführenden Testproduktionen wurde in der Projektphase 1 das benötigte Compound vorkonditioniert. Das hochgefüllte Material der Bipolarplatten wurde, entgegen der im Antrag aufgeführten Planung, im Ring- statt im Doppelschneckenextruder hergestellt, da erstgenannter vor dem Hintergrund der für einen Serienprozess notwendigen Hochskalierung im Fokus zukünftiger Anwendungen stehen wird. Die Parameter des Prozesses (insbesondere Temperatur, Schneckendrehzahl und Massendurchsatz) wurden im Hinblick auf einen möglichst geringen spezifischen Energieeintrag bei gleichzeitig hoher Materialqualität analysiert und optimiert. Hierzu wurden ausführliche Versuchsreihen und -auswertungen mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung systematisch erstellt und durchgeführt. Bei der fundierten Charakterisierung des eingesetzten Materials wurden in diesem Zusammenhang die signifikanten Kennwerte, der flächenspezifische Bulkwiderstand und die Biegefestigkeit ermittelt:

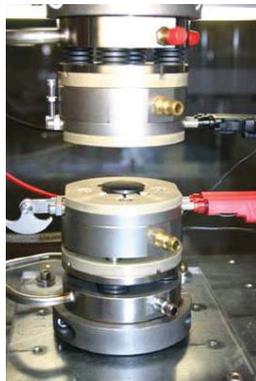


Abbildung 3: Bestimmung des flächenspezifischen Bulkwiderstandes

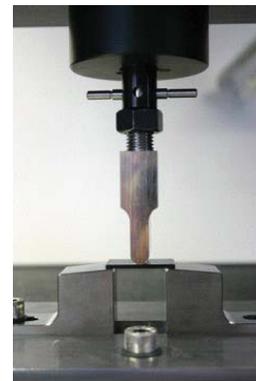


Abbildung 4: Bestimmung der Biegefestigkeit

Es wurde nachgewiesen, dass durch maschinenseitige Faktorveränderungen Prozessverbesserungen insbesondere im Bereich des Ertrages und der elektrischen Widerstände möglich sind. Speziell die Schneckendrehzahl zeigte aufgrund des Zusammenhangs zwischen der Zerteilung der Füllstoffpartikel und der Schmelztemperatur einen signifikanten Einfluss.

1.2 Definition der QS-Parameter für spritzgegossene Bipolarplatten

Als Grundlage für die Forschungstätigkeiten wurden die spezifischen Qualitätssicherungsparameter der spritzgegossenen graphitischen Bipolarplatten definiert. Da mit diesem Schritt technologisches Neuland betreten wurde, konnte auf keine bestehenden Datenbanken und Erfahrungswerte bezüglich der zu untersuchenden Parameter

zurückgegriffen werden. Die Festlegung der qualitätstechnisch relevanten Parameter wurde daher einerseits aus den konstruktiven Anforderungen an die Bipolarplatten des ZBT und andererseits anhand einer ausführlichen Analyse der im Rahmen bisheriger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erworbenen Erkenntnisse erarbeitet. Eine Übersicht der festgelegten Parameter gibt die nachfolgende Auflistung (in alphabetischer Reihenfolge):

- **Abtrennung des Anguss:** Bedingt durch das Fertigungsverfahren Spritzgießen weisen die Bipolarplatten einen Anguss auf, über den das Werkzeug mit Material gefüllt wird. Der Anguss ist bewusst fast über das gesamte Maß der Plattenlängsseite ausgeführt, um die prozessbedingten Fließwiderstände möglichst gering zu halten:

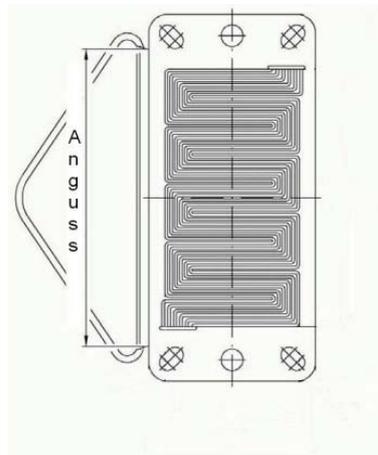


Abbildung 5: Zeichnung einer Bipolarplatte mit Anguss

Für eine einwandfreie Funktionalität der Bipolarplatten im Brennstoffzellensystem muss der Anguss nach dem Fertigungsprozess abgetrennt werden. Dies wird durch einen Entnahmeroboter der Spritzgießmaschine und einer entsprechenden mechanischen Vorrichtung realisiert. Im Rahmen des zu entwickelnden Qualitätssicherungsverfahrens musste die einwandfreie Anguss-Abtrennung überprüft werden.

- **Allgemeine Abmessungen:** Bedingt durch den komplexen Prozess des Spritzgießens kommt es im Vergleich zur ausgelegten Werkzeugkavität zu Schwindungen des Endproduktes. Bei Abweichungen von den zulässigen Toleranzen (Endmaßen), musste dies vom zu entwickelnden Qualitätssicherungsverfahren sicher erkannt werden.

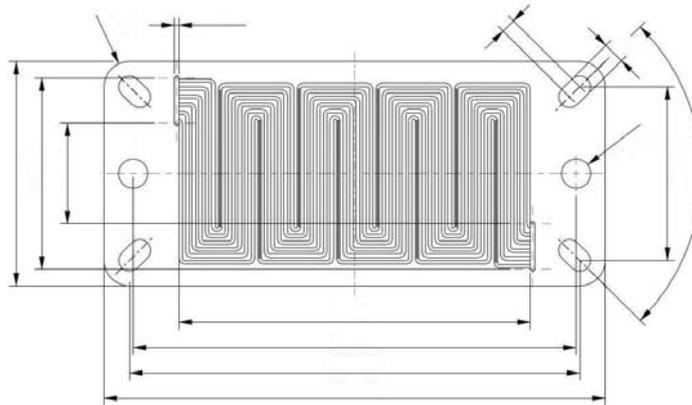


Abbildung 6: Allgemeine Abmessungen einer Bipolarplatte (qualitativ zwecks Technologieschutz)

- **Dicke:** Die Dicke ist vom Plattentyp (Luftkühlung, Wasserkühlung, niedrige Einsatztemperatur, hohe Einsatztemperatur) abhängig und zu kontrollieren.
- **Ebenheit / Parallelität:** Im Rahmen des Projektes durchgeführte Untersuchungen zeigten, dass die Bipolarplatten bedingt durch die im Anschluss an den Fertigungsprozess notwendige mechanische Nachbearbeitung eine unebene Ausprägung aufweisen:

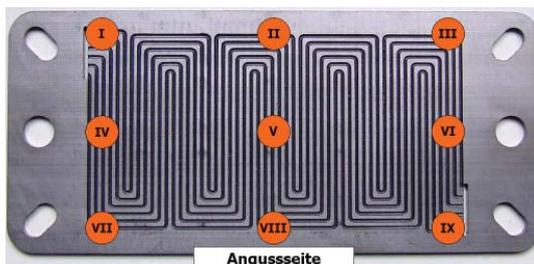


Abbildung 7: Messpunkte Bipolarplatte

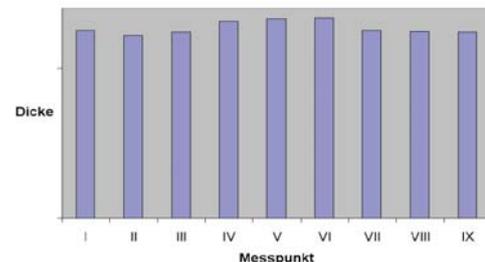


Abbildung 8: Ergebnis Dickenmessung (qualitativ)

Für einen optimalen Wirkungsgrad der Brennstoffzellen ist unter anderem eine gleichmäßige mechanische Druckverteilung über den aktiven Bereich der Bipolarplatten (FlowField) von hoher Signifikanz. Bei einer unregelmäßigen Verteilung des zellinternen mechanischen Drucks käme es in Folge von unterschiedlich hohen Kontaktwiderständen („worst case“: kein Kontakt = unendlich großer Widerstand) zu Wirkungsgradverlusten. Die topographische Ausprägung der Bipolarplatten führt zu einer solchen ungleichmäßigen mechanischen Druckverteilung im Zellstapel, wie Untersuchungen mit einem digitalen Folienmesssystem zeigten:

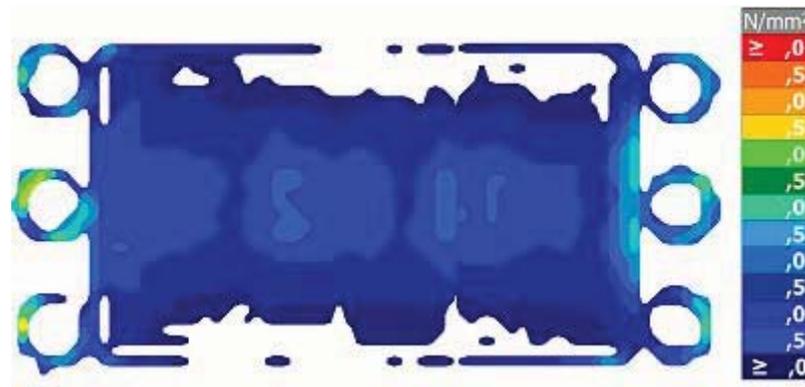


Abbildung 9: Mechanische Druckverteilung (qualitativ)

Durch konstruktive Optimierungsmaßnahmen ist dieser Effekt in seiner Ausprägung deutlich reduziert und die Qualitätssicherungsparameter Ebenheit und Parallelität mit den entsprechenden Toleranzwerten festgelegt worden. Unter Ebenheit ist dabei eine Formtoleranzzone definiert, welche durch zwei parallele Ebenen vom Abstand X begrenzt wird, deren Abmessungen denen der tolerierten Fläche entsprechen. Die reale Werkstückfläche muss zwischen den beiden parallelen Ebenen liegen. Die Lagetoleranzzone der Parallelität, innerhalb der die gegenüberliegende tolerierte Werkstückfläche liegen muss, wird hingegen durch zwei Parallelen vom Abstand Y begrenzt, die parallel zur Bezugsfläche A laufen:

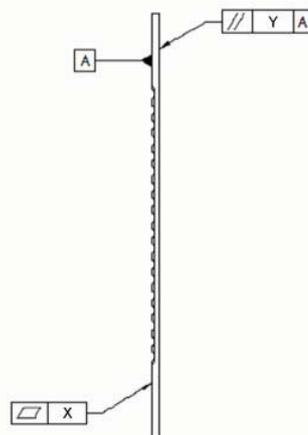


Abbildung 10: Form- und Lagetoleranzen: Ebenheit und Parallelität

- **Gewicht:** Das Gewicht der Bipolarplatten ist, ebenso wie die Dicke, vom Plattentyp abhängig und wurde im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens nicht weiter berücksichtigt, da Verfahren zur Gewichtsbestimmung innerhalb automatisierter Fertigungsprozesse bereits Stand der Technik sind.
- **Grat in den Durch- und Zuführungen:** Bedingt durch die mit Werkzeugkernen im Fertigungsverfahren Spritzgießen realisierten Durchbrüche innerhalb der Bipolarplatten (vgl. Abbildung 2) kommt es dort zu einer lokalen Gratbildung. Das überflüssige und sich auf den späteren Brennstoffzellenprozess nachteilig auswirkende Material wird im Rahmen der mechanischen Nachbearbeitung ent-

fernt. Eine Kontrolle über diesen Arbeitsschritt war im Rahmen dieses Forschungsvorhabens vorzusehen.

- **Haarriss:** Haarrisse können entstehen, wenn zwei oder mehr separate Ströme des Spritzgießmaterials während der Formfüllung nach dem Umfließen eines Kerns wieder zusammentreffen und sich verbinden. Dies ist aufgrund der thermischen Bedingungen insbesondere auf der Angussgegenseite der Fall. Haarrisse stellen ein erhebliches Problem im Hinblick auf die Stabilität und Dichtigkeit der Platten dar, so dass Verfahren zur Erkennung dieses Fehlertyps mit höchster Priorität entwickelt wurden.
- **Nuttiefe:** Bei den hohen Stückzahlen einer Serienproduktion kann es in den Nuten der Kanalstrukturen zu Ablagerungen in Folge von Werkzeugverschmutzungen kommen. Die so verengten Strukturen wirken sich nachteilig auf die Funktionalität der Brennstoffzelle aus. Eine Nutenkontrolle war somit ebenfalls anzustreben, entsprechende Toleranzbereiche wurden festgelegt.
- **Unsaubere mechanische Bearbeitung:** Beim Spritzgießprozess entsteht an den Oberflächen der Bipolarplatten eine elektrisch schlecht leitfähige Schicht, welche durch eine spanende Bearbeitung abgetragen wird. Eine Kontrolle dieser Abtragung über die gesamte Fläche sollte für einen später stabil bei hohem Wirkungsgrad laufenden Brennstoffzellenprozess überprüft werden.
- **Unvollständige Formfüllung:** Bedingt durch die Einspritzbedingungen des Compoundmaterials in die Kavität kann es durch eine mangelnde Entlüftung bei zu hohen Geschwindigkeiten zu einer unvollständigen Füllung der Kanalstrukturen kommen. Daher wurde eine Kontrolle selbiger im Rahmen dieses Forschungsvorhabens mit betrachtet.

Bei der Analyse zeigte sich, dass die oben genannten möglichen Plattenfehler teilweise nur in stark eingrenzbareren Bereichen auftreten, den so genannten „**Regions of Interest (ROI)**“. Diese sind für die luftgekühlten Bipolarplatten des ZBT in den beiden folgenden Abbildungen dargestellt:

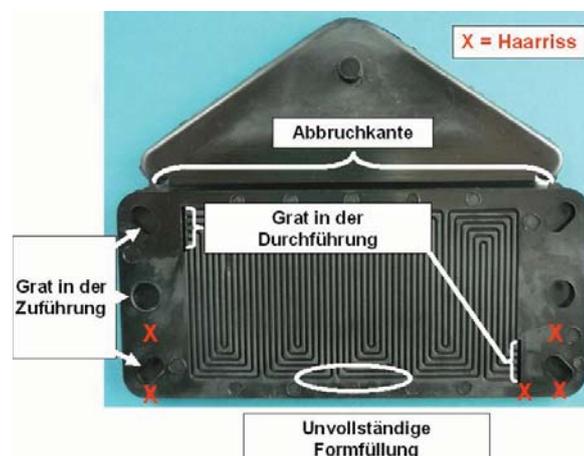


Abbildung 11: Regions of Interest, FlowField-Seite

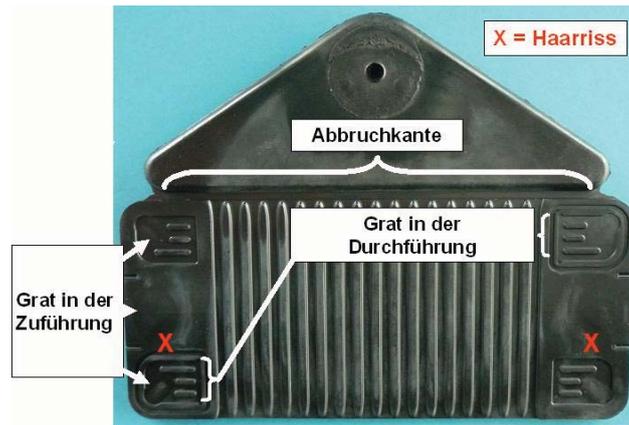


Abbildung 12: Regions of Interest, Kühlungs-Seite

Die Eingrenzung einzelner Fehlerparameter auf bestimmte Regionen der Bipolarplatten ist bei der Bildverarbeitung in sofern von Vorteil, als dass für die Prüfung redundante Bildteile nicht verarbeitet werden müssen und so der Rechenaufwand reduziert wird [IBV11]. Die Untersuchungen hinsichtlich der Plattenfehler konzentrierten sich auf Basis dieser Festlegungen auf die definierten spezifischen Bereiche.

1.3 Definition eines Anforderungskatalogs

Die erarbeiteten Definitionen wurden anschließend in einem Anforderungskatalog dokumentiert, welcher als Grundlage für die Entwicklung des Qualitätssicherungsverfahrens im weiteren Projektverlauf diente und zusätzlich die nachfolgenden wesentlichen Punkte definierte:

- **Kennzeichnung:** Die im Rahmen des Forschungsvorhabens verwendenden Probenplatten wurden zur eindeutigen Identifizierung mit einem sechsstelligen Binärcode versehen.
- **Qualitätssicherungsparameter:** Es wurden Probenplatten für jeden Plattenfehler in einem separaten Katalog dokumentiert und gemäß der zuvor getroffenen Vereinbarung eindeutig gekennzeichnet.
- **Prioritäten:** Den erarbeiteten Qualitätssicherungsparametern wurden gemäß ihrer Signifikanz für den Betrieb einer Brennstoffzelle unterschiedliche Prioritäten zugeordnet.
- **Prüfreihefolge:** Untersuchungen haben gezeigt, dass Haarrisse an unbearbeiteten Bipolarplatten detektierbar sind. Die für einen effizienten Brennstoffzellenprozess jedoch zwingend erforderliche mechanische Nachbearbeitung führt allerdings zu einer negativen Beeinflussung dieser Möglichkeit, da ggf. vorhandene Haarrisse durch die Veränderung der Plattenoberfläche optisch retuschiert werden:

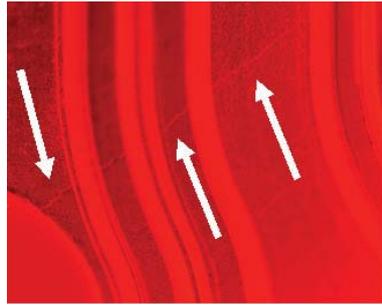


Abbildung 13: Thermographieaufnahme
 Haarriss mechanisch unbearbeitet

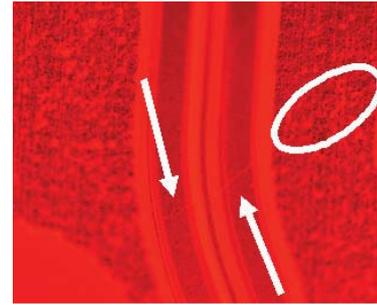


Abbildung 14: Thermographieaufnahme
 Haarriss mechanisch bearbeitet

Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurde die Notwendigkeit von zwei an unterschiedlichen Stellen des Produktionsprozesses durchzuführenden Qualitätskontrollen festgelegt. Die erste Überprüfung erfolgt unmittelbar nach dem Fertigungsverfahren Spritzgießen und der Abtrennung des Angusses, die zweite Kontrolle nach dem Abschluss der mechanischen Bearbeitung. Die einzelnen Qualitätssicherungsparameter wurden den beiden Prüfstufen (PST) folgendermaßen zugeordnet:

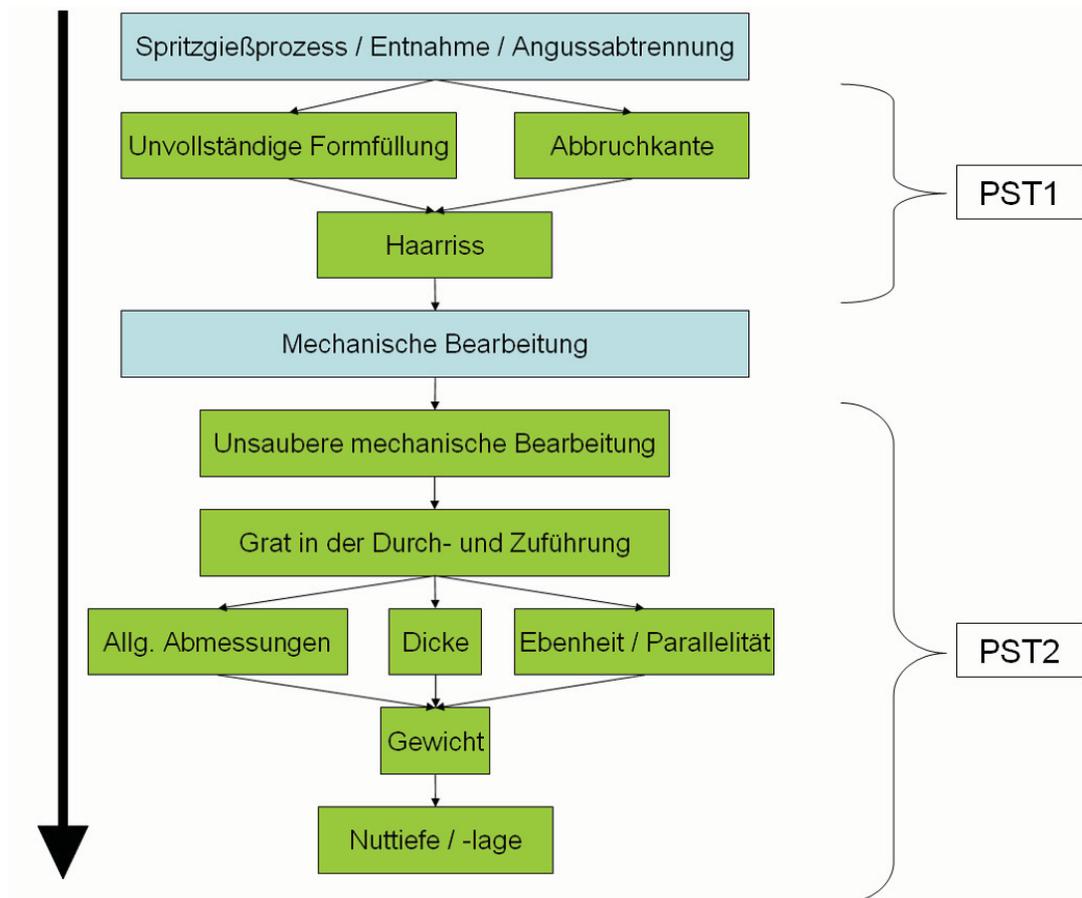


Abbildung 15: Prüfreihefolge

Bei der Festlegung der Reihenfolge wurde berücksichtigt, dass einige Parameter nur vor und andere nur nach der mechanischen Bearbeitung sicher detektierbar sind. Als weiterer Grundsatz wurde berücksichtigt, dass eine fehlerhafte Bipolarplatte so früh wie möglich im Prozess detektiert und vor der weiteren Bearbeitung ausgeschleust

wird, da die Fehlerkosten mit jeder Phase des Wertschöpfungsprozesses progressiv ansteigen [Pfe95].

Der Anforderungskatalog wurde als iteratives Dokument betrachtet, d.h. im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens wurden noch folgende Änderungen und Ergänzungen, basierend auf weiterführenden Untersuchungen, durchgeführt:

1.) Kennzeichnung: Durch den ursprünglich festgelegten sechsstelligen Binärcode wäre eine Markierung von insgesamt $2^6 = 64$ Probenplatten möglich gewesen. Aufgrund der Komplexität der unterschiedlichen Qualitätssicherungsparameter und der damit verbundenen hohen Anzahl an Testplatten sowie zur Möglichkeit einer Rückverfolgbarkeit der im späteren Projektverlauf anzusetzenden Versuchsproduktionen wurde eine Klartextkennzeichnung zur Markierung festgelegt.

2.) QS-Parameter Keilform: In der ursprünglichen Planung der Reihenfolge (siehe Abbildung 15) ist die Überprüfung der Plattendicke prozessbedingt nach der mechanischen Bearbeitung angesetzt worden, da diese noch eine Veränderung des Parameters bewirkt. Dabei wird jedoch hauptsächlich die Nachbearbeitung kontrolliert, nicht der Spritzgießprozess an sich. Da eine ursprünglich ungleichmäßige Dickenverteilung aufgrund des Fräsprozesses zu einer ungleichen Nuttiefe bei den nachbearbeiteten Bipolarplatten führt, wurde der QS-Parameter *Keilform* als zusätzlicher, den Spritzgießprozess kontrollierenden Faktor, definiert:

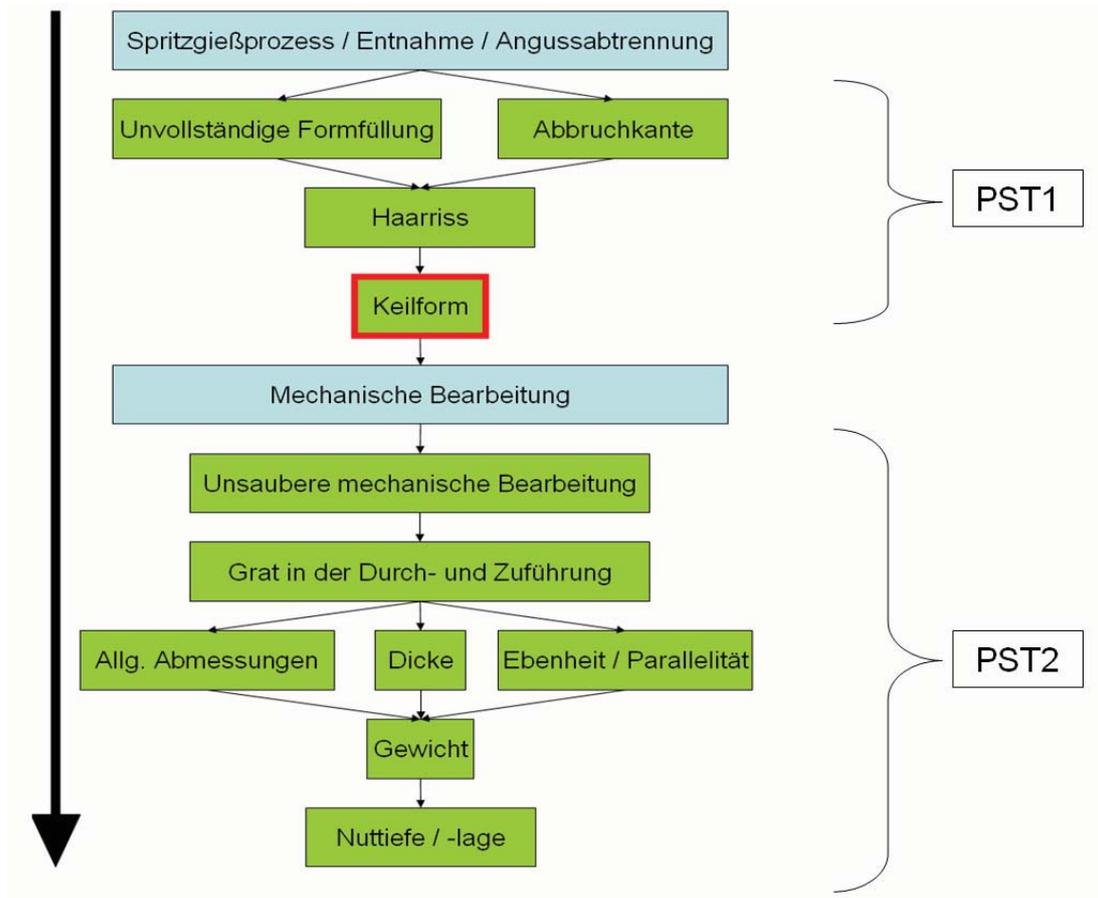


Abbildung 16: Prüfreihenfolge Revision 1

Darstellung der Verwendung der Zuwendungen im Arbeitspaket 1

Zur erfolgreichen Durchführung der Arbeiten des AP 1 wurden bei der FSt1 anteilig drei wissenschaftliche und zwei technische Mitarbeiter eingesetzt, um einerseits die Herstellung und Analyse des Compoundmaterials als Vorbereitung für den weiteren Projektverlauf durchzuführen sowie andererseits bei der Definition der Qualitätssicherungsparameter und des Anforderungskataloges die vorhandenen Kompetenzen interdisziplinär sowie synergetisch zu kombinieren. Unterstützend wurden ebenfalls studentische Hilfskräfte eingesetzt.

Das AP1 beinhaltet keine Arbeiten der FSt2.

5.2 Arbeitspaket 2

Entwicklung eines QS-Verfahrens für spritzgegossene Bipolarplatten

2.1 Entwicklung und Optimierung von Bildverarbeitungsverfahren

2.1.1 Entwurf und Realisierung eines Versuchsaufbaus

Nach ersten Versuchen zur Darstellbarkeit der einzelnen, durch den Anforderungskatalog des ZBT definierten Fehlerklassen wurde ein Versuchsaufbau realisiert, der zum einen eine reproduzierbare Bilderfassung ermöglicht, zum anderen aber auch die Variation der Beleuchtungsgeometrie erlaubt. Es wurde eine Möglichkeit zur Abdunkelung der Prüfstation vorgesehen um unter Nutzung von sequentiell geschalteter Dunkelfeldbeleuchtung die anspruchsvolle Fehlerklasse der Haarrisse bestmöglich sichtbar zu machen. Zudem sorgt eine definierte Positionierbarkeit der Bipolarplatten für einen effektiven Soll/Ist - Vergleich von bekannten Strukturen.

So konnte mithilfe des Versuchsaufbaus sukzessive für jede Fehlerklasse die optimale Beleuchtungsgeometrie gefunden und bereits Ideen für die Integration mehrerer Prüfaufgaben in einer Station gesammelt werden.

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen exemplarisch den Versuchsaufbau zur Prüfung der Gratfreiheit der Zu- und Durchführungen mit Auflicht und die Konfiguration zur Prüfung der Ebenheit der Bipolarplatte unter Nutzung des Lasertriangulationsverfahrens.

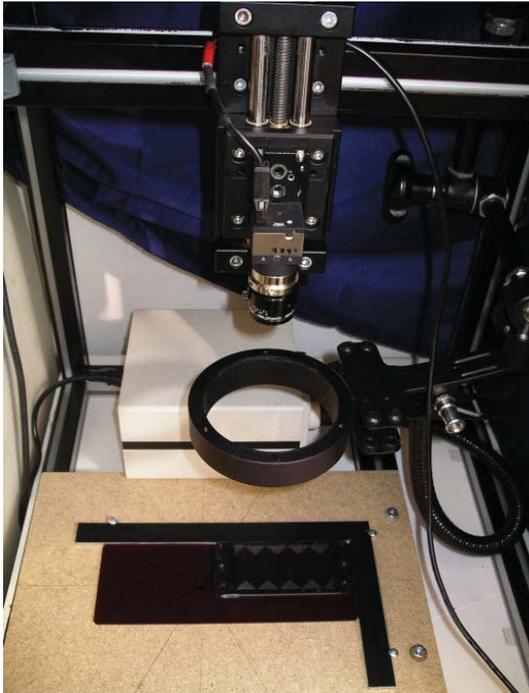


Abbildung 17: Prüfung auf Gratfreiheit

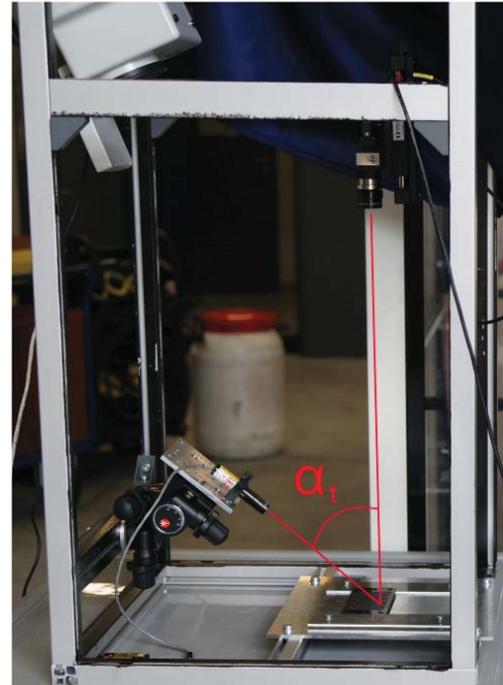


Abbildung 18: Prüfung der Ebenheit

Tabelle 2 liefert einen Überblick über die zu prüfenden Fehlerklassen und das zur Prüfung eingesetzte Beleuchtungsverfahren. Da mehrere Fehlerklassen die gleiche Beleuchtungskonfiguration zur Sichtbarmachung der Fehler benötigen, können diese simultan geprüft werden.

Darüber hinaus wurden Versuche zur Bestimmung der notwendigen örtlichen Auflösung durchgeführt. Zur sicheren Darstellung der Haarrisse innerhalb der Bipolarplatten wurde ein Wert von 60 Pixel/mm (bzw. 17 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$) ermittelt. Die weiteren Fehlerarten können mit geringerer örtlicher Auflösung bewertet werden: Die Erfassung von Fehlern in der FlowField-Struktur ist mit etwa 50 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ möglich, die weiteren Fehlerarten (mangelhafte mechanische Nachbearbeitung / Abbruchkante des Angusses, etc.) können mit einer Ortsauflösung $\leq 100 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ ausreichend genau dargestellt werden.

Tabelle 2: Fehlerklassen und eingesetzte Beleuchtungsverfahren

Fehlerklassen	Art der Beleuchtung
Haarriss	Sequentiell geschaltetes Dunkelfeld
unvollständige Formfüllung	Sequentiell geschaltetes Dunkelfeld
Abbruchkante	Diffuses Auflicht
Unsaubere mechanische Bearbeitung	Diffuses Auflicht
Grat in Durch- und Zuführung	Diffuses Auflicht
Allgemeine Abmessungen	Diffuses Auflicht
Keilform	Lasertriangulation
Dicke	Lasertriangulation
Ebenheit / Parallelität	Lasertriangulation
Nuttiefe / -lage	Lasertriangulation

2.1.2 Entwicklung von Prüfverfahren gemäß Anforderungskatalog

Das mithilfe des Versuchsaufbaus gewonnene Bildmaterial stellte die Grundlage für die Algorithmenentwicklung für die einzelnen Prüfaufgaben dar. Dabei wurde zunächst der Fokus auf die relevantesten Fehlerklassen Haarrisse, unvollständige Formfüllung und Ebenheit gelegt.

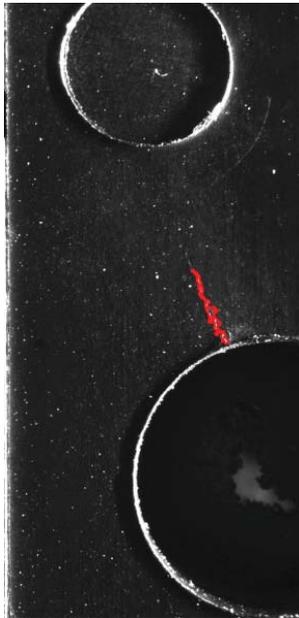


Abbildung 19:
Detektierter Haarriss

Zur Detektion der Haarrisse kann der Umstand genutzt werden, dass Haarrisse aufgrund der Plattengeometrie nur an bestimmten Stellen auftreten und sich somit der zu prüfende Bereich erheblich reduziert. Durch Anwendung einer Folge von morphologischen, arithmetischen und Schwellwertoperationen können die Haarrisse im Bild extrahiert und anhand der Merkmale Fläche und Kompaktheit zuverlässig klassifiziert werden. Abbildung 19 zeigt einen detektierten und im Originalbild markierten Haarriss. Mit diesem Verfahren konnten alle in dem von der Forschungsstelle 1 zur Verfügung gestellten Probenmaterial existierenden Haarrisse erfolgreich detektiert werden. Allerdings wurden darüber hinaus häufig Kratzer auf der Plattenoberfläche fälschlicherweise als Haarrisse klassifiziert. Bei einer Qualitätsprüfung im Prozess sind diese Kratzer auf den Prüfkörpern jedoch nicht zu erwarten.

Die Prüfung der vollständigen Ausfüllung des FlowFields nutzt ebenfalls Kenntnis über die Bipolarplatte aus. Das Verfahren nutzt zur Darstellung der Ausbrüche eine überblendete Hellfeldbeleuchtung. Kleine Ausbrüche an den Kanalfanken lassen sich so bildlich sehr gut darstellen. Die bekannten Strukturen können mit einer Maske ausgeblendet und Fehlstellen so erfolgreich extrahiert werden. Tabelle 3 zeigt die einzelnen Schritte des Verfahrens am Beispiel kleiner Ausbrüche im FlowField.

Tabelle 3: Auswertung des FlowFields unter Hellfeldbeleuchtung



Ausschnitt des FlowFields unter Hellfeldbeleuchtung



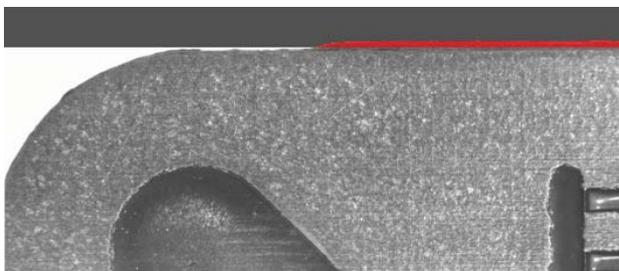
Verknüpfung mit einer bekannten Maske
(rote Bereiche werden extrahiert)

Ergebnis der Auswertung



Die Fehlerklassen: Abbruchkante, unsaubere mechanische Bearbeitung, Grat in Durch- und Zuführung und allgemeine Abmessungen sind unter Nutzung von diffusem Auflicht optimal darstellbar und simultan auswertbar. Die Überprüfung auf eine saubere Abbruchkante sowie die Detektion von unsauberer mechanischer Bearbeitung und verbliebenem Grat sind, wenn eine definierte Positionierung der BPP gegeben ist, mit einfachen Schwellwertoperationen zu erreichen. Zur Vermessung der Zu- und Durchführungen wird zunächst eine Zusammenhangsanalyse in den relevanten Bildbereichen durchgeführt und anhand der Schwerpunkte und der umgebenden Rechtecke (so genannten Bounding-Boxes) der Regionen können die relevanten Parameter, wie Radien und Positionen der Strukturen zueinander, berechnet werden. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Auswertungen dieser Fehler.

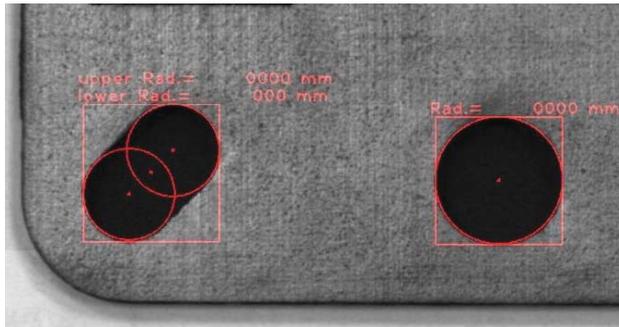
Tabelle 4: Fehlerdetektion unter diffusem Auflicht



Überprüfung auf saubere Anguss-
abtrennung



Detektion von unsauberer mechani-
scher Verarbeitung



Vermessung der Platte und Prüfung
auf verbliebenen Grat

Zur Vermeidung von Verdeckungseffekten (so genannten Hinterschneidungen) werden in der Regel telezentrische Objektive eingesetzt. Diese haben jedoch den Nachteil eines sehr begrenzten Sichtfeldes. Daher wird zur Fehlerdetektion ein Objektiv mit großer Brennweite (50 mm) und damit kleinem Öffnungswinkel eingesetzt. Dadurch ist es möglich, auch an den Bildrändern einen Grat in den Zu- und Durchführungen und unsaubere Abbruchkanten mit einer Genauigkeit von 150 μm zu detektieren.

2.1.3 Entwicklung von Verfahren und Algorithmen zur SOLL/IST-Kontrolle struktureller Komponenten

Die strukturellen Komponenten (Maßhaltigkeit der BPP und FlowField) werden zur Überprüfung mit Solldaten verglichen. Die benötigten Sollmaße und Toleranzen für die Maßhaltigkeit wurden von der Forschungsstelle 1 in Form des Anforderungskataloges zur Verfügung gestellt und dienen als Basis für die Bewertung der geometrischen Abmessungen der Bipolarplatten. Darüber hinaus wurden drei Grenzparameter für die FlowField-Struktur festgelegt, bei deren Überschreitung die Funktion der Bipolarplatte beeinträchtigt ist und die somit Ausschlusskriterien darstellen:

- I. Die Höhe eines Ausbruches überschreitet 0,5 mm
- II. Die Höhe von drei Ausbrüchen entlang eines Messbereiches von 5 mm überschreiten 0,3 mm
- III. Mehr als 1/3 einer Messfläche von 0,3 mm x 5 mm sind ausgebrochen

Diese Parameter sind in Abbildung 20 schematisch dargestellt. Alle in den AP 2.1.2 und AP 2.1.4 beschriebenen Algorithmen wurden hinsichtlich dieser Sollkriterien adaptiert.

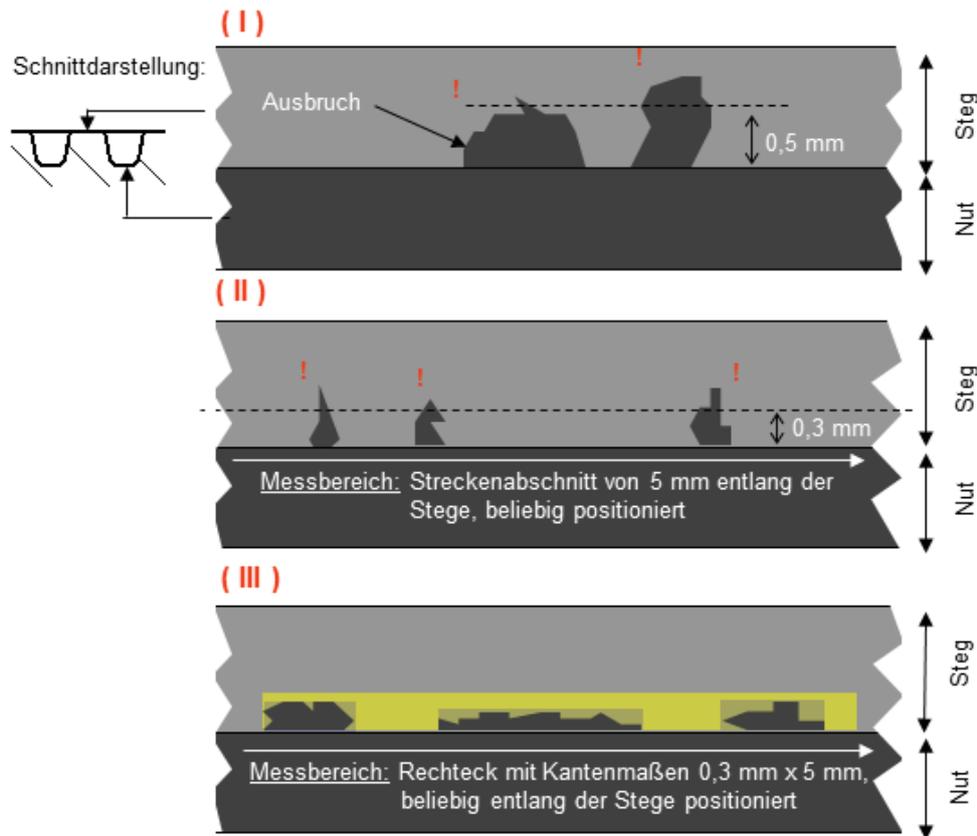


Abbildung 20: Ausschlusskriterien für unvollständige FlowField-Füllung

2.1.4 Detaillierung der Prüfverfahren zur dimensionellen Qualitätskontrolle von Bipolarplatten

Die dimensionelle Qualitätskontrolle erfolgt durch eine Kombination von 2D- und 2.5D-Bildverarbeitung. Tabelle 2 liefert einen Überblick über die zu prüfenden Fehlerklassen und das zur Prüfung eingesetzte Beleuchtungsverfahren. Da mehrere Fehlerklassen die gleiche Beleuchtungskonfiguration zur Sichtbarmachung der Fehler benötigen, können diese simultan geprüft werden.

Darüber hinaus wurden Versuche zur Bestimmung der notwendigen örtlichen Auflösung durchgeführt. Zur sicheren Darstellung der Haarrisse innerhalb der Bipolarplatten wurde ein Wert von 60 Pixel/mm (bzw. 17 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$) ermittelt. Die weiteren Fehlerarten können mit geringerer örtlicher Auflösung bewertet werden: Die Erfassung von Fehlern in der FlowField-Struktur ist mit etwa 50 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ möglich, die weiteren Fehlerarten (mangelhafte mechanische Nachbearbeitung / Abbruchkante des Angusses, etc.) können mit einer Ortsauflösung $\leq 100 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ ausreichend genau dargestellt werden.

Die allgemeinen Abmessungen der Bipolarplatte werden mit diffusem Auflicht im kalibrierten 2D-Kamerabild geprüft. Für die Parameter, die Kenntnis über die Höhe der Strukturen des Prüfobjektes benötigen (Keilform, Dicke, Ebenheit / Parallelität und Nuttiefe / -lage), wird das Verfahren der Lasertriangulation eingesetzt. Da die Pa-

Parameter nur an ausgewählten Stellen ermittelt werden müssen, wurde zusammen mit dem Projektpartner vereinbart, eine Laserlinie an drei verschiedenen Stellen quer zur Bipolarplatte zu projizieren. Die Messwerte zur Dicke werden an 9 Stellen (P1-P9) innerhalb der Bipolarplatte bestimmt, um daraus die Parameter Keilform, Dicke, Ebenheit / Parallelität zu bestimmen. Der Parameter Nuttiefe wird an zwei Stellen (N1/N2) im FlowField gemessen.

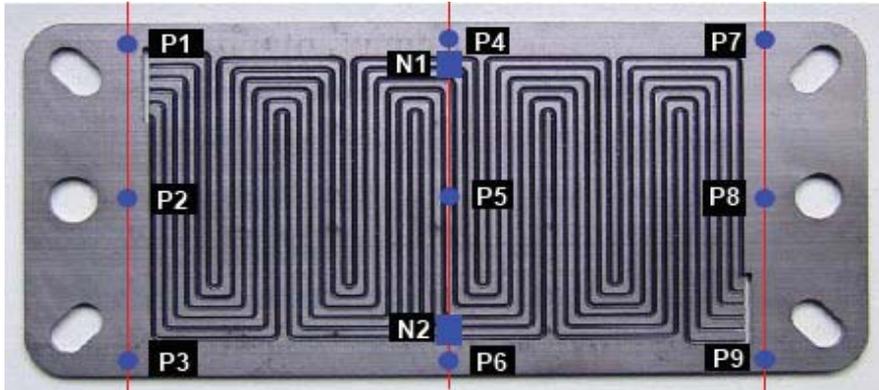


Abbildung 21: Messpunkte Bipolarplatte

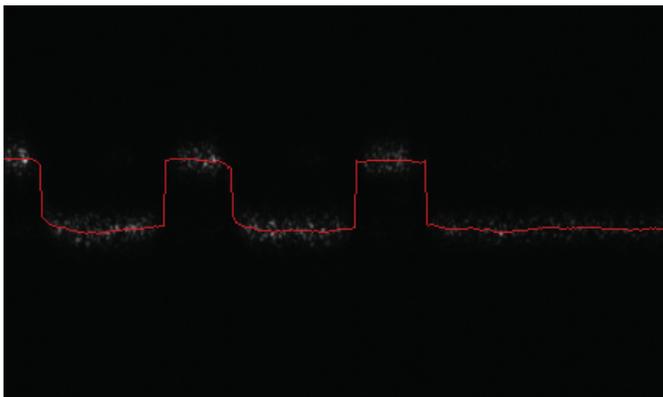


Abbildung 22: Laserliniendetektion zur Bestimmung der Nuttiefe

Bei der Lasertriangulation handelt es sich um eine Entfernungsmessung von Kamera zu Objekt. Differenzen von Entfernungen, wie beispielsweise die Differenz zwischen der Entfernung zur Kanal-Nut und der Entfernung zum Kanal-Steg können zur Bestimmung der Nuttiefe genutzt werden. Nach demselben Prinzip ist auch eine Dickenmessung des Prüfobjektes möglich, sofern es plan auf einer ebenen Referenzfläche, dessen Entfernung gemessen werden kann, aufliegt. Dieser Umstand ist jedoch bei der Prüfung von möglicherweise durchgebogenen Bipolarplatten nicht gegeben. Abhilfe schafft hier nur eine Doppelung des Lasertriangulationssystems, also einer beidseitigen, zeitgleichen Entfernungsmessung von oben und von unten (Vgl. auch AP 2.3).

Da beim Messen die Objektivverzeichnung eine wesentliche Fehlerquelle darstellt, werden die eingesetzten Kameras vor dem Messvorgang kalibriert. Dazu wird nach dem Verfahren von Zhang den Kameras ein bekanntes, ebenes Kalibriermuster in mehreren Orientierungen präsentiert [Zh99]. Das Verfahren liefert diverse, die Objek-

tivverzeichnung beschreibenden Parameter, die zur Entzerrung des Kamerabildes genutzt werden. Der Fehler im Kamerabild reduziert sich damit auf ca. 1 Pixel, was bei einer Auflösung von 60 Pixel/mm einem Fehler von maximal 17 μm entspricht. In einem erweiterten Kalibrierschritt wird die Laserlinienebene bestimmt, die im Verfahren der Lasertriangulation (siehe AP 2.1.4) zur Bestimmung der Plattengeometrie benötigt wird. Zu berücksichtigen sind bei der Genauigkeitsbewertung darüber hinaus zum einen die leichte Unschärfe, die bei hohen Kameraauflösungen auftritt, und zum anderen Probleme bei der Bestimmung der Laserlinienmitte. Zudem kommt es aufgrund des Plattenmaterials bei der Projektion einer Laserlinie zu Speckleerscheinungen. Diese bewirken, dass sich der Intensitätsschwerpunkt quer zur Laserlinie stochastisch verschiebt. Versuche haben ergeben, dass sich diese Interferenzmuster bei der Wahl kleiner Objektivblendenzahlen und einer Reduzierung der Laserleistung auf ein tolerierbares Maß reduzieren lassen.

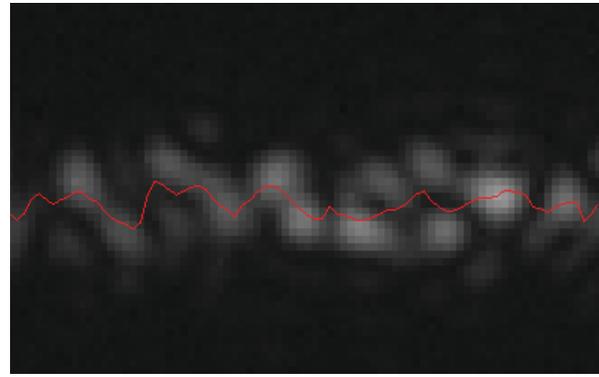
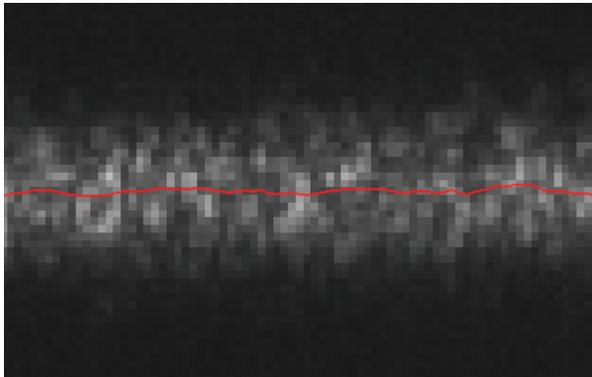


Abbildung 23: Detektierte Laserlinien (Blende 4)

Abbildung 24: Detektierte Laserlinie (Blende 11)

Der Lasertriangulationswinkel wurde auf 45° festgelegt und liefert den besten Kompromiss zwischen Laserlinienbreite und Tiefenauflösung. Bei einer lateralen Auflösung von 60 Pixel/mm (17 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$) ergibt sich eine theoretische Tiefenauflösung von 17 μm . Die Breite der Laserlinie beträgt ca. 20 Pixel (340 μm). Bei einem ebenen Prüfobjekt und bei Anwendung von Subpixelverfahren zur Bestimmung des Laserlinienschwerpunktes schwankt der Schwerpunkt um 3 Pixel, so dass sich eine praktische Genauigkeit von 51 μm ergibt, die den im Anforderungskatalog definierten Parametern gerecht wird.

2.2 Entwurf und Herstellung von Testserien sowie Versuchsserien zur bildanalytischen Qualitätskontrolle

Die im Rahmen dieses Arbeitspaketes durchgeführte Testserien-Produktion diente einer zielführenden Realisierung der im Anforderungskatalog festgelegten, unterschiedlichen Fehlertypen als Grundlage für die Versuchsserien zur bildanalytischen Qualitätskontrolle. Die Produktion wurde dazu in vier unterschiedliche Lose separiert. Von hoher Signifikanz waren dabei eine detaillierte Aufzeichnung der Prozessparameter sowie eine Zuordnung der Parameter zu den produzierten Bipolarplatten. Die dazu notwendige Markierung während des Produktionsprozesses erfolgte aufgrund des für

diesen Schritt zur Verfügung stehenden begrenzten Zeitfensters mit nummerierten Aufklebern, welche in einem Nachbereitungsschritt durch eine Klartextkennzeichnung an den Stirnseiten der Bipolarplatten substituiert wurden.



Abbildung 25: Plattenmarkierung Aufkleber

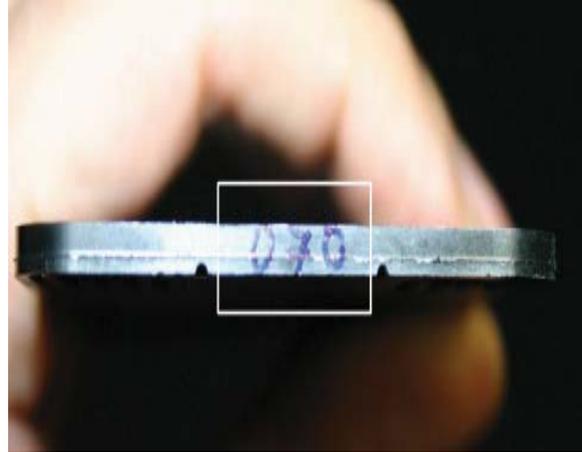


Abbildung 26: Plattenmarkierung Klartext

Einhergehend mit der Testserien-Produktion wurde zur Informationsrückkopplung eine umfangreiche Analyse der unterschiedlichen Lose hinsichtlich ihrer Qualitätssicherungsparameter durchgeführt. Dabei wurde auf am ZBT verfügbare Labormessmethoden (optische Vermessung mit fokussiertem Weißlicht) zurückgegriffen, die aufgrund ihrer hohen Mess- und Auswertedauer nicht für eine prozesstaugliche Qualitätssicherung geeignet sind. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Untersuchungen sind nachfolgend aufgeführt:

Durch eine Erhöhung des Nachdrucks im Spritzgießprozess wiesen die Platten eine „Keilform“ auf, d.h. im Bereich der Angussseite lag eine höhere Materialstärke vor. Diese konnte durch die obligatorische mechanische Nachbearbeitung egalisiert werden, was in den nachfolgenden Diagrammen qualitativ dargestellt ist:

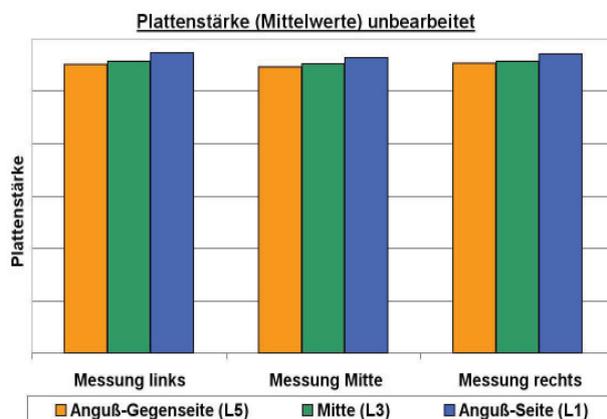


Diagramm 1: Plattenstärke Keilform, unbearbeitet (qualitativ)

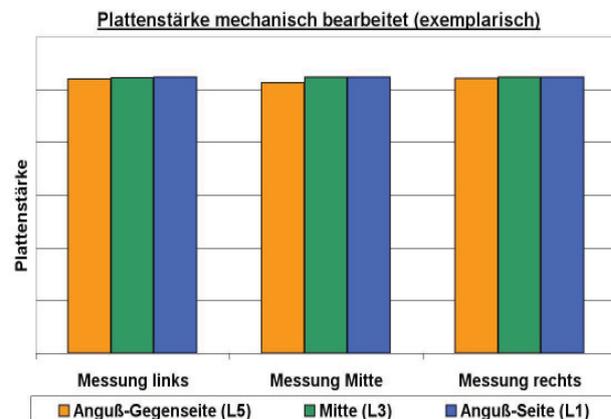


Diagramm 2: Plattenstärke Keilform, bearbeitet (qualitativ)

Die mechanische Nachbearbeitung keilförmiger Bipolarplatten führte gleichzeitig auch zu einer Beeinflussung der Nuttiefen. Deren Gleichmäßigkeit im unbearbeiteten Zu-

stand wurde durch die unterschiedlich intensive Materialabtragung verschlechtert (vgl. qualitative Darstellung in Diagramm 3 und Diagramm 4). Aus diesem Grund wurde, wie bereits beschrieben, der Parameter *Keilform* als weiterer Fehlertyp festgelegt. Dieser ist im ersten Prüfschritt zu kontrollieren.

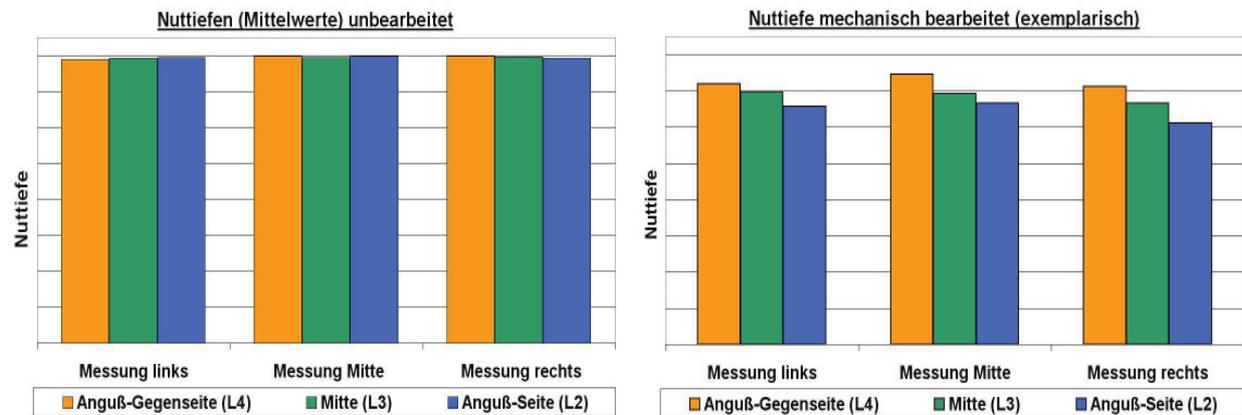


Diagramm 3: Nutttiefe Keilform, unbearbeitet (qualitativ)

Diagramm 4: Nutttiefe Keilform, bearbeitet (qualitativ)

Im Hinblick auf den Fehlertyp *unvollständige Formfüllung* führte ein vorgezogener Nachdruckumschaltzeitpunkt im Spritzgießprozess zu ausgeprägten Fehlerbildern. Auffällig hierbei war, dass diese Ausprägung trotz konstanter Produktionsparameter in ihrer Intensität stark fluktuierte. Dieser Umstand zeigte die Notwendigkeit einer stetigen Kontrolle, insbesondere im Grenzbereich des Spritzgießprozesses. Die nachfolgende Abbildung stellt beispielhaft die unterschiedliche Ausprägung einer unvollständigen Formfüllung bei zwei mit identischen Produktionsparametern produzierten Bipolarplatten dar:

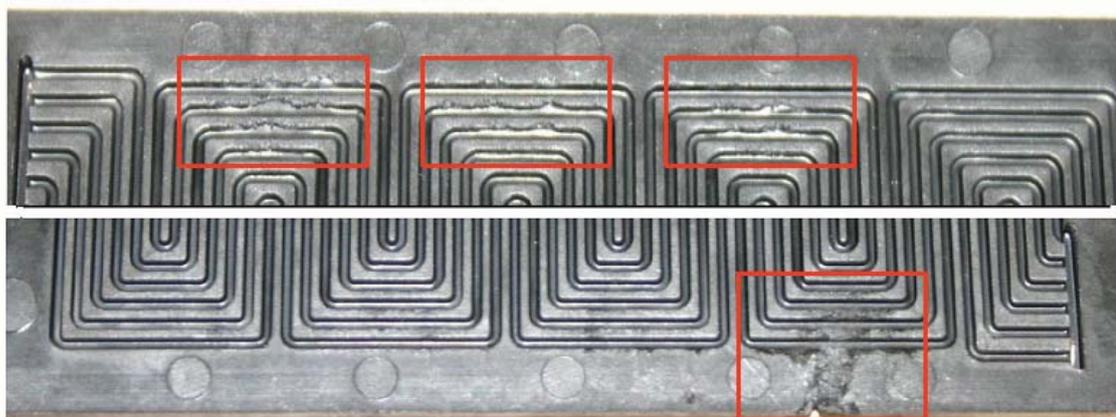


Abbildung 27: unterschiedliche Ausprägung einer fehlerhaften FlowField-Füllung

Diese in den Testserien bewusst fehlerhaft produzierten Bipolarplatten lieferten neue Erkenntnisse über die auftretenden Fehler und dienten als Grundlage für die Überprüfung und Anpassung der Algorithmen und der Beleuchtung.

So musste der zunächst verfolgte Ansatz zur Überprüfung des FlowFields verworfen und unter Anpassung der Beleuchtung neu entwickelt werden. Unter der ursprünglich favorisierten, überblendeten Hellfeldbeleuchtung ist der vollständige Wegbruch eines Kanalsteiges, wie er erst in einer der letzten Testserien auftrat, mit dem zu Beginn entwickelten Verfahren nur unzuverlässig auswertbar. Teile der Bereiche in denen der Kanalsteg weg gebrochen ist, manifestieren sich im Kamerabild weiß und werden so nach der Maskierung nicht als Fehlbereiche angezeigt. Bei der Nutzung von sequentiell geschalteter Dunkelfeldbeleuchtung ist das Fehlen eines Kanalsteiges allerdings gut zu detektieren. Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen einen vollständig weg gebrochenen Kanalsteg unter den verschiedenen Beleuchtungssituationen.

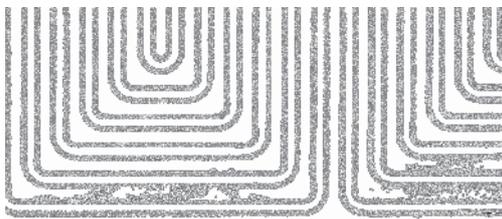


Abbildung 28:

FlowField unter Auflichtbeleuchtung

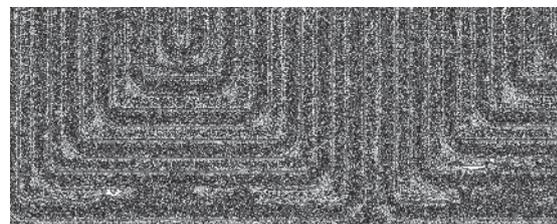


Abbildung 29:

FlowField unter Dunkelfeldbeleuchtung

Die Abbildung 30 zeigt das Prinzip der neu entwickelten Vermessung der Kanalstruktur: Es wird zunächst eine künstlich erzeugte Mittellinie (im Bild gelb dargestellt) durch den Kanal des FlowFields gelegt, der Winkel zu den Nutflanken berechnet und anschließend entlang der Messlinie (rot) die Breite des Kanals geprüft. Dabei wird der Umstand genutzt, dass durch die angepasste Beleuchtung intakte Kanalflanken das Licht stark reflektieren und bei ausgebrochenen Strukturen diese Reflexion ausbleibt. Abbildung 31 zeigt die erfolgreich erkannten Ausbrüche im FlowField. Die Überprüfung berücksichtigt die drei von der Forschungsstelle 1 definierte Ausschlusskriterien, welche eine gewisse Anzahl und Größe von Ausbrüchen pro Fläche tolerieren.

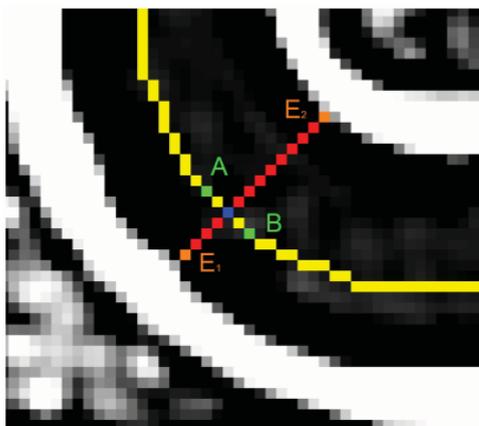


Abbildung 30: Prinzip der FlowField-Vermessung

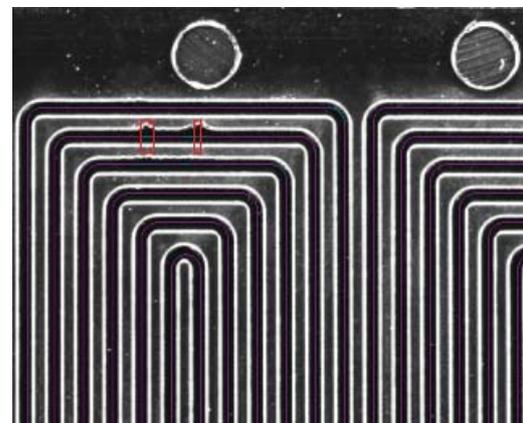


Abbildung 31: Erkannte Ausbrüche

2.3 Untersuchungen zur Integration der entwickelten Verfahren

Für die Untersuchungen zur Integration der entwickelten Verfahren wurde zunächst die zentrale Frage nach dem Zeitpunkt des ersten Prüfschrittes analysiert. Die spritzgegossenen Bipolarplatten werden nach ihrer Entformung von einem Entnahmeroboter aufgenommen und mittels Vakuumsaugern auf der Kühlseite fixiert, wodurch lediglich die FlowField-Seite für eine optische Prüfung zugänglich und eine vollständige Kontrolle in Verbindung mit diesem Prozessschritt daher prinzipiell nicht möglich ist. Nach der Abtrennung des Anguss werden die bis hierhin definiert gegriffenen Bipolarplatten zur Abkühlung ohne weitere Fixierung auf einem Transportband abgelegt. Somit steht keine definierte Position, welche für eine optische Qualitätskontrolle erforderlich ist, mehr zur Verfügung. Daher wurde die Möglichkeit einer direkten Ablage der Bipolarplatten in einer Prüfstation durch den Entnahmeroboter in einer Versuchsreihe untersucht, wodurch der für das thermisch hochleitfähige Material bisher eingesetzte Abkühlprozess signifikant verändert wurde. Im Fokus der Untersuchungen stand daher der thermische Verzug (Durchbiegung) der noch nicht ausgekühlten Bipolarplatten unter den Randbedingungen einer optischen Qualitätskontrolle, bei der aufgrund der notwendigen Zugänglichkeiten von Ober- und Unterseite lediglich eine partielle Auflagefläche zur Verfügung steht. Mit Hilfe der Lasertriangulation und der Thermografie wurde ein Zusammenhang zwischen der Durchbiegung und dem Abkühlverhalten einerseits bei einer partiellen Auflage („Luftauflage“ – siehe Abbildung 32) und andererseits beim herkömmlichen Prozess („Bandauflage“ – siehe Abbildung 33) hergestellt.



Abbildung 32: „Luftauflage“



Abbildung 33: „Bandauflage“

Das Abkühlverhalten der beiden unterschiedlichen Varianten unterschied sich deutlich. In den Abbildungen Abbildung 34 und Abbildung 35 sind exemplarisch die Temperaturverteilungen nach einer Abkühlzeit von 30 s dargestellt (identische Ausgangstemperatur und Farbskala). Während die Bipolarplatte der Bandauflage bereits auf 50,5 °C abgekühlt war, wies die der Luftauflage noch eine Temperatur von 66,2 °C auf. Der Luftspalt, der durch die partielle Auflage entstand, bewirkte eine signifikante thermische Isolationswirkung verglichen mit der direkt wärmeleitenden Bandauflage.

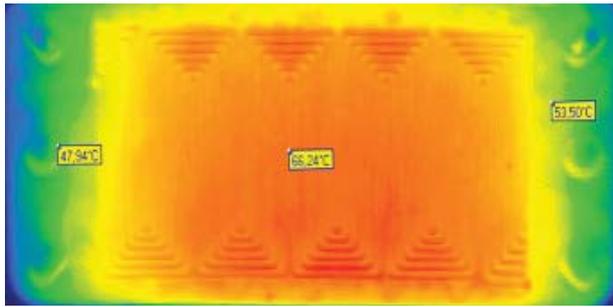


Abbildung 34: Thermografiebild „Luftauflage“

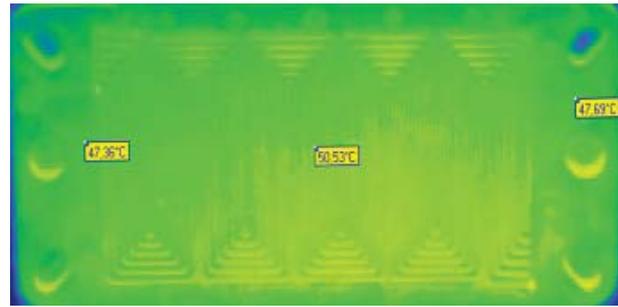


Abbildung 35: Thermografiebild „Bandauflage“

Einhergehend mit dieser thermischen Isolationswirkung wurde auch eine erhebliche Krümmung der lediglich partiell aufliegenden Bipolarplatten während der Abkühlphase gemessen. Auffällig hierbei war, dass diese Krümmung zu Beginn stärker ausgeprägt war und im zeitlichen Verlauf, also durch den Abkühlprozess, reduziert wurde. Dies bedeutet, dass das durch die Auflage mechanisch beanspruchte, bzw. gedehnte Material bei sinkenden Temperaturen eine Kontraktion erfährt. Allerdings weist dieser Effekt eine nicht hinreichende Intensität auf, so dass die abschließend gemessene Krümmung der Bipolarplatten der Luftauflage im Vergleich zu konventionell abgekühlten Platten, nicht akzeptabel ist.

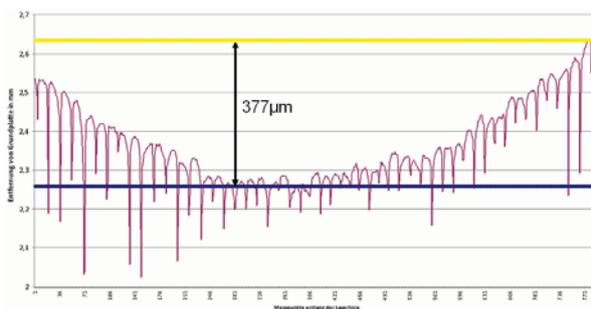


Abbildung 36: Durchbiegung „Luftauflage“

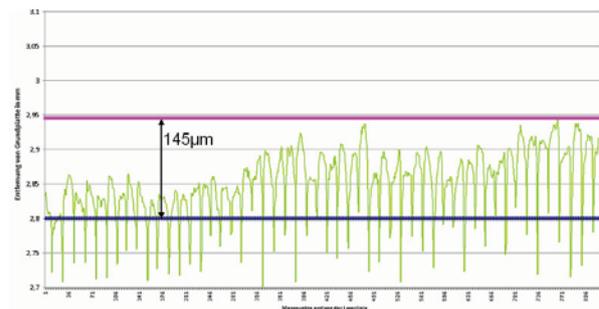


Abbildung 37: Durchbiegung „Bandauflage“

Als (Teil-)Ergebnis wurde somit festgelegt, dass der bisherige Abkühlprozess der Bipolarplatten beizubehalten und die Qualitätskontrolle am Ende des Transport- und Abkühlbandes in den Prozess zu integrieren ist.

Für diese Integration wurden seitens der GFaI nachfolgende Anforderungen an die Zuführung der Bipolarplatten in die Prüfstation gestellt:

- Die Zuführung erfolgt in einem flachen Schlitten.
- Die Bipolarplatte wird nicht vollständig in der Aufnahme versenkt.
- Die Sicht auf die Bipolarplatte wird von oben nicht eingeschränkt.
- Auf der Unterseite des Schlittens sind Projektions- und Aufnahmemöglichkeiten für Laser-Triangulationslinien vorgesehen.
- Mit dem Schlitten werden drei definierte Prüfpositionen je Plattenseite angefahren, wobei eine Wiederholgenauigkeit von 0,1 mm ausreichend ist.
- Ein Wenden der Bipolarplatte ist erforderlich. In der Prüfstation steht durch die Belichtungs- und Aufnahmeaufbauten jedoch nur sehr begrenzter Platz zur Verfügung.

Um einerseits den o.g. Anforderungen und andererseits den Umgebungsbedingungen des Produktionsprozesses gerecht zu werden, wurde die Station zur Handhabung folgendermaßen ausgelegt:

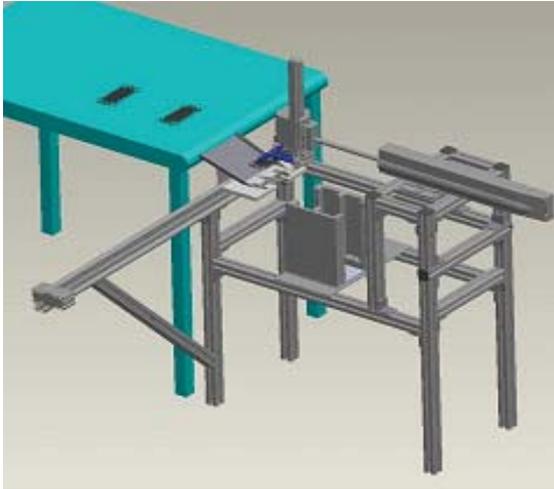


Abbildung 38: Konzept Prüfstationszuführung

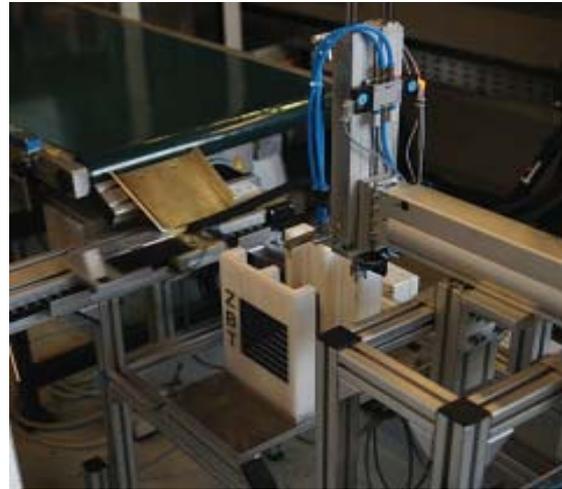


Abbildung 39: Realisierte Prüfstationszuführung

Die Grundauführung wurde dabei mit Hilfe von Standard-Industrieprofilen realisiert, um eine für die erstmalige Prozessintegration größtmögliche Flexibilität zu gewährleisten. Für die Ablage geprüfter Bipolarplatten wurde ein entsprechendes Magazin vorgesehen, in dem 2 x 75 Prüflinge abgelegt werden können. Bei Prüfergebnissen, die nicht den Anforderungen für ein Gutteil entsprechen, erfolgt eine Aussortierung in einen Ausschussbehälter. Die Handhabung der Bipolarplatten wird, mit Ausnahme der eigentlichen Prüfstationszuführung, mit pneumatischen Aktoren umgesetzt. Hier stellt sich insbesondere in vertikaler Achsrichtung die Problematik eines stapelhöhenabhängigen Positionierens. Durch eine Kombination aus einem Laserlichttaster, welcher die „Grenze“ des bereits abgelegten Zellstapels erkennt, mit gesteuerten Drosselrückschlagventilen, welche die Bewegung des pneumatischen Zylinders unmittelbar nach dem Markensignaleingang anhalten, wurde eine funktionsfähige Lösung umgesetzt. Das Prinzip dieser pneumatischen Lösung zeigt das nachfolgend dargestellte Schalt-schema:

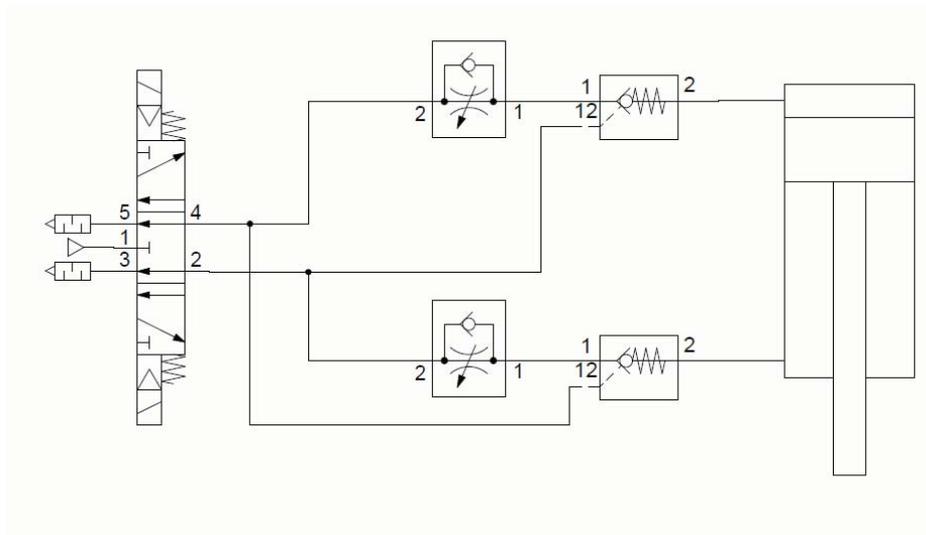


Abbildung 40: Schaltschema vertikale Achse

Zur prüfkonformen Positionierung wurde eine Linearachse mit Zahnriemenantrieb ausgelegt und mit integrierter Steuerung in die Station implementiert. Die Gesamtsteuerung des Handhabungsprozesses wurde durch eine Speicher-Programmierbaren-Steuerung (SPS) mit Hilfe eines zu erstellenden und hinsichtlich der Anforderungen des Prüfprozesses ausgelegten Programms realisiert.

Mit dieser erarbeiteten Lösung konnten die Bipolarplatten über einen Schlitten, der an der Unterseite Ausparungen zur Projektion von Laserlinien besitzt, der optischen Prüfung zugeführt werden und das Problem eines, aufgrund der erforderlichen Kombination von diffuser Hellfeld- und Dunkelfeldbeleuchtung begrenzten Raumangebotes innerhalb der Prüfstation gelöst werden.

Bei einer benötigten geometrischen Auflösung von $17 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ liefert eine einzelne 10 Megapixelkamera ein Sichtfeld von $65,4 \text{ mm} * 46,7 \text{ mm}$. Der Transport mittels eines Schlittens hat daher weiterhin den Vorteil, dass zwei hochauflösende Kameras (jeweils eine für Ober- und Unterseite) für die Prüfung der gesamten Bipolarplatte ausreichen. Dazu müssen pro Plattenseite drei Prüfpositionen angefahren werden, um aus den Einzelbildern ein hochauflösendes Bild der Platte zusammensetzen. Das Auflicht wird über einen halbdurchlässigen Spiegel direkt in den Strahlengang der oberen Kamera eingekoppelt, was eine schattenfreie, diffuse Auflichtbeleuchtung realisiert. Die vier Linienlichter beleuchten das Prüfobjekt unter einem sehr flachen Winkel und erzielen so eine optimale Dunkelfeldbeleuchtung. Die beiden Laser sind in einem 45° Winkel zur jeweils unteren/oberen Kamera angebracht. Das untere System bestehend aus Kamera und Laser dient ausschließlich der Lasertriangulation. Da Hinterschneidungen dabei keine bedeutende Rolle spielen, kann ein Objektiv mit geringerer Brennweite eingesetzt werden. Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen den Messaufbau schematisch in der Seitenansicht und in der Aufsicht.

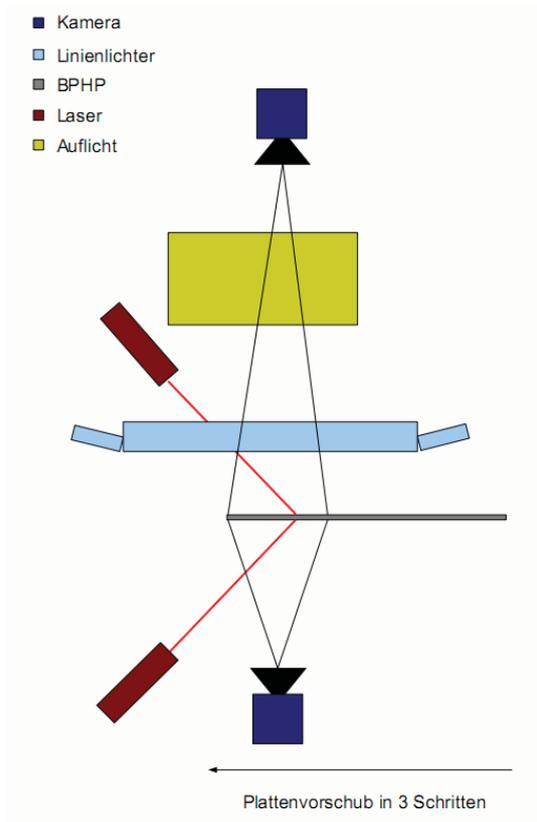


Abbildung 41: Messaufbau Seitenansicht

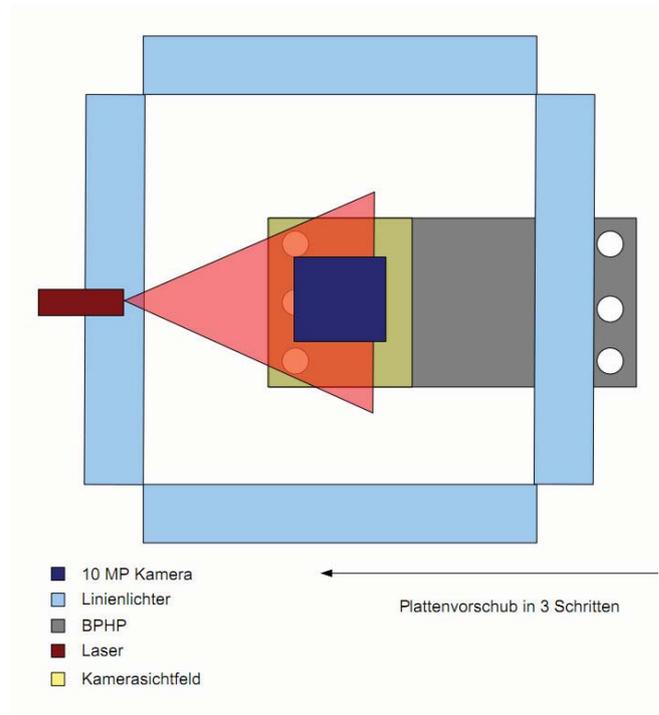


Abbildung 42: Messaufbau Aufsicht

In der finalen Projektphase wurden die gewonnenen Erkenntnisse in einem an den Spritzgießprozess gekoppelten Demonstrator umgesetzt. Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen eine Bipolarplatte im verfahrbaren Schlitten während der Prüfung sowie die gesamte Prüfstation (In Abb. 44: Prüfstationszuführung rechts, Bildverarbeitungsstation links):

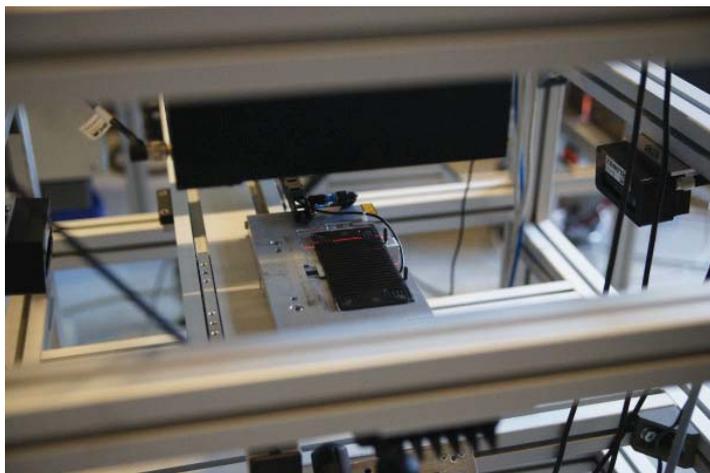


Abbildung 43: Bipolarplatte während der Prüfung



Abbildung 44: Prüfstation

Der Prüfablauf einer einzelnen Bipolarplatte ist wie folgt: Die zu prüfende BPP rutscht vom Förderband in den Schlitten, in dem sie fixiert und an drei definierte Prüfpositionen gefahren wird. An jeder Prüfposition zeichnet die obere Kamera pro geschalteter

Beleuchtung (Hellfeld-, Dunkelfeld- und Laserlinienbeleuchtung) ein Bild auf und die untere Kamera jeweils ein Bild mit projizierter Laserlinie. Mithilfe der beidseitig aufgenommenen Laserlinienbilder werden die geometrischen Parameter berechnet. Anhand der Bilder unter Dunkelfeldbeleuchtung werden Haarrisse und unvollständige Formfüllungen detektiert. Die restlichen Fehlerparameter können durch Auswertung der unter Hellfeldbeleuchtung aufgenommenen Bilder bestimmt werden. Wird ein Fehler detektiert bekommt das System der Prüfstationszuführung ein Signal zum Aussortieren der geprüften BPP, andernfalls wird die Platte gedreht und die Rückseite nach demselben Ablauf geprüft. Wird die Platte auch nach der Prüfung der Rückseite für gut befunden, wird sie magaziniert, andernfalls aussortiert.

Durch die direkte Anbindung an den Produktionsprozess traten im Gegensatz zum Probenmaterial keine Kratzer in den Platten auf (vgl. AP 2.1.2) und so konnten Fehlklassifikationen bei der Haarrissdetektion vermieden werden.

Darstellung der Verwendung der Zuwendungen im Arbeitspaket 2

Für die umfangreichen Arbeiten im Arbeitspaket 2 wurden von der FSt1 jeweils anteilig zwei wissenschaftliche und zwei technische Mitarbeiter eingesetzt. Letztgenannte setzten die Fertigung und Montage der Demonstratorstation um und unterstützten die wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Testserienproduktion. Die beiden wissenschaftlichen Mitarbeiter teilten sich die Planung und Analyse der Testserienproduktion, die Betreuung der Vorversuche zur Prozessintegration und die konstruktive Auslegung bzw. die praktische Umsetzung des Demonstrators gemäß ihrer Kompetenzen auf. Unterstützend wurden ebenfalls studentische Hilfskräfte eingesetzt.

Für die Teilaufgaben der Forschungsstelle 2 wurden im Arbeitspaket 2 mehrere Mitarbeiter mit spezifischen wissenschaftlichen Qualifikationen eingesetzt, um die Aspekte der Algorithmenentwicklung, der Planung und Realisierung der Prüfstation und der Systemintegration zu erarbeiten. In diesem AP wurde gleichzeitig ein Projektleiterwechsel in der FSt 2 durchgeführt und somit ein weiterer Mitarbeiter mit in das Projekt eingebunden. Der Wechsel konnte aufgrund der Vorergebnisse und der guten Kommunikation zwischen den Kollegen ohne weitere Verzögerungen in der Projektbearbeitung durchgeführt werden. Mehr noch konnte durch den neuen Projektleiter mit vertieften Erfahrungen auf den Gebieten der Bildverarbeitung und Mustererkennung die Arbeit in diesem AP auch in Hinblick auf die zu entwickelnden Prüfverfahren vorangetrieben werden.

In der Antragsphase wurde geplant, die Bildanalysestation von einem spezialisierten Gerätebauunternehmen zu beziehen. Dieses Unternehmen konnte aber während der Bearbeitung des Projektes den entsprechenden Auftrag rechtlich bedingt nicht annehmen, da der Geschäftsbetrieb zwischenzeitlich eingestellt wurde. Basierend auf Informationen über Zukaufteile, die der FSt 2 durch das Unternehmen zur Verfügung gestellt wurden, konnte in der Projektbearbeitungsphase mit geringfügig höherem Personaleinsatz die Bildanalysestation in Eigenregie erstellt werden. Der entspre-

chende Kompetenzzuwachs wirkte sich positiv und nachhaltig auf die weitere Projektbearbeitung aus. Ein zusätzlicher positiver Nebeneffekt wurde in den nachfolgenden Arbeitspaketen deutlich: notwendige Anpassungen und Modifikationen am optisch-bildgebenden Aufbau konnten schnell und unkompliziert in Eigenleistung eingearbeitet werden.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass durch die Erarbeitung der BV-Station in weitest gehender Eigenleistung insgesamt Kosten gemindert, Kompetenzen bei der FSt 2 erhöht und die Erarbeitung des Demonstrators schnell und effektiv erbracht werden konnten.

Leistungen Dritter sind im Arbeitspaket 2 nicht angefallen.

5.3 Arbeitspaket 3

Voruntersuchung des Spritzgießverfahrens

In diesem Arbeitsschwerpunkt wurde der Spritzgießprozess einer weiterführenden Analyse unterzogen, bei dem auch Grenzbereiche des Verfahrens betrachtet wurden. Zur systematischen Durchführung der unterschiedlichen Versuchsreihen wurde zu Beginn eine statistische Versuchsplanung durchgeführt und der Einspritzvolumenstrom, die Kühlzeit sowie die Geschwindigkeit der Auswerferstifte als Einflussgrößen definiert. Die beiden erstgenannten Parameter wurden dabei in fünf, die Geschwindigkeit der Auswerferstifte in zwei Faktorstufen unterteilt. Als Zielgröße fungierte die Fehlerfreiheit der Bipolarplatten, spezifiziert durch die QS-Parameter Haarriss, FlowField-Füllung und Maßhaltigkeit (Dicke, Durchbiegung). Stochastisch wurden 25 Faktorstufenkombinationen festgelegt, bei denen jeweils 10 exemplarische Bipolarplatten dem Prozess entnommen wurden. Wie auch schon bei der Testserienproduktion wurde eine lückenlose Rückverfolgbarkeit im Hinblick auf die Spritzgießparameter umgesetzt.

Zur Auswertung der Versuchsreihen wurde, unterstützt vom Programm *JMP8* der Firma *SAS*, mit der Methode der kleinsten Quadrate ein mathematisches Modell für den quantitativen Zusammenhang zwischen den Einfluss- und Zielgrößen formuliert. Bei dieser Art der Regressionsanalyse wird auf der Basis der realen Messpunkte eine Modellfunktion erstellt, bei der die Summe der quadrierten Abweichungen (Residuen) zwischen den Messpunkten und der Modellfunktion möglichst gering ist [Kle09]. Das Prinzip dieser Methodik ist in Diagramm 5 schematisch dargestellt, signifikante Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt.

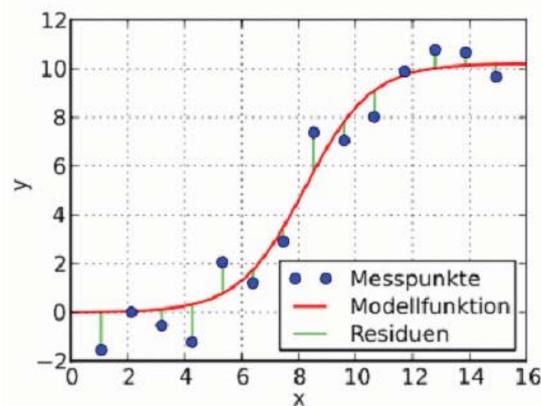


Diagramm 5: Methode der kleinsten Quadrate [Quelle: Wikipedia]

Plattendicke

Für den Einsatz der Bipolarplatten in Brennstoffzellen ist eine gleichmäßige Dicke ein wichtiges Kriterium. Von technisch hinreichenden Bedingungen ausgehend (Bereitstellung von ausreichend Material in der Kavität, etc.), zeigte der Einspritzvolumenstrom als Einflussgröße eine deutliche Wirkung auf die Plattendicke:

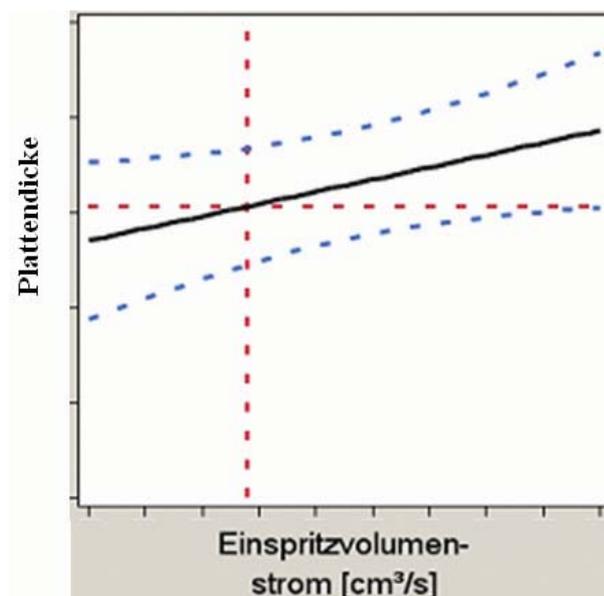


Diagramm 6: Qualitativer Zusammenhang: Plattendicke und Einspritzvolumenstrom

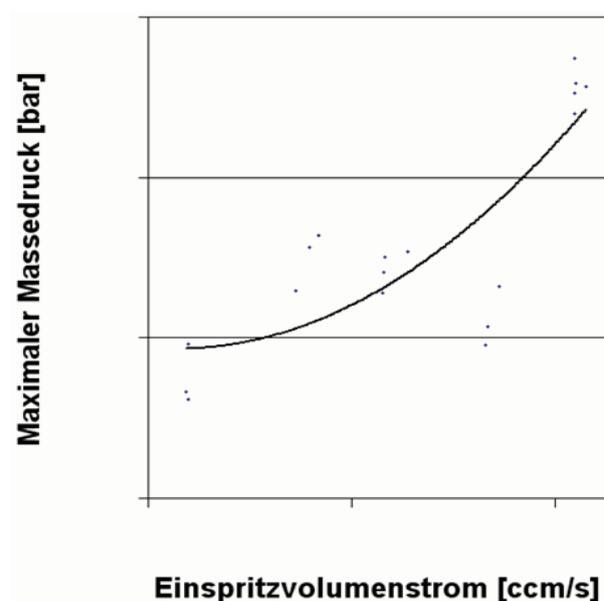


Diagramm 7: Qualitativer Zusammenhang: Druck und Einspritzvolumenstrom

Mit zunehmendem Einspritzvolumenstrom wurde ein nahezu linearer Anstieg der Plattendicke beobachtet. Aufgrund des direkten Zusammenhangs zwischen Einspritzvolumenstrom und Druck (vgl. Diagramm 7) ist dies ein plausibles Ergebnis, da die Schwindung, welche beim Abkühlprozess im Werkzeug entsteht, eine Abweichung zwischen dem Kavitätsmaß und den realen Abmessungen der Bipolarplatten bewirkt und durch einen hinreichenden hohen Druck ausgeglichen wird.

Füllung des FlowFields

Durch Füllungsprobleme in der FlowField-Struktur kommt es im Betrieb einer Brennstoffzelle zu partiellen Druckschwankungen und einer Unterversorgung einzelner Kanäle. Hierbei sind grundsätzlich zwei mögliche Fehlertypen zu unterscheiden: Einerseits wurden bei den Versuchsreihen Ausbrüche der FlowField-Stege auf der Angussseite (siehe Abbildung 45) und andererseits Formfüllungsfehler in den Stegwänden der Angussgegenseite (siehe Abbildung 46) beobachtet:

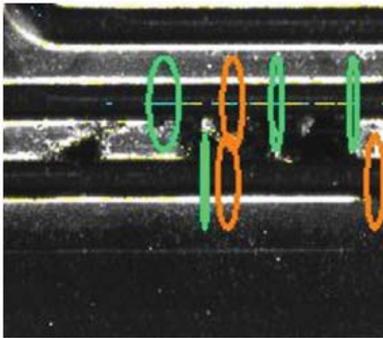


Abbildung 45: Ausbrüche Angussseite

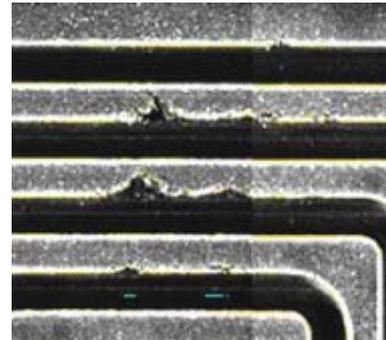


Abbildung 46: Füllungsfehler Angussgegenseite

Die Güte der FlowField-Füllung wurde im Rahmen der Versuchsauswertung mit einem Schulnotensystem bewertet. Das entsprechende mathematische Modell für die Korrelation mit den Einflussgrößen ist nachfolgend dargestellt:

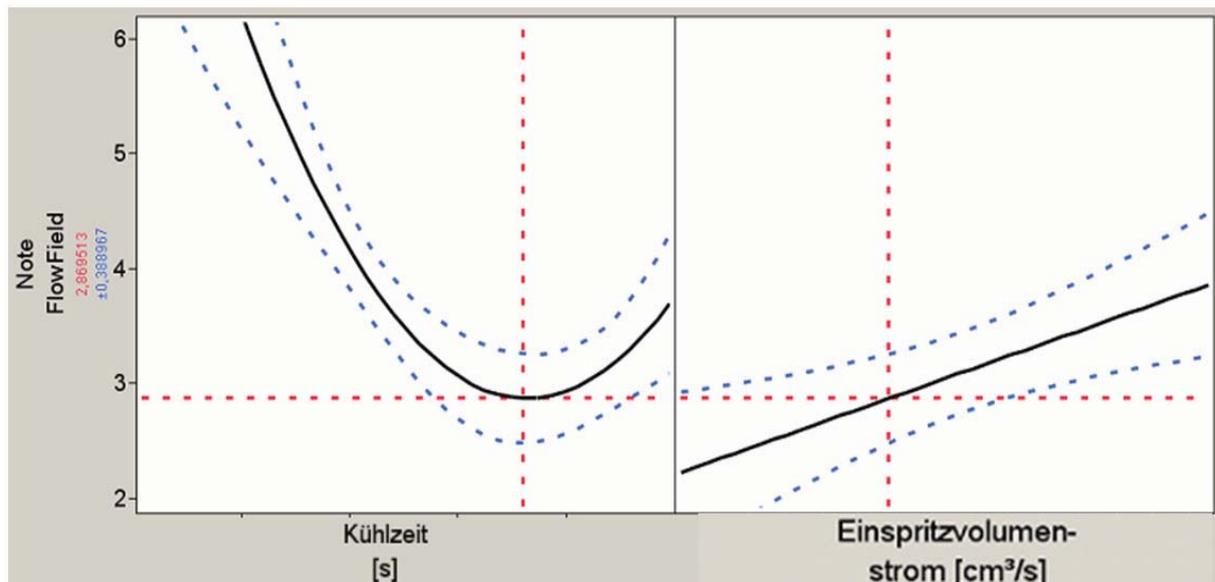


Diagramm 8: Qualitative Zusammenhänge FlowField-Füllung

Die Ausbrüche auf der Angussseite wurden durch kurze, an den Grenzen des Prozesses liegende, Kühlzeiten verursacht (vgl. Diagramm 8 links), da in diesem Fall das Material bei der Öffnung des Werkzeugs noch nicht vollständig erstarrt war, so dass durch die nicht optimale Entformungstemperatur einzelne Stegabschnitte ausbrachen. Bei zu lang ausgelegten Kühlzeiten traten ähnliche Effekte auf, da durch die lange Kühlphase die Temperaturbedingungen für den nachfolgenden Zyklus nicht mehr zielführend waren.

Im Gegensatz dazu wurden die Formfüllungsfehler in den Stegwänden der Angussge-
genseite durch eine problematische Entlüftung bei hohen Einspritzvolumenströmen
verursacht (vgl. Diagramm 8 rechts).

Ebenheit / Parallelität

Insbesondere für die weiteren Verfahrensschritte der Brennstoffzellenproduktion (z.B.
mechanische Nachbearbeitung, Dichtungsapplikation, etc.) sind ebene Bipolarplatten
von hoher prozesstechnischer Bedeutsamkeit. Im Rahmen der Versuchsreihen wurde
der hohe Einfluss der Temperaturbedingungen nachgewiesen, da unterschiedlichen
Abkühlgeschwindigkeiten zu einem Verzug / einer Durchbiegung der Platten im Ver-
lauf des Abkühlprozesses, insbesondere auch außerhalb des Spritzgießwerkzeuges
nach der Entformung, führten. Die nachfolgenden Konturdiagramme verdeutlichen
einerseits diesen Zusammenhang und zeigen andererseits, dass die Parameter Ein-
spritzvolumenstrom und die Geschwindigkeit der Auswerferstifte die Durchbiegung der
Bipolarplatten nicht beeinflussen. Insbesondere der letztgenannte Parameter galt bis-
weilen als mitverursachend, so dass hier eine neue und signifikante Erkenntnis für
den Spritzgießprozess festgestellt wurde.

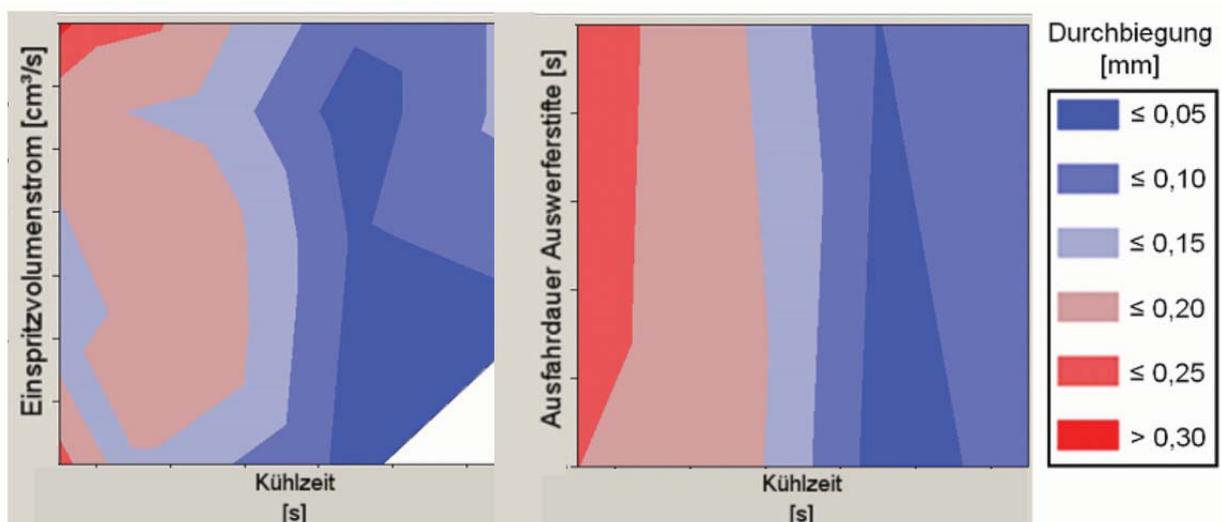


Diagramm 9: Qualitative Darstellung der Einflussfaktoren auf die Ebenheit / Parallelität

Haarrisse

Im Rahmen der Versuchsreihen dieses Arbeitsschwerpunktes wurden keine Haarrisse
in den Bipolarplatten festgestellt. Die Funktionalität der entwickelten Verfahren wurde
jedoch durch spezielle Probenplatten der Testserienproduktion nachgewiesen. Über-
dies wurde die hohe Wichtigkeit einer Haarrissdetektion mit einem Leckagetest vali-
diert. Dazu wurde eine Zelle aus Bipolarplatten mit nachgewiesenen Haarrissen
aufgebaut und deren Leckage im Vergleich zu einer Referenzzelle gemessen. Das
Ergebnis zeigt das nachfolgende Diagramm (Prüfdruck: 300 mbar, Prüfdauer:
10 Minuten, Prüfmedium: Wasserstoff):

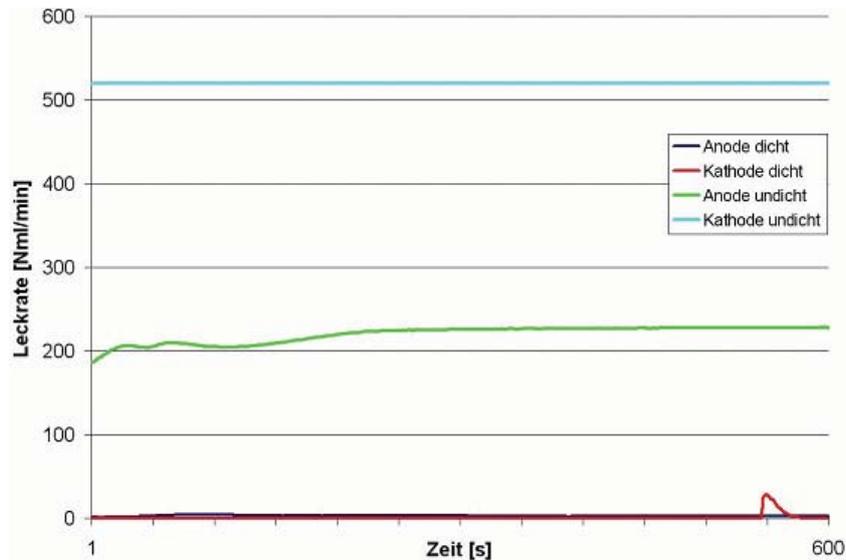


Diagramm 10: Haarriss-Leckage

Darstellung der Verwendung der Zuwendungen im Arbeitspaket 3

Zur Erfüllung der Arbeiten des AP3 wurden bei der FSt 1 anteilig drei wissenschaftliche und zwei technische Mitarbeiter eingesetzt, um die angesetzten Versuchsreihen systematisch zu planen, durchzuführen und auszuwerten. Unterstützt wurden die Mitarbeiter dabei durch studentische Hilfskräfte.

Das AP3 beinhaltet keine Arbeiten der FSt2.

5.4 Arbeitspaket 4

Zusammenfassung der Ergebnisse, Weiterentwicklung / Optimierung

Da mit der Integration eines Qualitätssicherungsverfahrens für graphitische Bipolarplatten in den Herstellungsprozess technisches Neuland betreten wurde, konnte auf keine Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Dementsprechend wurden im Hinblick auf die entwickelte Handhabung der Bipolarplatten für das Kontrollverfahren folgende notwendige Optimierungsmaßnahmen erkannt und umgesetzt:

- Durch die Ausführung des Zuführschlittens aus Aluminium kam es aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit zur Reflexionen. Diese wurden durch eine Schwärzung der Komponente reduziert.
- Die zur Fixierung und Positionserkennung notwendige Energieführungskette erforderte in der ursprünglichen Ausführung aufgrund der Schattenwirkung einen zu steilen Winkel der Dunkelfeldbeleuchtung. Dieser wurde durch eine Verlegung des Energiekettenanschlusses reduziert.
- Der Reflektionslichttaster zur Anwesenheitskontrolle der Bipolarplatten blockierte die Laserlinienprojektion der Prüfposition 3. Auch hier wurde durch eine mechanische Anpassung Abhilfe geschaffen.

Die einzelnen Optimierungsmaßnahmen sind durch eine Gegenüberstellung des Vorher- und Nachher-Zustandes in den nachfolgenden Abbildungen ersichtlich:

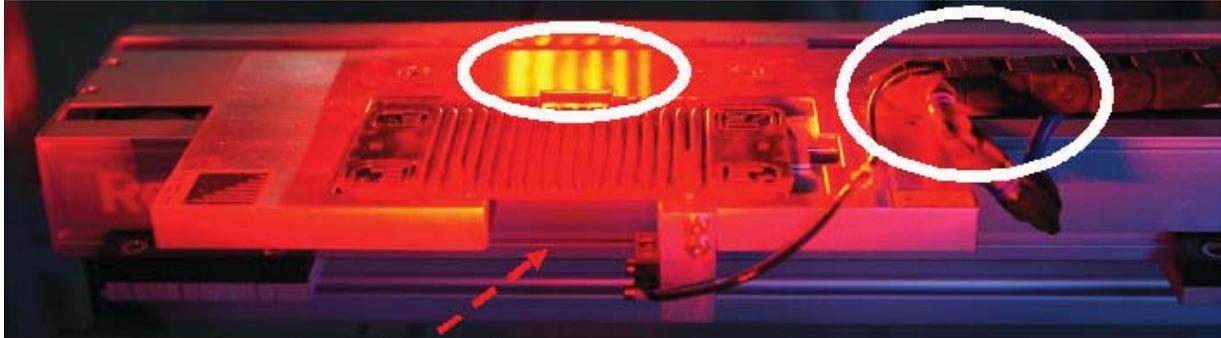


Abbildung 47: Zuführschlitten vor der Optimierung

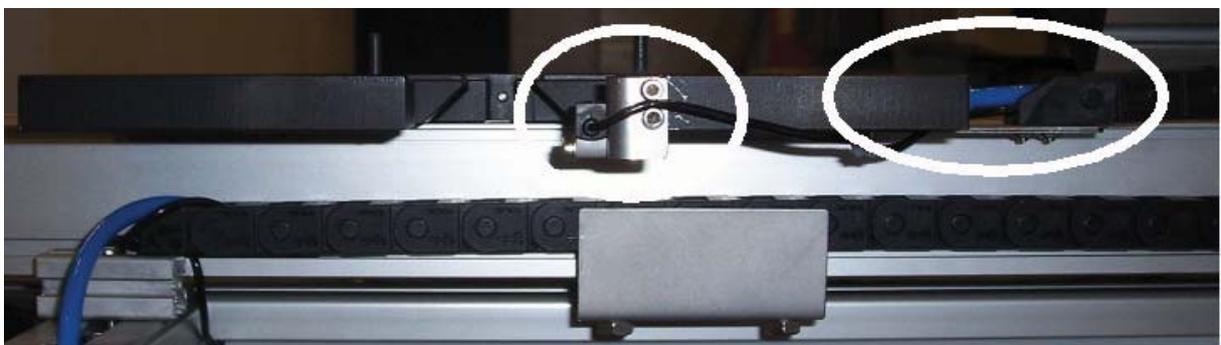


Abbildung 48: Zuführschlitten nach der Optimierung

Hinsichtlich der bildanalytischen Auswertung konnte im Arbeitspaket die Genauigkeit der Detektion des Laserlinienmittelpunktes verbessert werden. Es wurden unterschiedliche Verfahren getestet und verglichen:

- Schwerpunktbestimmung mit unterschiedlichen Maskenbreiten
- Matchingverfahren
- Maximumbestimmung

Aufgrund der Breite der Laserlinie konnte mit dem Verfahren der Schwerpunktbestimmung über 21 Positionen das beste Ergebnis erreicht werden. Die maximale Abweichung der Laserlinie vom Mittelpunkt wurde so auf 2 Pixel reduziert, was bei einer lateralen Auflösung von 60 Pixel/mm (17 μm /Pixel) einem Tiefenfehler von maximal 34 μm entspricht. Darüber hinaus wurde die Erkennung der FlowField-Ausbrüche durch zusätzliche Plausibilitätsprüfungen algorithmisch verbessert, wodurch die Anzahl der Fehlklassifikationen verringert werden konnte.

Schwerpunkt des Arbeitspaketes war die projektabschließende Erstellung einer Richtlinie, in der die Ergebnisse zu den unterschiedlichen Prüfungen und Entwicklungen zusammengefasst und in Handlungsempfehlungen umgesetzt wurden. Diese Richtlinie ist im Anhang zu diesem Abschlussbericht beigefügt.



Abbildung 49: Ausschnitte Richtlinie – vollständiges Dokument im Anhang

Darstellung der Verwendung der Zuwendungen im Arbeitspaket 4

Für die Optimierungsschritte und die Erstellung der Richtlinie wurden von der FSt1 in diesem Arbeitspaket anteilig zwei wissenschaftliche Mitarbeiter eingesetzt. Insbesondere bei der praktischen Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen wurden sie durch studentische Hilfskräfte unterstützt.

Für die Bearbeitung des AP4 wurde in der FSt 2 neben dem Projektleiter ein weiterer wissenschaftlicher Mitarbeiter zielgerichtet für die Weiterentwicklung der Algorithmen der Optimierung der Bildanalysestation und zur Mitarbeit bei der Richtlinienerstellung eingesetzt. Es wurden keine weiteren Geräte beschafft, Leistungen Dritter sind nicht angefallen.

6 Bewertung / Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die „Entwicklung einer Methode zur Qualitätssicherung bei der Fertigung von Bipolarplatten für Brennstoffzellen“. Eine solche Methode wurde mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung erfolgreich erarbeitet. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Auflösung der Aufnahmeoptik und dem daraus resultierenden flächenmäßig begrenzten Bildbereiches waren insgesamt sechs Positionen für die Prüfung einer einzelnen Bipolarplatte notwendig. Diese Anzahl und das zusätzlich erforderliche Wenden außerhalb der Prüfstation führten im Rahmen des Forschungsvorhabens, bedingt durch die niedrige Zykluszeit des Spritzgießprozesses, zu der Umsetzung einer Stichprobenprüfung. Die prinzipielle Anwendung der Methodik für eine, aufgrund der ebenfalls erarbeiteten Erkenntnisse zwingend erforderliche, hundertprozentige Stückprüfung blieb davon jedoch unberührt, da mit entsprechenden (finanziellen) Mitteln eine „Hochskalierung“ und somit eine „100%-Prüfstation“ realisiert werden kann. Hier bietet sich neben dem Einsatz mehrerer optischer Systeme ein Rundtisch zur Realisierung der zykluszeitgerechten Handhabung an:



Abbildung 50: Beispiel eines Rundtakttisches, Quelle: Fa. SITEC (Mitglied des PA)

Des Weiteren wurde im Rahmen des Forschungsprojektes aufgezeigt, dass die beim Herstellungsprozess und der anschließenden Qualitätskontrolle generierten Daten für eine entsprechende Rückkopplung prinzipiell geeignet sind. Aufgrund der Vielzahl an Parametern und der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen der Qualität und den Prozessparametern waren einfache, lineare oder quadratische Modelle jedoch nicht hinreichend, um das Potential dieser Korrelationen vollständig auszunutzen. Außerdem war zu beachten, dass es sich bei der Auswertung aufgrund der noch nicht verfügbaren Produktions- und Prüfdaten einer Massenproduktion um mathematische Modelle handelt.

Bei der Planung zur statistischen Versuchsplanung waren aufgrund des im Verhältnis zum Zeitpunkt der Antragsstellung fortgeschrittenen Know-hows hinsichtlich des Spritzgießprozesses Anpassungen im Vergleich zum gestellten Antrag erforderlich:

- Der Parameter Einspritzvolumenstrom wurde in fünf statt sechs Stufen variiert, um einen aussagekräftigen Abstand zwischen den einzelnen Stufen umzusetzen.
- Die Variation der Zykluszeit wurde nicht über die Auf- und Zufahrzeit des Werkzeuges, sondern durch den Parameter Kühlzeit realisiert, da der Abkühlprozess einen wesentlichen Einfluss auf die Plattenqualität aufweist.
- Als weiterer Einflussfaktor wurde die Verfahrgeschwindigkeit der Auswerferstifte aufgrund ihres signifikanten Einflusses auf die Haarrissbildung hinzugezogen.

Das Forschungsvorhaben war auf die Detektion von optischen Fehlern und eine Optimierung der damit verbundenen Spritzgießparameter fokussiert. Bei den erzielten Forschungsergebnissen ist jedoch zu berücksichtigen, dass auch die für einen Brennstoffzellenbetrieb wichtigen physikalischen Parameter einer Qualitätskontrolle unterliegen müssen. So bedeutet beispielsweise die Reduzierung des Einspritzvolumenstroms (zur Verbesserung der Entlüftungsmöglichkeit bei der Kavitäts-Füllung, o.ä.) einen höheren flächenspezifischen Gesamtwiderstand, was in einer zusätzlichen Versuchsreihe nachgewiesen wurde:

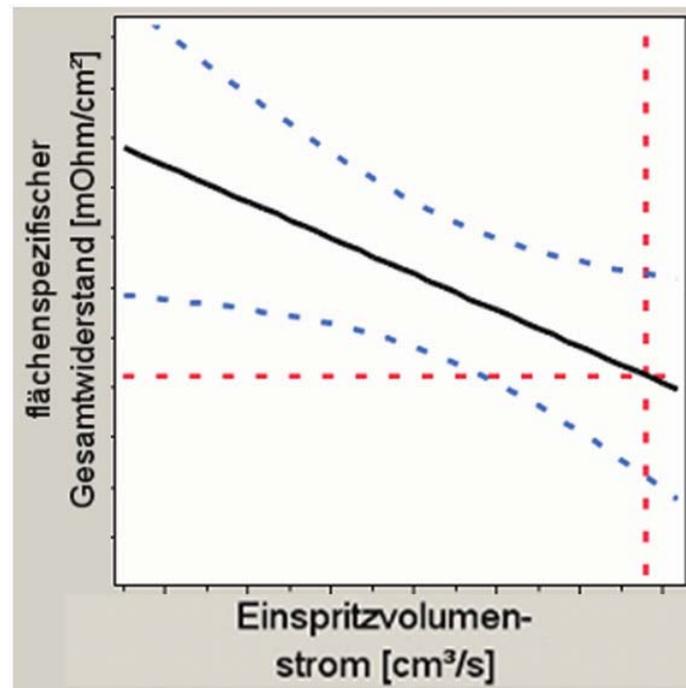


Diagramm 11: Qualitativer Zusammenhang zwischen Widerstand und Einspritzvolumenstrom

Ebenso erfährt der Faktor Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf die Marktreife von Brennstoffzellen eine immer größere Bedeutung. Jede Sekunde, um die der Spritzgießzyklus z.B. wg. einer Kühlzeitoptimierung verlängert wird, senkt die Wirtschaftlichkeit des Prozesses erheblich. Es sind somit stets die für den jeweiligen Produktionsfall optimierte Parameterkombination zu definieren.

7 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse

7.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde durch die Methodik zur Qualitätssicherung spritzgegossener Bipolarplatten eine wesentliche Hilfe für die produzierende Brennstoffzellenindustrie geschaffen.

Prüfparameter und -intervalle: Zur zuverlässigen Qualitätssicherung spritzgegossener, graphitischer Bipolarplatten sind eine Vielzahl von Parametern zu berücksichtigen und in insgesamt zwei Prüfstufen zu kontrollieren. Die ganzheitlichen Anforderungen wurden in Arbeitspaket 1 charakterisiert und dienen der Industrie als Vorlage zur Adaptierung ihrer jeweiligen Problemstellung. Überdies wurden durch die gezielte Parameteranalyse (Definition der „Regions of Interest“) bereits spezifische Optimierungsmöglichkeiten für den Prüfprozess aufgezeigt.

Prüfmethodik: Es wurde aufgezeigt welche Kamera- und Beleuchtungskonfigurationen für die Darstellung der einzelnen Fehlerklassen in den spritzgegossenen Bipolarplatten am geeignetsten sind und welche bildanalytischen Verfahren sich als zielführend

erweisen. Insbesondere die problematische Darstellung der projizierten Laserlinien wurde dargelegt und Möglichkeiten zur Auswertung demonstriert. Bedingt durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Compoundmaterials wurde im Rahmen einer Versuchsreihe des Arbeitspaketes 2 die Wichtigkeit des Abkühlprozesses verdeutlicht und als Ergebnis festgehalten, dass die Qualitätskontrolle erst bei erkalteten Prüfkörpern durchgeführt werden sollte. Diese Erkenntnisse können von der Industrie unmittelbar zur Integration der Prüfverfahren in den Prozess genutzt werden.

Optimierung des Produktionsprozesses: Durch systematische Versuchsreihen sowie einer Analyse der Qualitätssicherungs- und Produktionsparameter wurde im Rahmen von Arbeitspaket 3 eine umfangreiche Expertise generiert, die von der produzierenden Industrie als Grundlage für Prozessoptimierungsschritte genutzt werden kann. Die im Rahmen von Arbeitspaket 4 erarbeitete Richtlinie dient dabei als wichtige Orientierungshilfe.

7.2 Wirtschaftlicher Nutzen

Aus wirtschaftlicher Sicht haben die erarbeiteten Erkenntnisse einen hohen Nutzen für die Industrie, da laut einer Aussage des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) durch die Markteinführung der Brennstoffzelle und das damit verbundene hohe Innovationspotenzial ein maßgeblicher Beitrag zur Steigerung der Wirtschaftskraft und der Beschäftigung vom Anlagenbau bis hin zum Zulieferbetrieb einhergehen wird [Sch09]. Diesbezüglich sind „Hochwertige und fehlerfreie Zellkomponenten [...] der Schlüssel zu zuverlässigen, langlebigen und damit marktfähigen Brennstoffzellen“ [Mag]. Die Forderung nach einer wirtschaftlichen und qualitativ hochwertigen Produktion der Brennstoffzelle weist somit ein hohes Marktpotenzial auf, welches durch das vorliegende Forschungsthema insbesondere von KMUs weiter erschlossen werden kann.

7.3 Innovativer Beitrag der Ergebnisse

Die Qualitätskontrolle von spritzgegossenen Bipolarplatten wurde bisher, aufgrund der niedrigen Stückzahlen und der fehlenden Technik, als manueller, stichprobenartiger Prozess ausgeführt. Dabei handelte es sich durch den „Faktor Mensch“ um einen stets subjektiven und nicht zu 100% sicheren Prozess. Aufgrund der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten Methodik steht nun ein innovatives Verfahren zur Qualitätssicherung zur Verfügung. Hierdurch und auf Basis der durchgeführten Analyse zur Prozessoptimierung wird ein wichtiger Beitrag für die Marktreife der Brennstoffzelle geliefert. Insbesondere die Gewissheit sicherheitsrelevante Plattenfehler, wie z.B. Haarrisse, zu 100% detektieren zu können wird sich positiv auf die Akzeptanz der Brennstoffzelle auswirken. Eine Aufnahme der Qualitätssicherungsparameter in zukünftig zu erstellenden Normen hinsichtlich der Qualität von Brennstoffzellenkomponenten ist sinnvoll und aufgrund des hohen Grades der Ausarbeitung auch effizient umsetzbar.

7.4 Industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Die produzierende Brennstoffzellenindustrie benötigt zuverlässige Prüfmethode zum Qualitätsnachweis der teilweise sicherheitsrelevanten Kernkomponenten Bipolarplatten. Durch die erarbeitete Methodik ist diesbezüglich ein Werkzeug zur weiteren Adaptierungsmöglichkeit verfügbar. Die Richtlinie dient hier als fundierte Orientierungshilfe und bietet gleichzeitig Handlungsempfehlungen zur Qualitätserhöhung und / oder Prozessoptimierung.

Dabei ist die erarbeitete Expertise nicht nur im Kreis der Brennstoffzellenindustrie nutzbar. Auch die Wirtschaftszweige Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren (Abt. 25), Maschinenbau (Abt. 29), Feinmechanik und Optik (Abt. 33) sowie Fahrzeugbau (Abt. 34+35) können die Methodik aufgreifen und für ihre spezifische Produkte adaptieren.

8 Notwendigkeit & Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die geleisteten Arbeiten der beiden Forschungsstellen entsprachen dem begutachteten und bewilligten Forschungsantrag und waren daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen. Im Projektverlauf ergaben sich lediglich folgende Abweichungen:

Im Arbeitspaket 1 kam es aufgrund der Substitution des Doppelschneckenextruders mit dem Ringextruder zu zeitlichen Verschiebungen innerhalb des Arbeitspaketes, welche jedoch zeitnah kompensiert wurden und somit keinen negativen Einfluss auf den weiteren Projektverlauf zeigten.

Aufgrund der hohen Komplexität der Aufgabenschwerpunkte des zweiten Arbeitspaketes und der in Eigenleistung realisierten Bildanalysestation wurde der Personeneinsatz im Vergleich zur ursprünglichen Planung sowohl bei den technischen als auch den wissenschaftlichen Mitarbeitern geringfügig erhöht. Überdies führten Lieferengpässe von zwingend erforderlichen Komponenten zur Prozessintegration zu zeitlichen Verzögerungen, die eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes notwendig machten.

Insgesamt zeigten diese Abweichungen jedoch keinen negativen Einfluss, so dass es den Projektpartnern gelungen ist die Forschungsziele zu erreichen. Aus diesem Grunde werden die geleisteten, von der ursprünglichen Planung abweichenden Arbeiten, als angemessen eingestuft.

9 Transfermaßnahmen

Die nachfolgende Tabelle zeigt die im Rahmen des Projektverlaufes durchgeführten sowie noch ausstehenden Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft:

Tabelle 5: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Fortlaufende Präsentation und Diskussion der Forschungstätigkeiten	1. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschuss	10.12.2009
		2. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschuss	06.05.2010
		3. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschuss	30.11.2010
		4. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschuss	03.05.2011
Netzwerk- und Gremienarbeit, Einbeziehung von Multiplikatoren	Präsentation und Diskussion der Forschungstätigkeiten vor einer Vielzahl von branchenspezifischen Experten	3. AiF-Workshop Brennstoffzellenallianz	04.+05.05.2010
		GFaI-Seminar 2011	24.03.2011
		4. AiF-Workshop Brennstoffzellenallianz	03.+04.05.2011
Veröffentlichung	Wissenstransfer in die Wirtschaft	Statusbericht 2010 des ZBT	August 2010
		GFaI-Informationen 02/2011	Juli 2011
		Bericht auf den Webseiten der Forschungsstellen	Quartal 4/2011
Beratung der Industrie basierend auf den erzielten Forschungsergebnissen	Maßgeschneiderter Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis	Bei Bedarf weiterer Transfer der Ergebnisse in die betriebliche Praxis	laufend nach Bedarf

Demonstrator	Praktische Vorführung der Forschungsergebnisse anhand einer Demonstratoranlage	4. AiF-Workshop Brennstoffzellenallianz Laborführungen fachspezifischer Besucher, beispielsweise: Minister Remmel N. Reilly, Vorsitzender General Motors Dr. Stracke, Vorsitzender Opel Ministerin Schulze Minister Voigtsberger	03.+04.05.2011 laufend nach Bedarf März 2011 Mai 2011 August 2011 August 2011 September 2011
Messeauftritt	Vorstellung der Forschungsergebnisse vor Fachpublikum	Gemeinschaftsstand NRW auf der HMI Gemeinschaftsstand NRW auf der IAA Control 2012	April 2012 September 2011 geplant 2012
Akademische Lehre	Vermittlung der spezifischen Erkenntnisse aus erster Hand an die Studierenden durch die enge Verzahnung von Forschung und Lehre	Lehrtätigkeiten an der Universität Duisburg-Essen	Ab WS 11/12

9.1 Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und ggf. aktualisierten Transferkonzepts

Das im Forschungsantrag vorgeschlagene Konzept zum Ergebnistransfer wurde im Projektverlauf erfolgreich umgesetzt (siehe Tabelle 5). Überdies wurde im Rahmen des stetigen Wissenstransfers in die Wirtschaft aufgrund des insgesamt sehr hohen wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Potentials ein Folgeprojektantrag mit zwei KMUs ausgearbeitet und eingereicht.

10 Literaturverzeichnis

- [3DNO] Anwendungsbezogener Workshop 3D NordOst, 1-14 Berlin, GFal 1998-2010
- [Geit04] S. Geitmann, *Mit neuer Energie in die Zukunft – Erneuerbare Energien & Alternative Kraftstoffe*, Hydrozeit Verlag, Kremen 2004
- [Gr06] A. Gröhling, *Intelligent Laser Line Triangulation - Sensors in Industrial Applications* Laser-Optik-Berlin, TSB-Berlin 2006
- [Hal10] Bildverarbeitungsprogramm „Halcon“, MVtec 2010
- [He02] E. Hering, J. Triemel, H.-P. Blank, *Qualitätssicherung für Ingenieure*, VDI Verlag, Düsseldorf 2002
- [Hei06] A. Heinzl, F. Mahlendorf, J. Roes, *Brennstoffzellen – Entwicklung, Technologie, Anwendung*, Müller, Heidelberg 2006
- [Ho04] D. Holm, *Ethernetkamera mit integrierter Verarbeitung*, 49. Intern. Wiss. Koll., Ilmenau, 27.-30.09.2004
- [IBV11] C. Demant, B. Streicher-Abel, P. Waszkewitz, *Industrielle Bildverarbeitung – Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert*, Springer, Berlin 2011
- [Jae00] B. Jähne, *Digitale Bildverarbeitung*, Springer Verlag, Berlin 2002
- [Kle09] W. Kleppmann, *Taschenbuch Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren*, Hanser, München 2009
- [Kre08] C. Kreuz, *PEM-Brennstoffzellen mit spritzgegossenen Bipolarplatten aus hochgefülltem Graphit-Compound*. Veröffentlichte Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, 2008
- [Mag] <http://www.magnum.de/teststaende-und-prueftechnik.html>, Homepage der Firma Magnum Fuel Cell AG, Darmstadt [abgerufen am 26.08.2011]
- [Pfe95] T. Pfeifer, *Qualitätsmanagement*, Carl Hanser Verlag, München 1995
- [Sch09] J. Schiel, *Markteinführung und Markthemmnisse – Anforderungen der Brennstoffzellenindustrie*, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, Vortrag auf dem 7. Riesaer Brennstoffzellenworkshop, Riesa 2009

- [Son99] M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle, *Image Processing, Analysis and Machine Vision*, PWS Publishing, 1999
- [Zh99] Zhengyou Zhang, *Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations*, Seventh International Conference on Computer Vision - Volume 1, 1999

11 Anhang

- Richtlinie „Qualitätskontrolle Bipolarplatten“