Dokumentationsblatt

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



Fördervariante

Institut für Energie- und Umwelttechnik Name der AiF-Forschungsvereinigung (FV) 15955N / 1 IGF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.01.2009 - 31.03.2011

Bewilligungszeitraum

74.3 Wirtschaftszweig (WZ)

241

Aktenzeichen der MV

399.950,00

€

Summe der beantragten Zuwendung (bZ)

Forschungsstelle(n) :

Zentrum für Brennstoffzellentechnik ZBT, Duisburg Institut für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik IKFF, Stuttgart

Forschungsthema :

Variotherme Prozessgestaltung mittels Induktionstemperierung zur spritzgusstechnischen Verarbeitung hochgefüllter Thermoplaste in Brennstoffzellenanwendungen

Erzielte Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten :

Im Rahmen des Projekts wurde ein Spritzgusswerkzeug mit integrierter induktiver Beheizung simulativ ausgelegt, konstruiert und aufgebaut. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden allgemeine Richtlinien zur simulativen Auslegung, der Konstruktion und dem Bau induktiv Beheizter Werkzeuge formuliert.

In den Versuchsreihen ist es gelungen, die notwendigen Einspritzdrücke und -geschwindigkeiten soweit zu reduzieren, dass eine des Compounds Verarbeitung auf Standardmaschinen durch dieses Temperierkonzept ermöglicht wird.

Die Versuchsreihen am ZBT zeigten, dass das Projekt die im Antrag formulierten Erwartungen voll erfüllt hat. Der Spritzgießprozess konnte stabil dargestellt werden. Die dazu notwendigen Einstellun-gen wurden durch drei große Versuchsreihen erarbeitet. Dabei konnten Potentiale in der Kühlstrate-gie, den Maschinenparametern und den Induktionsgeneratoreinstellungen aufgezeigt werden.



AIF-Vorhaben-Nr.: 15955 N

Titel des Vorhabens:

Variotherme Prozessgestaltung mittels Induktionstemperierung zur spritzgusstechnischen Verarbeitung hochgefüllter Thermoplaste in Brennstoffzellenanwendungen

Forschungsstellen:

- 1. Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH (ZBT)
- 2. Universität Stuttgart (IKFF)

Bearbeitung:

Dipl.-Ing. Lars Preißner (ZBT)

Dipl.-Ing. Till Zimmermann (IKFF)

Duisburg und Stuttgart im Juli 2011



Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfas	sung	5
1.1 Veröffentlich	ungen	7
2. Einleitung		9
2.1 Funktion und	Aufbau der Bipolarplatten	10
2.2 Spritzgießpro	DZESS	11
2.3 Induktive Erv	värmung	12
2.4 Induktor		13
2.5 Arbeitspa	kete:	16
3 Voruntersuchung	en mit externem Induktor	19
3.1 Datenbasis		19
3.2 Externer Indu	ıktor	
3.2.1 Anforder	rungskatalog	
3.2.2 Entwickl	ung und Simulation des externen Induktors g und Test des Induktors	
3.3 Materialpara	meter des Werkzeugstahls	
3.4 Konstruktion	und Fertigung Schnittstelle Induktor Koppelgetriebe	
3.5 Versuche mit	externem Induktor	
3.5.1 Prozess	parameter	
3.5.2 Weitere	Versuchsauswertungen	39
4. Konstruktion und	Aufbau des Spritzgießwerkzeuges mit integriertem Induktor	41
4.1 Spritzgießwe	rkzeug	41
4.1.1 Bestimm	nung der Werkzeuggröße	42
4.1.2 Zentrieru 4.1.3 Eormein	ung und Führung sätze	
4.1.4 Entform	ung der Bipolarplatte	
4.1.5 Auslegu	ng der Stützbolzen	
4.1.6 Ausiegu 4 1 7 Werkzei	ng des Angusssystems und Entluttung Jawärmedämmung	50 54
4.2 Auslegung vo	on Induktor und Temperierung	
4.2.1 Auslegu	ng des integrierten Induktors	56
4.2.2 Integrati	on in das Werkzeug	
4.2.3 Ausiegu	ng der Tempenerung	
5.1. Isotnerme		
5.2. Induktive		
5.3. Qualitatsp	brutung	
	Dienlungen für Brennstoffzeilenanwendungen	
6.∠ vverkzeugkoi	nzept mit integrierter induktiver Beneizung	
6.2 Sicherheit		



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufbau und Funktionsprinzip einer PEM-Brennstoffzelle [1]	.10
Abb. 2: Formfüllung, links mit isothermer Temperierung, rechts mit induktiver Temperierung	g
	.12
Abb. 3: Prinzip der induktiven Erwarmung [9]	.12
Abb. 4: Prinzipschaltbild des Induktionsgenerators [10]	13
Abb. 5: Externer induktor – Prinzipskizze [7]	14
Abb. 6 Werkzeug zur Herstellung von Bipolarplatten mit externem Induktor	15
Abb. 7 Integrierter Induktor – Prinzipskizze [7]	15
Abb. 8 Kavitalsplatte mit integrienem induktor	20
Abb. 10 Rostromungsrichtung Mäander	20
Abb. 10 Destromungshontung Maander	. 22
magnatischan Foldstärka [A/m]	22
Abb. 12 Bestromungsrichtung Doppelmäander	23
Abb. 12 Destromungshentung Doppermaander	.20 n
Foldetärko [Δ/m]	24
Abb. 14 Bestromungsrichtung Kastensnule	25
Abb. 15 Simulierter Magnetfeldverlauf der Kastenspule. Darstellung des Magnetfeldes [A/n	nl
Tob. To officience magneticiavenaal der Rastenspale. Darstenang des magneticides [77]	25
Abb. 16 Bestromungsrichtung Spirale	26
Abb 17 Simulierter Magnetfeldverlauf eines spiralförmigen Induktors [A/m]	27
Abb. 18 Vergleich des Temperaturverlaufs auf der Kavitätsoberfläche	28
Abb. 19 CAD Modell des Induktors als Ergebnis der thermischen FEM	.29
Abb. 20 Mit Maxwell simulierter Magnetfeldverlauf in der Zieloberfläche	.30
Abb. 21 Berechneter Temperaturverlauf in der Kavitätsoberfläche, nach 5 sec Heizzeit	.30
Abb. 22 Durch HWG Inductoheat nach Vorgaben des IKFF gefertigter Induktor	.31
Abb. 23 Mit ANSYS Workbench simulierter Magnetfeldverlauf des Induktors	.32
Abb.24 Prüfstand zur Bestimmung der Oberflächentemperatur	.33
Abb. 25 Thermographisch ermittelte Oberflächentemperatur beispielhaft (15 kW	
Generatorleistung, 10 sec, 100 kHz)	.33
Abb. 26 Magnetische Neukurven des Formstahls 1.2343 gehärtet und ungehärtet	.34
Abb. 27 Verlauf der magnetischen Permeabilität über der Feldstärke	.35
Abb. 28 Magnetische Neukurven in Abhängigkeit der Temperatur	.36
Abb. 29 Halterung für den Induktor	.37
Abb. 30 Koppelgetriebe	.37
Abb. 31 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus	.38
Abb. 32 Versuchsaufbau mit Thermokamera zur Überwachung des Heizvorgangs	.38
Abb. 33 Beispiel einer Versuchsreihe	.39
Abb. 34 Bipolarplatte als Versuchsobjekt	.39
Abb. 35 REM Aufnahme einer Bruchkante	.40
Abb. 36 REM Aufnahme Schliffbild	.40
Abb. 37: Fließweg der Schmelzmasse im Heißkanal	.42
Abb. 38: Positionen der Auswerfer	.42
Abb. 39: Krauss-Maffei KM500 Maßskizze (Aufspannfläche) [11]	.43
Abb. 40: Krauss-Maffei KM500 Maßskizze (Offnungshub) [11]	.43
Abb. 41: werkzeuggrundaufbau	.43
Abb. 42: Funrungseinheit	.44
Abb. 43: Formeinsatze (links 2 Kavitaten, rechts 1 Kavitat)	45
Abb. 44: Einbau der Formeinsatze	45
ADD. 45: AUSWEITERPOSITIONEN	46
ADD. 40: AUSWEITEIEINDAU	46



Abb. 47: Materialverkokungen an den Auswerfern	.47
Abb. 48: Neuaufbau des Werkzeuges	.47
Abb. 49: Auswerferplattenführung	.48
Abb. 50: Zwangsrückdrücksystem	.48
Abb. 51 Wirkungsbereich der Schließkraft (Kreuzschraffierter Bereich) [13]	.49
Abb. 52 Plattendurchbiegung [14]	.49
Abb. 53: Position der Stützbolzen	.50
Abb. 54: Werkzeugaussparung für die Maschinendüse	.51
Abb. 55: Einbau der Angussbuchse	.52
Abb. 71: Bandanguss mit rundem Verteilerkanal [15]	.52
Abb. 72: Ausführung des bisherigen Angusses	.53
Abb. 73: Ausführung des neuen Angusses	.53
Abb. 74 Entlüftungskanäle Abbildung	.54
Abb. 75 Dimensionen der Entlüftungskanäle	.54
Abb. 76: Isolierplatten- Aufbau	.55
Abb. 77: Wärmeisolierung an der Auswerferseite	.55
Abb. 56 Ergebnisse der simulierten Erwärmung eines Werkzeuges mit integriertem Indukte	or
	.57
Abb. 57 Zweidimensionale thermische Simulation des Kavitätseinsatzes mit	
asymmetrischem Induktor	.58
Abb. 58 Kavitätseinsatz mit asymmetrischem Induktor	.58
Abb. 59 Heizprofil des asymmetrischen Induktors	.59
Abb. 60 Vergleich der Kühlzeiten an einem Demonstratorbaurteil	.59
Abb. 61: Aufbau des Induktors und der Temperierung (Entwurf 1)	.60
Abb. 62: Aufbau des Induktors und der Temperierung (Entwurf 2)	.61
Abb. 63: Aufbau der Induktor-Abdeckung	.61
Abb. 64: Abschirmung des Induktors in der Formplatte	.62
Abb. 65: Abschirmung des Induktors im Bereich des Formeinsatzes	.62
Abb. 66: Temperierbohrungsabstände zur gleichmäßigen Wärmeabfuhr [13]	.62
Abb. 67 Konstruktion der Temperierbohrungen (Erster Entwurf)	.63
Abb. 68 Konstruktion der Temperierbohrungen (Zweiter Entwurf)	.64
Abb. 69: Temperierkreise	.64
Abb. 70: Strömungsweg des Temperiermediums	.65
Abb. 78: Einspritzdruck der isothermen Spritzgießversuche	.65
Abb. 79: Fehlerhafte Bipolarplatte (Versuchsreihe 3)	.66
Abb. 80: Ausgewählte Versuchsreihen der induktiven Untersuchungen	.67
Abb. 81: Hergestellte Bipolarplatten mit einem Einspritzdruck von 2500 bar und einem	
Volumenstrom von 100 cm ³ (links in isothermer- und rechts in induktiver Prozess)	.68
Abb. 82: Hergestellte Bipolarplatten in der Versuchsreihe 4 (links in isothermer- und rechts	s in
induktiver Prozess)	.69
Abb. 83: Maßhaltigkeit der Bipolarplatten	.69
Abb. 84: Durchbiegung der Bipolarplatten (isotherme Prozesse)	.70
Abb. 85: Durchbiegung der Bipolarplatten (induktive Prozesse)	.70
Abb. 86: Flächenspezifischen Einzelwiderstände der Bipolarplatten (links isothermer- und	
rechts induktiver Prozess)	.71
Abb. 87 Komplettes Werkzeug	.72
Abb. 88 Werkzeug im CAD und montiert auf einer Palette	.73
Abb. 89 Schnitt durch die Formeinsätze und den Induktor	.73
Abb. 90 Aufnahme des Versuchträgers mit einer Wärmehildkamera	.74
Abb. 91 Spritzlinge aus dem Induktionswerkzeug.	.75
	-



1. Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die Untersuchung und Anwendung der variothermen Prozessführung mittels Induktionstemperierung zur spritzgusstechnischen Verarbeitung hochgefüllter Thermoplaste in Brennstoffzellenanwendungen. Nach Klärung der Datenbasis wurde ausgehend vom Anforderungsprofil ein externer Induktor konzipiert und simulativ ausgelegt. Dabei wurden zunächst unterschiedliche Induktorgeometrien hinsichtlich Heizleistung und Anpassbarkeit an die Kavitätsgeomtrie untersucht und miteinander verglichen. Am Ende dieses Auswahlprozesses wurde ein spiralförmiger Induktor auskonstruiert und das zu erwartende Erwärmungsprofil in dreidimensionalen FEM-Simulationen ermittelt und mit dem Anforderungsprofil abgeglichen.

Anschließend wurde ein entsprechendes, an das Werkzeug und die Maschine angepasstes Handlingsystem zur exakten Positionierung des Induktors vor der Kavität konstruiert und aufgebaut. In umfangreichen Versuchsreihen konnte schließlich der Einfluss und das große Potential der induktivvariothermen Werkzeugtemperierung auf die Reduzierung von Einspritzdruck- und Geschwindigkeit bei der Verarbeitung hochgefüllter Compounds erfolgreich nachgewiesen werden.

Im Anschluss an die Versuche mit der externen induktiven Zusatztemperierung wurden überprüft, welche Erkenntnisse aus diesen Versuchsreihen bzw. dem Auslegungsprozess in die Konzeption und Auslegung des integrierten Systems übernommen werden konnten. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde, wie in Arbeitspaket 3 des Antrages vorgesehen, ein Werkzeug mit integrierter induktiver Erwärmung konstruiert und parallel dazu die Induktionstemperierung simulativ ausgelegt. Dabei flossen die Erkenntnisse aus dem Auslegungsprozess des externen Systems und die Ergebnisse der Versuchsreihen mit ein.

Das auf diese Weise konstruierte Werkzeug wurde anschließend aufgebaut und in umfangreichen Vorversuchen das Erwärmungsverhalten ermittelt, um zuverlässige Prozessdaten für die nachfolgenden Versuchsreihen zu erhalten. Nach Abschluss der Vorversuche wurden umfangreiche Versuche mit dem integriert-induktiv beheizten Werkzeug durchgeführt. Dabei wurden die Parameter Heizzeit und Generatorleistung variiert, mit der Zielstellung, die Einspritzdrücke und –geschwindigkeiten auf ein Maß zu reduzieren, welches eine Verarbeitung des Compounds auf Standardmaschinen zulässt. Anschließend wurden die hergestellten Bipolarplatten vom ZBT systematisch vermessen und die Ergebnisse den entsprechenden Prozessparametern zugeordnet, um eine Aussage über den Einfluss erhöhter Werkzeugwandtemperaturen auf die Verarbeitung hochgefüllter Compounds treffen zu können.

Basierend auf den Erkenntnissen, die im Zuge des Projektes für Konzeption, Auslegung und den Aufbau induktiv beheizter Spritzgusswerkzeuge gewonnen wurden, wurden allgemeine Richtlinien bzw. Handlungsanweisungen zu den Bereichen simulative Auslegung induktiv beheizter Systeme, Aufbau und Konstruktion induktiv beheizter Werkzeuge sowie Prozessparameter für die induktive Temperierung von Spritzgusswerkzeugen formuliert.



Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Die Versuchsreihen am ZBT zeigten, dass das Projekt die im Antrag formulierten Erwartungen voll erfüllt hat. Der Spritzgießprozess konnte stabil dargestellt werden. Die dazu notwendigen Einstellungen wurden durch drei große Versuchsreihen erarbeitet. Dabei konnten Potentiale in der Kühlstrategie, den Maschinenparametern und den Induktionsgeneratoreinstellungen aufgezeigt werden. Diese werden für das Arbeitspaket 6 aufbereitet und zur Verfügung gestellt.



1.1 Veröffentlichungen

Im Zusammenhang mit dem IGF-Vorhaben erfolgten während der Projektlaufzeit folgende Vorträge, Veröffentlichungen und sonstige Präsentationen:

Vorträge:

17.02.2009	2. AIF-Workshop Brennstoffzellenallianz (ZBT Duisburg)
	"Nutzung der induktiv-variothermen Prozessführung bei der Herstellung von Bipo- larplatten." (Vortrag)
19.03.2009	21. Stuttgarter Kunststoffkolloquium (Universität Stuttgart)
	"Anwendungsgebiete der induktiven Erwärmung im Bereich der Kunststoffverarbei- tung" (Tagungsbeitrag)
24.04.2009	Vorstellung des Projektes und der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen
	Ergebnisse im Projektbegleitenden Ausschuss (IKFF Universität Stuttgart)
01.10.2009	1. Produktionstechnisches Kolloquium Brennstoffzelle (ZBT Duisburg)
	"Induktion und Spritzguss- Neue Möglichkeiten" (Vortrag)
02.10.2009	Vorstellung der Ergebnisse zum Abschluss des 1. Meilensteins im
	Projektbegleitenden Ausschuss (ZBT Duisburg)
23.02.2010	Micro Technology iNNOVATION fORUM (Villingen-Schwenningen)
	"Appliaction Range Of Inductive Heating In Plastics Processing" (Vortrag)
15.06.2010	14. Engelskirchener Kunststofftechnologietag (Engelskirchen)
	"Anwendungsgebiete der induktiven Erwärmung in der Kunststoffverarbeitung" (Vor- trag)
22.09.2010	Vorstellung der Ergebnisse zum Abschluss des 2. Meilensteins im
	Projektbegleitenden Ausschuss (ZBT Duisburg)
17.03.2011	22. Stuttgarter Kunststoffkolloquium (Universität Stuttgart)
	"Induktionserwärmung und Kunststoffspritzguss" (Vortrag & Tagungsbeitrag)
3./4.05.2011	4. Workshop AiF - Brennstoffzellenallianz.
	(Zentrum für Brennstoffzellentechnik Duisburg)
	"Induktive Werkzeugtemperierung zur spritzgusstechnischen Verarbeitung
	hochgefüllter Thermoplaste" (Vortrag)



Messeauftritte:

23.-26.03.2011 Messeauftritt bei der Hausmesse eines Spritzgussmaschinenherstellers

(Vorführung eines Werkzeugs mit integriert-induktiver Beheizung)

Veröffentlichungen:

"Induktive Erwärmung, Anwendungsgebiete im Bereich der Kunststoffe" Zülch, M.;Zimmermann, T.; Schinköthe, W. GIT Labor-Fachzeitschrift, 4/2010, S. 286-287

"Induktiv-variotherme Prozessführung im Kunststoffspritzguss" Zimmermann, T.; Zülch, M., Schinköthe, W. Plastverarbeiter, 11/2010, S. 42-44

Lehre:

Übernahme der Ergebnisse in die Lehrveranstaltung "Praxis des Spritzgießens in der Gerätetechnik; Verfahren, Prozesskette, Simulation" im Rahmen des Hauptfaches Feinwerktechnik im Studiengang Maschinenbau an der Universität Stuttgart.

Bearbeitung mehrerer Studien- und Diplomarbeiten am IKFF/ZBT zu Teilbereichen dieses Themas. <u>Schutzrechte:</u>

Es wurden im Bearbeitungszeitraum keine Schutzrechte angemeldet.

Förderhinweis

Das Forschungsvorhaben 15955 N wurde über die AIF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.



2. Einleitung

Unser Energiebedarf wird heute hauptsächlich durch die fossilen Energieträger wie Erdöl, Kohle oder Erdgas gedeckt. Aufgrund der zunehmenden CO_2 – Emissionen und der damit verbundenen rasanten Klimaveränderung sowie der drohenden Erschöpfung der weltweiten Reserven der fossilen Brennstoffe ist die Brennstoffzellentechnologie im vergangenen Jahrzehnt in den Fokus der Forschung gerückt. Schon heute zeigt sie in verschiedenen Prototypen-Anwendungen ihr hohes technologisches Potential auf. Dies reicht von stationären Systemen in der Hausenergieversorgung über den Einsatz im Automobil bis hin zu Kleinsystemen in portablen Geräten wie Laptops oder Handys.

Das Zentrum für BrennstoffzellenTechnik in Duisburg (ZBT) beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit der Optimierung der Komponenten der Brennstoffzellen und deren Fertigungsverfahren, um eine Massenproduktion zu ermöglichen und damit die Grundvoraussetzung für eine Markteinführung dieser Technologie zu erfüllen. Zu den Komponenten zählen untereinander die protonenleitende Membran, die Dichtungen und die Bipolarplatten, welche in dieser Arbeit im Fokus stehen.

Neben der protonenleitenden Membran stellt sich die Herstellung von Bipolarplatten als sehr kostenintensiv dar und macht bislang rund 30% der Stack-Gesamtkosten aus. Um den Anforderungen einer kostengünstigen Produktion nachzukommen, beschäftigt sich das ZBT schon seit 2001 mit der spritzgießtechnischen Verarbeitung hochgefüllter Graphit-Compounds zu Bipolarplatten.

Trotz jahrelanger Entwicklungstätigkeiten auf diesem Gebiet wird der Spritzgießvorgang momentan noch durch eine Vielzahl technischer Hürden behindert. Im Besonderen zählen hierzu im Vergleich zum Kunststoffspritzgießen höhere Prozessparameter, die hohe Anforderungen an die Verarbeitungsmaschinen sowie an das Spritzgießwerkzeug stellen. [1]

Die Brennstoffzelle, deren grundsätzlicher Aufbau von dem walisischen Physiker und Jurist Sir William R. Grove entwickelt wurde, ist ein elektrochemischer Energiewandler, welcher aus einem Brennstoff (Wasserstoff) und Sauerstoff elektrische Energie, Wärme und Produktwasser erzeugt. Der elektrochemische Prozess ist prinzipiell eine Umkehrung der Elektrolyse. Die Brennstoffzellen arbeiten viel effizienter als die übrigen Stromerzeuger. Grund dafür ist die Tatsache, dass die im Brennstoff gespeicherte chemische Energie direkt in elektrische Energie umgewandelt wird und nicht wie üblich durch Verbrennung zuerst in thermische Energie, anschließend in mechanische Energie und daraufhin über einen Generator in die gewünschte elektrische Energie transformiert wird. Dadurch unterliegt der Vorgang keiner Begrenzung durch den Carnot-Wirkungsgrad und ist im Idealfall reversibel. [2,3]

Eine Brennstoffzelle besteht im Wesentlichen aus zwei Elektroden, der Anode und der Kathode sowie einer Elektrolytmembran, die beide Elektroden und die zuzuführenden Gase voneinander trennt. Es gibt verschiedene Brennstoffzellen-Typen, die sich in Aufbau- und Funktionsweise ähneln, jedoch im Elektrolytmaterial sowie Brennstoffart und Betriebstemperatur unterscheiden. [4]

In Abb. 1 ist eine "Polymer Elektrolyt Membran-Brennstoffzelle" (kurz PEM-Brennstoffzelle) dargestellt. Sie ist zurzeit die bekannteste Variante. Deswegen wird sie an dieser Stelle exemplarisch für alle anderen beschrieben. Auf der Anodenseite wird der Wasserstoff kontinuierlich zugeführt, wo er beim



Kontakt mit der Anode oxidiert. Es entstehen zwei H+-Ionen und zwei Elektronen pro Wasserstoffmolekül. Die Protonen H+ werden durch eine ionenleitfähige, elektronenundurchlässige Polymer-Elektrolyt-Membran zur Kathode transportiert, während die Elektronen im äußeren Stromkreis zur Kathode wandern und auf diesem Weg elektrische Arbeit verrichten. An der Kathode verbinden sich die Protonen und Elektronen mit dem der Kathode zugeführten Sauerstoff zu Wasser. [2]



Abb. 1: Aufbau und Funktionsprinzip einer PEM-Brennstoffzelle [1]

In der Membran-Elektroden-Einheit (kurz MEA – engl. Membrane-Electrode-Assembly) finden folgende Teilreaktion statt:

Anodenreaktion:	2H ₂	\rightarrow	4H-	+ +	4e ⁻		
Kathodenreaktion:	4H+	+	4e ⁻	+	O ₂	\rightarrow	2H ₂ O
Gesamtreaktion:	$2H_2$	+	O ₂	\rightarrow	2H ₂ C)	

Eine einzelne Zelle erzeugt nur eine sehr geringe Spannung (in der Praxis 0,5 - 1 V), daher werden, je nach benötigter Spannung, einzelne Zellen in Reihe geschaltet und formen einen sogenannten Zellenstapel, meist mit dem englischen Begriff "Stack" bezeichnet. [5]

2.1 Funktion und Aufbau der Bipolarplatten

Bipolarplatten sind die elektrisch und thermisch leitfähigen Kontakt- und Separatorplatten zwischen den einzelnen aktiven Zellen eines Brennstoffzellenstacks. Sie leiten die Reaktionsgase zu den einzelnen Zellen, verteilen diese über eine Nutkanalstruktur (den sogenannten Flowfields) gleichmäßig an die aktiven Flächen der Membranen und trennen die Reaktionsmedien gasdicht voneinander sowie nach außen ab. Zudem stellen sie den elektrischen Kontakt zu den benachbarten Zellen her und leiten über ein Kühlmedium die Prozesswärme ab. Zur Verbesserung der elektrischen Kontaktierung und der



Dichtwirkung wird der Brennstoffzellenstapel über zwei Endplatten verspannt. Diese mechanische Verspannung wird über die Bipolarplatten durch den Stack geleitet. [3]

Neben diesen Aufgaben unterliegen die Bipolarplatten während der gesamten Betriebszeit der Brennstoffzelle einer chemisch sehr feuchten und sauren Umgebung, der sie widerstehen müssen. [3]

Um bei der Anwendung des Spritzgießverfahrens eine vollständige Ausformung der Bipolarplatte mit geringem Aufwand (Druck, Einspritzgeschwindigkeit und Schließkraft) zu erreichen, ist der Einsatz einer induktiven Temperierung sinnvoll, um eine frühzeitige Randschichterstarrung zu verhindern. Hierbei wird die Werkzeugwand zum Einspritzzeitpunkt bis auf Höhe der Schmelztemperatur erwärmt. Mangels einer Temperaturdifferenz zwischen der Schmelze und der Werkzeugwand wird die Randschichterstarrung unterbunden. Somit wird eine vollständige Formfüllung gewährleistet. Nach dem Einspritzvorgang wird das Werkzeug, wie beim normalen Spritzgießvorgang, abgekühlt, damit die eingebrachte Schmelze erstarrt. [6]

2.2 Spritzgießprozess

Das ZBT beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit der spritzgießtechnischen Verarbeitung von Graphit- Compounds zu Bipolarplatten. 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, wurde der Spritzgießvorgang soweit optimiert, dass inzwischen bis zu 220 Bipolarplatten pro Stunde hergestellt werden können. Dies entspricht einer Zykluszeit von ca. 16,5s.

Das Compound-Granulat wird über fünf verschiedene Heizzonen des Spritzgießmaschinen-Extruders auf eine Verarbeitungstemperatur von über 350 °C gebracht. Mit einem Druck von über 3000 bar und einer Einspritzgeschwindigkeit von 580 cm³/s wird die aufgeschmolzene Masse in das Werkzeug eingespritzt, um eine Formfüllung zu erreichen. Bedingt durch diesen hohen Druck wird selbst bei der kleinen Lateralfläche von 85 cm² der Bipolarplatte eine Schließkraft von 2500 kN (die sich durch den Anguss auf 3500 kN erhöht) benötigt, um eine Gratbildung zu verhindern.

Besonders die hohe Wärmeleitfähigkeit des Materials stellt eine große Hürde für den Spritzgießvorgang dar. Durch die hohe Temperaturdifferenz von ca. 300 °C zwischen der Schmelzemasse und der Werkzeugwand erstarrt das Material sehr schnell. Dies führt zum Erstarren des Querschnitts, bevor die Kavität vollständig gefüllt ist, und somit zu Bauteilfehlern. Eine weitere Hürde ist der komplexe Aufbau und die hohen Fließweg/Wandstärke-Verhältnisse von 60/1 der Bipolarplatten.

Um hochgefüllte Compounds mit geringerem Aufwand verarbeiten zu können, ist ein Erwärmungsprozess, der dieser Temperaturdifferenz und somit der Randschichterstarrung während des Spritzgießvorgangs abhilft, von Vorteil (s. Abb. 2). Allerdings ist dies mit herkömmlicher Temperierung nicht mehr wirtschaftlich, da sich die Zykluszeiten in den Bereich von Minuten erhöhen. Demgegenüber stellt sich die induktive Temperierung aufgrund ihrer gezielten Erwärmung der Kavität in relativ kurzer Zeit als außerordentlich vielversprechend dar.





Abb. 2: Formfüllung, links mit isothermer Temperierung, rechts mit induktiver Temperierung [7]

2.3 Induktive Erwärmung

Der induktiven Erwärmung liegt das Transformationsprinzip zugrunde. Ein an der zu erwärmenden Fläche angepasster Leiter, der Induktor, wird von einem hochfrequenten Wechselstrom durchflossen und erzeugt ein elektromagnetisches Wechselfeld (s. Abb. 3). Sobald ein elektrisch und magnetisch leitfähiges Material in dieses Wechselfeld gebracht wird, werden im Oberflächenbereich Wirbelströme induziert. Diese Wirbelströme bewirken, aufgrund des spezifischen elektrischen Widerstandes des Materials, eine Joule`sche Erwärmung. Somit wird bei der induktiven Heizung die Erwärmung im Werkstück selbst generiert und muss nicht durch Wärmeleitung, Konvektion oder Strahlung übertragen werden. [8,9]



Abb. 3: Prinzip der induktiven Erwärmung [9]

Der am Werkstück generierte Wirbelstrom erzeugt seinerseits auch ein Magnetfeld, das dem Induktorfeld entgegen gerichtet ist, was zu einer Verdrängung des Stroms aus dem Inneren an den Rand des Werkstückes führt. Dieser Vorgang wird "Skin-Effekt" genannt. Mit zunehmender Frequenz verstärkt sich dieser Effekt, so dass schließlich nur eine sehr dünne Oberflächenschicht des Werkstücks vom Strom durchflossen und somit erwärmt wird. Das Eindringmaß (oder Skintiefe δ s) hängt von der Permeabilität μ , der elektrischen Leitfähigkeit κ^{κ} des Werkstückwerkstoffes und der Arbeitsfrequenz fab und ergibt sich zu



$$\delta_{\rm s} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mathbf{f} \cdot \boldsymbol{\kappa} \cdot \boldsymbol{\mu}}} \tag{4.1) [8]}$$

Bei der Induktionserwärmung wird die Frequenz abhängig vom Anwendungsfall ausgewählt. Während zum Durchwärmen oder Schmelzen von Bauteilen eher Nieder- (bis 60 Hz) und Mittelfrequenzen (60 Hz bis 10 kHz) eingesetzt werden, eignen sich hochfrequente Wechselfelder (>10 kHz) besser zum Randschichterwärmen und partiellen Erwärmen von Werkstücken. [7,9]

Für die Durchführung der Induktionsversuche steht ein Generator vom Typ TrueHeat MF 5020 der Firma TRUMPF mit einer maximalen Nennleistung von 20 kW und einem einstellbaren Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 100 kHz zur Verfügung. Der Generator besteht aus zwei über Versorgungs- und Steuerkabel miteinander verbundenen Teilen, dem Netzteil und dem Schwingkreis, und ist in Abb. 4 dargestellt.



Abb. 4: Prinzipschaltbild des Induktionsgenerators [10]

Der Generator wird direkt an das Drehstromnetz angeschlossen. Der eingehende Wechselstrom (*f*=50 Hz) wird zuerst gleichgerichtet und anschließend über den Wechselrichter in den gewünschten hochfrequenten Wechselstrom umgewandelt. Die Steuerungselektronik überwacht alle Eingangs- und Ausgangsparameter und regelt die abgegebene Leistung nach der Höhe des vorgewählten Leistungs- sollwertes. Über ein Handbediengerät lässt sich der Generator manuell ansteuern, wodurch alle zum Betrieb notwendigen Befehle intern erzeugt werden. Die Ausgangs- und Sollwerte der Wechselspannung und des Wechselstromes, die Leistung sowie die Frequenz werden während des Heizvorgangs über einen LCD-Display angezeigt. Zusätzlich ermöglichen mehrere standardisierte Schnittstellen, die Generatorsteuerung mit einem externen Steuerungsrechner zu verbinden und in die bestehende Prozessstruktur zu integrieren. Für die notwendige Kühlung der Generatorkomponenten und Zuleitungen sowie der Induktorspule sorgt ein angeschlossener Wasserkreislauf. [7,9]

2.4 Induktor



Der Induktor überträgt die vom Generator gelieferte elektrische Energie transformatorisch auf das zu erwärmende Werkstück. Die Formgestaltung des Induktors hängt entscheidend von der Geometrie des Werkstückes ab. Zur Herstellung des Induktors werden Kupferhohlprofile mit rundem oder viereckigem Querschnitt verwendet, da Kupfer die erforderliche hohe elektrische Leitfähigkeit besitzt. Beim Erwärmungsprozess wird der Induktor mit Wasser durchströmt, um die entstehende Verlustwärme abzuführen und somit seine Überhitzung zu verhindern. [9]

Für die Realisierung im Spritzgießwerkzeug bieten sich zwei grundsätzlich verschiedene Verfahren der induktiven Temperierung an. Sie kann in einer direkten oder indirekten Anordnung erfolgen. [8]

Externer Induktor

Bei der direkten Erwärmung wird (s. Abb. 5) ein externer Induktor eingesetzt, der mit Hilfe einer Handhabungseinrichtung in einem definierten Abstand vor der Kavität positioniert wird und die Oberflächen der Kavität bei geöffnetem Zustand erwärmt. Nach dem Erreichen der gewünschten Oberflächentemperatur wird die Spule aus dem Schließbereich des Werkzeugs entfernt und das Werkzeug geschlossen, so dass der Spritzgießvorgang erfolgen kann. [7]



Abb. 5: Externer Induktor – Prinzipskizze [7]

Durch diese Erwärmungsmethode können gezielte Bereiche der Kavität erwärmt und lokale Abformungsprobleme behoben werden. Ein weiterer Vorteil der externen Temperierung ist, dass ein geringer Bedarf an konstruktiven Änderungen besteht (s. Abb. 6), und sie somit relativ schnell aufzubauen ist. [6]





Abb. 6 Werkzeug zur Herstellung von Bipolarplatten mit externem Induktor

Integrierter Induktor

Die aktuellen Entwicklungen am IKFF gehen dahin, den Induktor fest in das Werkzeug zu integrieren. Die induktive Zusatztemperierung muss dabei bereits in der Konstruktionsphase des Werkzeugs berücksichtigt werden.



Abb. 7 Integrierter Induktor – Prinzipskizze [7]



Der Induktor wird von hinten in die Kavitätsplatte eingebracht (s. Abb. 7 und Abb. 8), dabei müssen die Medienversorgung sowie die Lage der Auswerfer berücksichtigt werden, was einen erheblichen konstruktiven Mehraufwand bedeutet. Durch die indirekte Erwärmung der Kavitätswand von hinten sind die erreichbaren Heizraten deutlich geringer, als bei Verwendung eines externen Induktors.



Abb. 8 Kavitätsplatte mit integriertem Induktor

Trotz dieses Mehraufwandes bietet der Einsatz der integrierten Zusatztemperierung einige Vorteile gegenüber dem externen System. Wegen der Wärmeleitung ist eine wesentlich homogenere Erwärmung auch komplexer Kavitätsgeometrien mit ausgeprägter Topologie möglich. Außerdem erlaubt die integrierte induktive Zusatztemperierung ein gleichmäßiges, beidseitiges Beheizen der Werkzeughälften zyklusunabhängig bis hinein in die Nachdruckphase. Über kavitätsnah angebrachte Thermoelemente ist außerdem eine zuverlässige Temperaturregelung bzw. eine temperaturgeregelte Prozesssteuerung möglich.

2.5 Arbeitspakete:

Das Projekt wurde entsprechend den nachfolgend dargestellten Arbeitspaketen abgearbeitet. Innerhalb der Projektlaufzeit waren drei wesentliche Meilensteine definiert die entsprechend der zeitlichen Planung erreicht werden konnten.

AP1: Festlegung des Anforderungsprofils an das extern temperierte Werkzeug und an den externen Induktor



Ausgehend vom Ist-Stand des von ZBT vorhandenen Spritzgusswerkzeuges werden die Anforderungen an einen externen Induktor und an das Werkzeug festgelegt. Dazu werden sich im Einsatz befindliche Werkzeuge als Hilfsmittel herangezogen und ein Referenzwerkzeug festgelegt. Im Rahmen von Arbeitspaket 1 betreut das IKFF die Induktorauslegung und das ZBT die Werkzeugauslegung. In gemeinsamen Arbeitskreisen werden beide Aspekte zusammengeführt.

AP2: Aufbau eines ersten externen temperierten Versuchsträgers, Validierung der Simulationsergebnisse und deren Rückführung

Sind die Spezifikationen an das Werkzeug mit externer induktiver Temperierung festgelegt, beginnt das IKFF mit der Simulation der Wärmeübertragung und der elektromagnetischen Felder. Basierend auf diesen Ergebnissen findet eine konstruktive Anpassung des Spritzgusswerkzeugs an die externe Induktion statt. Parallel werden diese Daten dazu genutzt, einen geeigneten HF-Generator auszuwählen. Grobe Leistungsklassen lassen sich zwar im Vorfeld klären, die Feinjustage wird jedoch durch die Ergebnisse wesentlich vereinfacht und wissenschaftlich begründet. Nach Abschluss der theoretischen Betrachtung werden die Ergebnisse praktisch umgesetzt. Induktor, Werkzeug und Bewegungskinematik werden nach Vorgabe konstruiert und am IKFF bzw. am ZBT gefertigt.

Zur Prüfung der Ergebnisse werden die Komponenten in die Spritzgussanlage des ZBT eingebaut und die im Arbeitsplan erwähnten Versuchsreihen abgefahren.

Meilenstein 1: Erfahrungsbericht über die Ergebnisse der Versuche mit dem externen Induktor und Vergleich mit der Simulation

AP3: Aufbereitung der Prozessdaten aus Punkt 2 zur internen Induktorauslegung auf Basis der Erkenntnisse und Prozessdaten sowie Realisierung eines Werkzeugs mit externen Induktor

Aus den gewonnenen Daten der ersten Testreihe mit einem externen Induktor werden die Versuchsparameter mit der Simulation verglichen und, falls notwendig, korrigiert. Diese Rückführung der Prozessdaten in die Simulation ermöglicht eine kontinuierliche Verbesserung der programmspezifischen Vorhersage. Dies wird nun vom IKFF dazu genutzt, die interne induktive Temperierung zu simulieren und Konstruktionsvorschriften für den vorliegenden Fall zu generieren. Diese Konstruktionsvorschriften werden dann vom ZBT in einem Werkzeug umgesetzt.

Meilenstein 2: Bau eines intern induktiv beheizten Werkzeugs

AP4: Einfahren des Werkzeugs und Aufnahme der Prozessdaten und -kenngrößen

Das intern induktiv beheizte Werkzeug wird in die Spritzgussmaschine eingesetzt und mit den entsprechenden Parametern eingefahren. Während dieser Einfahrphase am ZBT findet ein Abgleich der Simulationsdaten mit den Prozessdaten und deren Auswertung statt. Ist dieser Prozess abgeschlossen, wird das Werkzeug unter Produktionsbedingungen gefahren und seine Qualität unter realen Bedingungen bewertet.

AP5: Weiterentwicklung / Optimierung der Ergebnisse aus Punkt 4.

Während dieser Phase werden auftretende Schwachstellen und Probleme korrigiert und nachgebessert.

AP6: Allgemein gültige Empfehlung (Handlungsrichtlinie) für Gesamtprozess



Es wird von IKFF und dem ZBT zusammen eine Handlungsrichtlinie erstellt, aus der hervorgeht, wie ein Werkzeug mit interner induktiver Temperierung für hochgefüllte Kunststoffe aufgebaut sein muss und welche Generatorparameter sinnvoll sind.

Meilenstein 3: Anwendung des Werkzeugs und Herstellen eines stabilen Produktionsprozesses



3 Voruntersuchungen mit externem Induktor

3.1 Datenbasis

Zwischen den beteiligten Projektpartnern ZBT und IKFF wurde das Anforderungsprofil an das im ersten Projektabschnitt zu entwickelnde extern-induktiv temperierte Werkzeug abgeklärt. Hierzu wurden die vom ZBT geforderten Zielgrößen wie Heizzeit, Zieltemperatur an der Kavitätsoberfläche, geometrische Abmessungen von Werkzeug und Kavität sowie für das Werkzeug Stähle mit ihren elektrischen und magnetischen Werkstoffkennwerten, soweit diese bekannt, in einem Lastenheft festgeschrieben. Übergabe folgender Parameter durch das ZBT:

Maschinenparameter:

Maschinentyp: Krauss Maffei KM300-1900C2 Positioniergenauigkeit: 0,2 mm Schließgeschwindigkeit: 250 mm/sec

Prozessparameter:

Compound-Einspritztemperatur: ca. 350 °C Werkzeugtemperatur: 60 °C (Öltemperiert) Entformungstemperatur: ca. 70 °C

Werkzeugparameter:

Formenstahl: 1.2343 (gehärtet auf 52+/-1 HRC, 2x angelassen)

Die am ZBT hergestellten graphitischen Bipolarplatten haben einen komplexen Aufbau. Sie sind beidseitig strukturiert und haben eine Kantenlänge von 137,5 mm in der Länge und 62 mm in der Breite. Wie Abb. 9 zeigt, befinden sich auf der oberen Seite (Flowfieldseite) sieben mäanderförmig angeordnete Nuten, die das Reaktionsgas an den Membraneinheiten vorbeileiten sollen. Diese Nuten haben eine Tiefe von 1 mm und eine Nutenbreite von 0,9 mm. Auf der unteren Seite der Bipolarplatten (auch Kühlseite genannt) befinden sich lange Stege mit einer Höhe von 0,9 mm. Über diese Stege wird die Bipolarplatte mit Luft durchströmt, wodurch sie abkühlt, und so eine Überhitzung der Brennstoffzelle verhindert wird.





Abb. 9: Konstruktionszeichnung mit Hauptmaßen der Bipolarplatte

Beim Spritzgießen wird eine Seite des Spritzteils nicht durch Auswerferstifte entformt, sondern muss sich beim Öffnen des Werkzeuges aus der Düsenseite lösen. Durch die Kantenrundungen von 0,8 mm, einer Schrägung von 10° und die sehr scharf zulaufenden Enden der Kühlstege werden diese Anforderungen gewährleistet. Um die Entformung der Bipolarplatte an der Auswerferseite zu unterstützen, ist das Flowfield auch mit Entformungsschrägen von 10° und Kantenrundungen von 0,15 mm versehen.

3.2 Externer Induktor

3.2.1 Anforderungskatalog

Für die simulative Auslegung des externen Induktors wurden zwischen den beteiligten Forschungsstellen folgende Anforderungen an den Induktor vereinbart.

- 1.) Die Kavitätsoberfläche soll homogen bis auf Schmelzetemperatur erwärmt werden, ohne das Flowfield oder andere Bereiche der Kavität zu beschädigen.
- 2.) Die Induktorgeometrie ergibt sich aus der Form der Biploarplatte mit Anguss. Der Induktor wird derart gestaltet, dass die gesamte Kavität einschließlich des dreieckigen Verteilers induktiv beheizt werden kann.
- 3.) Der Induktor soll einen möglichst hohen Wirkungsgrad aufweisen, um bei möglichst geringem Energieeinsatz die geforderten Heizleistungen zu erreichen.



3.2.2 Entwicklung und Simulation des externen Induktors

Anhand der im Lastenheft festgeschriebenen Daten wurden zunächst in vereinfachten zweidimensionalen harmonisch-elektromagentischen und transient-thermischen Simulationen mit ANSYS grundlegende Untersuchungen zu möglichen Induktorgeometrien durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, eine Induktorgeometrie zu finden, die die im Anforderungskatalog formulierten Kriterien erfüllt. Zunächst wurden vier unterschiedliche Induktorgrundformen (Mäander, Doppelmäander, Kastenspule und ebene Spirale) simulativ untersucht. Neben der Erwärmungsleistung wurden auch die Homogenität der Erwärmung und die Anpassung der Induktorgeometrie an die Form der Kavität berücksichtigt.

Für die simulativen Voruntersuchungen wurden zweidimensionale Schnittmodelle erstellt. Anhand von diesen Modellen wurden in gekoppelten elektromagnetisch-harmonischen und transient-thermischen Simulationen die Feldausbreitung um den Induktor und die Temperaturverteilung an der Kavitätsoberfläche qualitativ untersucht. Die vier untersuchten Grundgeometrieen waren:

Mäander

Die Mäanderform ist eine der gängigsten Induktorbauformen (s. Abb. 10). Diese Geometrie kommt häufig beim induktiven Härten flächiger Bauteile zum Einsatz. Ein Vorteil ist die einfache Anpassung an die zu erwärmende Kavitätsgeometrie.

Das Ergebnis der harmonischen elektromagnetischen Simulation in ANSYS zeigt eine deutlich erkennbare Konzentration des Magnetfeldes zwischen den einzelnen Leiterbahnen des Induktors (s. Abb. 11). Dieser Effekt ist geometriebedingt. Die wechselseitige, gegensinnige Bestromung benachbarter Leiter (s. Abb. 10) führt zu einer Feldkonzentration zwischen den Leitern. Dies hat zur Folge, dass nur ein geringer Anteil des Magnetfeldes in die Werkstückoberfläche eingekoppelt wird. Die daraus resultierende geringe Energiedichte in der Zieloberfläche führt zu einer sehr schlechten Erwärmungsleistung dieser Induktorgeometrie.

Die Simulation ergab, dass eine Einkopplung des Magnetfeldes in die Werkstückoberfläche direkt unterhalb der Leiter am effektivsten ist. Im Zusammenhang mit der sehr geringen Feldkonzentration in der Oberfläche unterhalb der Leiterzwischenräume ergibt sich insgesamt eine sehr inhomogene Verteilung der Energiedichte über die Kavitätsoberfläche.





Abb. 10 Bestromungsrichtung Mäander



Abb. 11 Simulierter Magnetfeldverlauf des mäanderförmigen Induktors, Darstellung der magnetischen Feldstärke [A/m]

Der Vorteil eines mäanderförmigen Induktors ist unter anderem:

- Einfacher Aufbau.
- > Einfache Anpassung auch an komplexe, flächige Konturen.



Einfache Realisierung unterschiedlich stark erwärmter Bereiche durch unterschiedlichen Abstand des Induktors zur Bauteiloberfläche.

Die Nachteile dieser Geometrie hingegen sind:

- Durch gegensinnige Bestromung benachbarter Leiter starke Konzentration des Magnetfeldes zwischen den Leitern.
- Geringster Wärmeeintrag aller vier untersuchten Induktorbauformen.
- Stark inhomogene Erwärmung der Bauteiloberfläche.
- Geringer Wirkungsgrad des Induktors.

Doppelmäander

Die Induktorbauform des Doppelmäanders kann die Nachteile des einfachen Mäanders teilweise beheben. Bei diesem Induktor liegen mittig jeweils zwei gleichsinnig bestromte Leiterbahnen nebeneinander (s. Abb. 12). Hierdurch wird die Konzentration des Magnetfeldes zwischen den Leitern verringert, was eine höhere Magnetfeldkonzentration in der Werkstückoberfläche und eine bessere Erwärmungsleistung zur Folge hat. Abb. 13 zeigt den mit ANSYS simulierten Verlauf des Magnetfeldes. Im Unterschied zu dem in Abb. 11 dargestellten Magnetfeldverlaufs des mäanderförmigen Induktors konzentrieren sich die Feldlinien nur zwischen jedem zweiten Leiterpaar. Zwischen den gleichsinnig bestromten Leitern wird das Magnetfeld in die Werkstückoberfläche verdrängt, was die Erwärmungsleistung im Vergleich zum einfachen Mäander verbessert. Dennoch weist auch dieser Entwurf eine sehr geringe Erwärmungsleistung auf. Die inhomogene Magnetfeldverteilung konnte gegenüber dem einfachen Mäander kaum verbessert werden.



Abb. 12 Bestromungsrichtung Doppelmäander





Abb. 13 Simulierter Magnetfeldverlauf des Doppelmäanders. Darstellung der magnetischen Feldstärke [A/m]

Die Vorteile des Doppelmäanders gegenüber der klassischen Mäanderform sind:

- Durch jeweils zwei gleichsinnig bestromte Leiter homogenere Temperaturverteilung als bei einfachem Mäander.
- Gute Anpassung der Induktorgeometrie an die Kavität möglich.

Die Nachteile hingegen sind:

- > Geringe, inhomogene Erwärmung der Kavitätsoberfläche.
- > Durch kreuzende Leiter komplexe Bauform.

Kastenspule

Bei diesem Entwurf wird eine "klassische Spule" allerdings in rechteckiger, kastenförmiger Gestalt verwendet, welche vor dem Werkstück positioniert wird (s. Abb. 14). Eine Anpassung des Induktors an die zu erwärmende Geometrie ist damit schwierig. Wie in Abb. 15 dargestellt, bildet dieser Induktor (simuliert als unendlich tiefe Kastenspule) ein sehr homogenes Magnetfeld über die gesamte Induktorfläche aus. Die entscheidenden Nachteile dieses Induktors sind jedoch, dass sich das Magnetfeld innerhalb der Spule konzentriert. Eine Hälfte des Magnetfeldes befindet sich innerhalb der Spule und steht für die Induktion nicht zur Verfügung. Die zweite Hälfte bildet außerhalb der Spule ein sehr großräumiges Feld mit relativ geringer Feldstärke aus. Wenn von einer rechteckigen Spule ausgegangen wird, kann nur ca. 1/4 des äußeren Magnetfeldes in die Kavitätsoberfläche eingekoppelt werden. Da-



mit ergibt sich eine geringe Feldnutzung (ca. 1/8 des gesamten Feldes) und somit eine geringe Erwärmungsleistung des Induktors. Die Erwärmungsleistung ist laut Simulation zwar besser als bei den mäanderförmigen Entwürfen, aber für die hier benötigten Temperaturgradienten immer noch zu gering.



Abb. 14 Bestromungsrichtung Kastenspule



Abb. 15 Simulierter Magnetfeldverlauf der Kastenspule. Darstellung des Magnetfeldes [A/m]



Der Kastenspulinduktor hat im Vergleich zu den beiden Mäanderformen folgende Vorteile:

Bessere Erwärmungsleistung als mäanderförmige Induktoren.

Nachteilig bei dieser Geometrie sind allerdings:

- Starke Feldkonzentration innerhalb der Spule, dadurch Nutzung eines geringen Anteils des Magnetfeldes von ca. 1/8.
- Großer Bauraum.
- > Anpassung an Kavitätsgeometrie schwer möglich.

Spirale

Als vierte und letzte Grundgeometrie wurde die ebene Spirale untersucht. Diese stellt einen ebenen, flächigen Induktor dar, welcher auch beim induktiven Härten von Blechen zum Einsatz kommt. Bei dieser Induktorbauform werden durch die gleichsinnige Betromungsrichtung benachbarter Leiter die Feldlinien in der Werkstückoberfläche konzentriert. Lediglich im Zentrum der Spule ergab die Simulation eine Konzentration der Feldlinien zwischen den gegensinnig bestromten Leiterbahnen, was zu einer stark verminderten Erwärmung des Werkstückes in diesem Bereich führt. Diese Induktorbauform weist die größte Erwärmungsleistung aller vier untersuchter Entwürfe auf.



Abb. 16 Bestromungsrichtung Spirale





Abb. 17 Simulierter Magnetfeldverlauf eines spiralförmigen Induktors [A/m]

Der spiralförmige Induktor bietet gegenüber allen bisher untersuchten Geometrieen folgende Vorteile:

- > Mit Abstand größte Erwärmungsleistung aller untersuchter Geometrieen.
- > Anpassung an die Kavitätsgeometrie möglich.
- > Größter Wirkungsgrad aller untersuchter Induktorentwürfe.

Einziger Nachteil ist:

> Sehr geringe Erwärmungsleistung im Zentrum.





Abb. 18 Vergleich des Temperaturverlaufs auf der Kavitätsoberfläche

Die simulativ untersuchten Induktorkonzepte wurden hinsichtlich ihres Wirkungsgrades, der Heizleistung sowie der Homogenität der Temperaturverteilung bewertet. Als Ergebnis dieser Voruntersuchungen erwies sich ein spiralförmiger Induktor aufgrund seines hohen Wirkungsgrades und der sehr guten Heizleistung als optimale Geometrie für die Anwendung in einem extern temperierten Werkzeug. In Abb. 18 ist der simulierte Temperaturverlauf der vier Grundgeometrieen dargestellt. Dabei zeigt sich deutlich, dass der ebene Spiralinduktor trotz der Temperatursenke im Zentrum die mit Abstand größte Erwärmungsleistung generiert.

Dieses Konzept wurde nun in eine an die Kavitätsgeometrie der Bipolarplatten angepasste Konstruktion eines Induktors überführt. Dabei wurde die Temperatursenke im Zentrum der Spirale konstruktiv in den für die Herstellung der Bipolarplatte unkritischen Bereich des Anschnitts verlegt. Damit war ein homogenes Aufheizen der gesamten Platte mit der kritischen Flowfieldstruktur möglich.





Abb. 19 CAD Modell des Induktors als Ergebnis der thermischen FEM Simulationen, bereits mit Anschlüssen für den Generator versehen

Parallel zur Konstruktion wurde ein dreidimensionales Simulationsmodell in Maxwell aufgebaut und anhand der durchgeführten Simulationen die Geometrie der Konstruktion weiter optimiert. Zusätzlich erfolgte eine Überprüfung der Ergebnisse in ANSYS Workbench. Beide Simulationen lieferten sowohl in der elektromagnetischen als auch in der thermischen Simulation sehr gute Übereinstimmungen. Ziel dieser Simulationen waren neben der Optimierung der Geometrie, die Ermittlung der für den Erwärmungsvorgang relevanten Parameter wie Frequenz, elektrische Leistung, Abstand Induktor-Zieloberfläche, Heizzeit sowie den Einfluss der Topografie der Zieloberfläche zu ermitteln und eine Abschätzung der benötigten Generatorleistung vorzunehmen. Als Grundlage für die Simulation wurde eine vereinfachte Kavitätsgeometrie mit einer gröberen Mikrostruktur auf der einen Hälfte der Bipolarplatte verwendet. Um die Rechenzeiten weiter zu reduzieren, wurde auf der zweiten Hälfte der Bipolarplatte eine unstrukturierte, rechteckige Fläche modelliert.





Abb. 20 Mit Maxwell simulierter Magnetfeldverlauf in der Zieloberfläche



Abb. 21 Berechneter Temperaturverlauf in der Kavitätsoberfläche, nach 5 sec Heizzeit



Abb. 20 zeigt den mit Maxwell simulierten Magnetfeldverlauf in der Kavitätsoberfläche, ein Vergleich mit dem in Abb. 21 dargestellten Temperaturverlauf zeigt, dass sich bereits aufgrund der magnetischen Simulation in begrenztem Maße Vorhersagen über den aus der thermischen Berechnung erhaltenen Temperaturverlauf machen lassen.

Die obige Abbildung zeigt das Ergebnis der thermischen Simulation nach einer Heizzeit von 5 sec. Ausgegangen wurde von einer Grundtemperatur von 60 °C (wie vom ZBT vorgegeben). Der Abstand des Induktors zur Werkzeugplatte wurde auf 5 mm festgelegt. Aus dieser Simulation lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

- > Ausreichende Temperaturverteilung im Bereich des Verteilers, Einschränkung im Filmanguss.
- > Keine Überhitzung im Bereich der Kavitätsränder.
- Gute Erwärmung im Bereich des Flowfields.
- > Ausreichend hohe Temperaturgradienten mit dem beschafften Generator erreichbar.
- > Zu erwartendes "Temperaturloch" im Zentrum der Spirale.
- > Noch nicht ausreichende Grundtemperatur mit der zunächst angenommenen Leistung.

Die ungleichmäßige Erwärmung der Bipolarplatte wird durch den asymmetrischen Aufbau des Induktors verursacht (s. Abb. 22). Die Rückführung der Leiterbahn hat trotz des relativ großen Abstandes zur Induktorfläche einen deutlichen Effekt auf die Ausbildung des Magnetfeldes. Abb. 23 zeigt einen Schnitt genau durch die Mitte des 3D-Modells. Durch die Rückführung der Leiterbahn kommt es zu einer Konzentration des Magnetfeldes oberhalb der Induktorfläche. Damit lässt sich die leicht asymmetrische Temperaturverteilung in der Zieloberfläche erklären.



Abb. 22 Durch HWG Inductoheat nach Vorgaben des IKFF gefertigter Induktor





Abb. 23 Mit ANSYS Workbench simulierter Magnetfeldverlauf des Induktors

Der Induktor wurde durch einen externen Dienstleister nach Vorgaben des IKFF gefertigt. Die Konstruktion und Anpassung des Koppelgetriebes zum Einbringen des Induktors in das geöffnete Werkzeug an die Spritzgussmaschine erfolgte am ZBT.

3.2.3 Fertigung und Test des Induktors

In weiteren Untersuchungen wurden Erwärmungsleistung und Temperaturverteilung des Induktors an einem eigens aufgebauten Prüfstand untersucht. Dabei zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Messung sowohl von Temperaturverteilung als auch von Maximaltemperatur in den kritischen Bereichen der Bipolarplatte. (s. Abb.24 und Abb. 25). Mit der vorhandenen Generatorleistung von 15 kW Hochfrequenz (100 kHz) wurden bei einer Heizzeit von 10 sec in den kritischen Bereichen Temperaturen von ca. 290 °C erreicht (Zielvorgabe ca. 350 °C). Mit dem zu beschaffenden Generator (Leistung 20 kW) waren noch höhere Heizraten zu erwarten.





Abb.24 Prüfstand zur Bestimmung der Oberflächentemperatur





3.3 Materialparameter des Werkzeugstahls

Parallel hierzu wurden mit Unterstützung wissenschaftlicher Hilfskräfte die magnetischen Kennwerte der für das Werkzeug in Frage kommenden Formenbaustähle am IKFF an einem eigens hierfür aufgebauten Messstand ermittelt. Diese Materialkennwerte dienten als Datengrundlage für die Simulationen.



Zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften des Formstahls 1.2343 als Basis für die FEM Simulationen in ANSYS und Maxwell wurden Proben mit der gleichen Fertigungsvorgeschichte wie die Kavitätsplatte, welche beim ZBT zum Einsatz kommt, untersucht:

- 1.2343 gehärtet auf 52 HRC +/-1,
- 2x angelassen
- ➤ gefräst
- Fa. Hasco Sonderanfertigung.

Diese Proben wurden an einem Prüfstand elektromagnetisch vermessen und die magnetische Neukurve jeweils einer gehärteten und einer ungehärteten Vergleichsprobe bei einer maximalen Stromstärke von 5 A bestimmt. Dies entspricht einer magnetischen Feldstärke von 5000 A/m (s. Abb. 26). Dabei zeigt sich eine deutliche Abnahme der Permeabilität μ_r =B/H des Stahls durch das Härten (s. Abb. 27), die in der Simulation berücksichtigt wurde. Diese Abnahme der magnetischen Permeabilität ist auf die Gefügeumwandlungen durch das Härten zurückzuführen. Als Konsequenz hieraus sollte ein Aufhärten der Kavitätsoberfläche oder anderweitige Gefügeumwandlungen beim Bearbeiten oder Aufheizen im Betrieb möglichst vermieden werden.



Abb. 26 Magnetische Neukurven des Formstahls 1.2343 gehärtet und ungehärtet



Abb. 27 Verlauf der magnetischen Permeabilität über der Feldstärke


In einer zweiten Messreihe wurde die Temperaturabhängigkeit der magnetischen Eigenschaften des Formstahls bestimmt. Hierzu wurde die Neukurve der gehärteten Probe bei unterschiedlichen Temperaturen in einem Bereich von 40 °C bis 150 °C bestimmt. Eine Messung der Neukurve bei noch höheren Temperaturen scheiterte wegen der Temperaturfestigkeit der Prüfspulen. Bei diesen Untersuchungen zeigte sich nur ein geringer Einfluss der Temperatur auf die magnetische Permeabilität (s. Abb. 28).



Abb. 28 Magnetische Neukurven in Abhängigkeit der Temperatur

Die aus diesen Messungen gewonnenen magnetischen Neukurven wurden in die Materialdatenbank der verwendeten FEM Programme ANSYS und Maxwell übernommen. Auf die Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Neukurve wurde wegen des geringen Einflusses verzichtet, um die Nichtlinearitäten gering und damit die Rechenzeiten möglichst kurz zu halten.

Zusammen mit den aus dem Datenblatt entnommenen thermischen Materialkennwerten kann so der verwendete Formstahl 1.2343 in den Simulationen nachgebildet werden.

3.4 Konstruktion und Fertigung Schnittstelle Induktor Koppelgetriebe

Konstruktion und Fertigung einer in 2 Richtungen verstellbaren und um 2 Achsen schwenkbaren Halterung als Schnittstelle zwischen Koppelgetriebe (Konstruktion und Fertigung durch ZBT) und des Induktors:





Abb. 29 Halterung für den Induktor

Die Halterung erlaubt durch mehrere Stellschrauben eine Feinjustierung des Induktors vor der Kavität. Die gegeneinander beweglichen Teile werden mit Tellerfederpakten verspannt, um die nötige Steifigkeit der Halterung sicherzustellen. Auf der Oberseite des Werkzeuges muss eine Zentrierleiste verschraubt werden, damit der Induktor bei jedem Einfahren in das Werkzeug die gleiche Position relativ zur Kavität hat und eine gleichbleibende Erwärmung der Kavität auch im Dauerbetrieb sichergestellt ist.

Die drei Streben wurden laut Absprache mit dem ZBT, unmittelbar vor Ort gefertigt, da sich die Länge der Streben nach der Position des Schlittens am Koppelgetriebe richtet. Auch die Lochmaske zur Verschraubung von Halterung und Kopplegetriebe wurden unmittelbar vor Ort hergestellt.

Das Koppelgetriebe wurde direkt vom ZBT nach Vorgaben des IKFF gefertigt, da das Koppelgetriebe an die Spritzgussmaschine angepasst werden muss. Von IKFF wurde ein kompletter Zeichnungssatz eines Koppelgetriebes bereitgestellt, welcher aus einem früheren Projekt des IKFF stammt.



Abb. 30 Koppelgetriebe



3.5 Versuche mit externem Induktor

Mitte Juni 2009 folgten einwöchige Versuchsreihen am ZBT zur experimentellen Untersuchung mit dem extern temperierten Werkzeug. Hierbei wurden verschiedene Parametervariationen getestet und deren Einfluss auf die Qualität der hergestellten Bipolarplatten untersucht.





Abb. 31 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

3.5.1 Prozessparameter

Zu den untersuchten Prozessparametern gehörten unter anderem Generatorleistung und Werkzeuggrundtemperatur. Ziel dieser Untersuchungen war eine Reduzierung des maximalen Einspritzdrucks bei gleichbleibender Spritzteilqualität.



Abb. 32 Versuchsaufbau mit Thermokamera zur Überwachung des Heizvorgangs



In der untenstehenden Tabelle sind beispielhaft einige der durchgeführten Versuchsreihen mit den zugehörigen Prozessparametern aufgeführt. In der ersten Zeile ist die Ausgangssituation dargestellt, in den Nachfolgenden Zeilen sind einige der durchgeführten Versuchsreihen aufgeführt.

Im Laufe der Untersuchungen gelang es, den maximalen Einspritzdruck um bis zu 1000 bar zu reduzieren, bei gleichbleibend guter Formfüllung und ohne die Zykluszeit wesentlich zu verlängern.

Versuch	Leistung	Heizzeit	Temperatur Kavität	Temperatur Anguss	Einspritzdruck	gefüllt/ nicht gefüllt
1	0 %; 0 kW	0 sec	75°C	150°C	3200 bar	Х
2	25 %; 5,4 kW	5 sec	95-140°c	150-175°C	2500 bar	Х
3	35 %; 7,6 kW	5 sec	140-153°C	186-222°C	2500 bar	Х
4	45 %; 9,8 kW	5 sec	165-167°C	191-246°C	2200 bar	Х
5	50 %; 10,9 kW	5 sec	145°C	220°C	2100 bar	Х
6	50 %; 10,9 kW	5 sec	150°C	220°C	2000 bar	-

Abb. 33 Beispiel einer Versuchsreihe

Darüber hinaus konnten die Ergebnisse der transient-thermischen Simulationen mittels thermografischer Aufnahmen überprüft und bestätigt werden.



Abb. 34 Bipolarplatte als Versuchsobjekt

3.5.2 Weitere Versuchsauswertungen

Am IKFF wurde versucht, mit Hilfe des Institutseigenen REM den Einfluss der induktiven Zusatztemperierung auf die Füllstoffverteilung innerhalb der Bipolarplatte zu untersuchen. Leider brachten die Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop kaum verwertbare Ergebnisse. Der Kontrast zwischen dem Matrixmaterial PP und dem Füllstoff Graphit war erst bei sehr hohen Beschleunigungs-



spannungen groß genug, um die beiden Materialien zuverlässig unterscheiden zu können (s. Abb. 35 und Abb. 36).



Abb. 35 REM Aufnahme einer Bruchkante



Abb. 36 REM Aufnahme Schliffbild



4. Konstruktion und Aufbau des Spritzgießwerkzeuges mit integriertem Induktor

4.1 Spritzgießwerkzeug

Die Herstellung von Bipolarplatten erfolgt bisher mit einem Einkavitäten-Spritzgießwerkzeug. Basierend auf den Parametern der im Jahr 2004 vorhandenen Maschine, wurde das Werkzeug mit einer Kantenlänge von 246 mm x 246 mm sowie einer Einbauhöhe von 320 mm ausgeführt. Die Schmelzmasse gelangt über einen sehr breiten Bandanguss in das Formnest, was dazu führt, dass der Einspritzpunkt deutlich außerhalb der Plattengeometrie liegt und somit nicht zentral im Werkzeug. Aus diesem Grund wird die einzuspritzende Schmelzmasse über ein Heißkanalsystem, bestehend aus einem Verteilerblock und einer beheizbaren Düse, zum Einspritzpunkt umgelenkt. Zum Abformen der Gasführungsbohrungen wurden einsetzbare Kerne verwendet, die über die gesamte Höhe der Kavität gehen.

Für weitergehende Entwicklungen in der spritzgießtechnischen Verarbeitung hochgefüllter Compounds wurde eine leistungsfähigere Spritzgießmaschine der Firma Krauss Maffei angeschafft. Bei der Arbeit mit dem Spritzgießwerkzeug in der neuen Maschine wurden unterschiedliche Probleme festgestellt. Diese lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

> Die kleine Ausführung des Werkzeuges führt, aufgrund der großen Zentrierbohrungen der Maschinenaufspannplatten und der hohen Schließkräfte, zu einer Durchbiegung des Werkzeuges, was die Maßhaltigkeit des Spritzteils beeinträchtigt. Zudem führt die kleine Ausführung dazu, dass die notwendige Schließkraft von 3500 kN nicht eingesetzt werden kann, was eine Gratbildung zur Folge hat.

Damit die Mindesteinbauhöhe der Maschine von 480 mm erreicht wird, werden zwei Verlängerungsplatten mit jeweils 80 mm Dicke an den Maschinenaufspannplatten eingebaut. Diese verlängern den Schmelzmasseweg und führen zu zusätzlichen Druck- und Temperaturverlusten.

In dem Heißkanalsystem durchströmt die Schmelzmasse über zwei rechtwinklige Umlenkungen, eine Länge von 320 mm (s. Abb. 37), was zu einem sehr hohen Druckverlust führt.

Im Bereich der Kerne sind die Auswerferstifte ungleichmäßig positioniert. Insbesondere an den in Abb. 38 markierten Stellen befinden sich keine Stifte. Dadurch verbiegt sich die Bipolarplatte beim Auswerfen, wodurch Mikrorisse am Spritzteil entstehen.







Abb. 37: Fließweg der Schmelzmasse im Heißkanal



Abb. 38: Positionen der Auswerfer

4.1.1 Bestimmung der Werkzeuggröße

Die Größe des Werkzeuges wird durch die Maße der Spritzgießmaschine bestimmt. Die maximale Aufspannfläche wird durch die Holmabstände vorgegeben, der Mindestöffnungshub ergibt die Mindesteinbauhöhe des Werkzeuges. Die verwendete Spritzgießmaschine Krauss Maffei KM 500 hat, wie in Abb. 39 und Abb. 40 dargestellt, einen Holmabstand von 900 mm x 800 mm. Die Mindestwerkzeuggröße ist bei einem Durchmesser von 560 mm festgelegt. Bei der Einbauhöhe des Werkzeuges ist ein Mindestmaß von 480 mm einzuhalten.





Abb. 39: Krauss-Maffei KM500 Maßskizze (Aufspannfläche) [11]



Abb. 40: Krauss-Maffei KM500 Maßskizze (Öffnungshub) [11]

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurde ein Normalwerkzeug mit den Kantenlängen von 596 mm x 596 mm und einer Einbauhöhe von 488 mm aus einem Normalienkatalog zusammengestellt. Die Düsenseite des Werkzeuges wurde mit einer Gesamtdicke von 140mm ausgewählt, um einen kurzen Schmelzmasseweg zu erhalten und somit die Druck- und Temperaturverluste zu minimieren. Die folgende Abbildung zeigt den Grundaufbau dieses Spritzgießwerkzeuges.



Abb. 41: Werkzeuggrundaufbau



4.1.2 Zentrierung und Führung

Das Werkzeug wird über Zentrierringe in den Aufspannplatten zentriert. Da eine Führung durch die Holme der Maschine allein nicht ausreicht, besitzt das Werkzeug eine innere Führung, die einerseits das Verdrehen der Formplatten verhindert und andererseits die Werkzeugseiten mit der notwendigen Präzision ausrichtet. Die Führungseinheit besteht, wie in Abb. 42 dargestellt, aus Bolzen, die beim Schließen des Werkzeuges in die genau passenden Buchsen der anderen Werkzeughälfte hineingleiten. Die Führungseinheit übernimmt zusammen mit den Zentrierhülsen zusätzlich die Aufgabe der Verstiftung der einzelnen Werkzeugplatten. [12]



Abb. 42: Führungseinheit

4.1.3 Formeinsätze

Das Werkzeug wurde mit zwei Kavitäten konzipiert, die jeweils in entsprechende Formeinsätze eingearbeitet wurden. Grund hierfür ist, dass im Falle einer Beschädigung der Kavität und einer Änderung der Form oder Größe der Bipolarplatte ein schneller und einfacher Austausch der Formeinsätze ermöglicht wird. Zudem war dies notwendig, um den Induktor einbauen und die Temperierungskanäle an den Funktionsträger des Formeinsatzes (Auswerfer und Induktornuten) anpassen zu können.

Die Umleitung der Schmelzmasse in der jeweiligen Kavität erfolgt über einen Verteilerkanal in Form zweier symmetrisch angeordneter Bandangüsse. Die Kavitäten und der Verteilerkanal lassen sich durch das Einbauen von drei Formeinsätzen zusammenstellen. Dies ermöglicht, durch den Tausch des Anguss-Einsatzes eine Kavität zu sperren (s. Abb. 43), wodurch ein direkter Vergleich mit dem bisherigen Werkzeug im Hinblick auf die Prozessparameter vorgenommen werden kann.





Abb. 43: Formeinsätze (links 2 Kavitäten, rechts 1 Kavität)

Die Formeinsätze sind mit einer Übergangspassung von 0 bis 0,02 mm in die Formplattentasche eingebaut, wodurch deren genaue Positionierung gewährleistet wird.

Bei dem bisherigen Spritzgießprozess trat die Problematik auf, dass die Bipolarplatten an den Kernen durch Schwindung aufschrumpfen und dort anhaften. Dies führte beim Entformen zu Rissbildungen im Bereich der Gasführungsbohrungen. Um die Haftkräfte zu minimieren, wurden die Kerne mit einer Entformungsschräge von 3° versehen. Zusätzlich wurden die Kerne an der Trennebene geteilt, um die Vergrößerung der Bohrungen klein zu halten. Vorteilhaft ist hierbei auch, dass sich im Falle einer Undichtigkeit der beiden Kernhälften der Grat in der Mitte der Bohrungen bildet, wodurch seine Beseitigung vereinfacht wird. Da der Induktor direkt unter den Kernen verläuft, wurden diese in den Formeinsatz eingearbeitet.

Um eine bessere Dichtwirkung der beiden Werkzeughälften unter der Schließkraft zu erreichen, wurden die Formeinsätze der beweglichen Seite mit 0,5 mm über die Trennfläche des Werkzeugs stehend eingebaut (s. Abb. 44).





Zum Auswerfen der Bipolarplatten kommen 22 Auswerferstifte (s. Abb. 45) pro Platte und vier für den Anguss zum Einsatz. Diese hohe Anzahl ist bedingt durch das sehr spröde und im Entformungszeit-



punkt noch nicht ganz verfestigte Material. Im Formnest wurden die Auswerferstifte rund um das Flowfield ausgelegt, um dieses nicht zu beschädigen und um die Entformungskräfte gleichmäßig auf das Spritzgießteil zu übertragen. Besonders die Kerne haben bei dem bisherigen Werkzeug große Entformungswiderstände aufgewiesen, die zur Verformung der Platte führten. Aus diesem Grund wurden in diesen Bereichen auch Auswerfer platziert (s. Abb. 45).



Abb. 45: Auswerferpositionen

4.1.4 Entformung der Bipolarplatte

Ein großer Nachteil der Auswerferstifte ist, dass sie am Spritzteil sichtbare Markierungen verursachen. Damit keine großen Vertiefungen an der Oberfläche der Bipolarplatte entstehen, wurden die Auswerferstifte in ihrem Längenmaß um 0,1 mm kürzer eingebaut (s. Abb. 46), wodurch Zapfenerhöhungen entstehen. Diese sind jedoch gewollt, um bei der notwendigen mechanischen Nachbearbeitung den Verlust der Flowfield-Kontur zu minimieren.



Abb. 46: Auswerfereinbau

Der mit der Schmelzmasse in die Kavität eingebrachte Dampf entweicht über die Auswerferbohrungen und führt zu starken Materialverkokungen an den Auswerfern (s. Abb. 47). Bedingt durch die, im Ver-



gleich zum Entformungsweg, langen Führungsbohrungen wird diese Verkokung nicht abgetragen. Dadurch entstehen erhöhte Reibungen, die zu Führungsfraß führen, so dass erhöhte Wartungsintervalle eingehalten werden müssen.



Abb. 47: Materialverkokungen an den Auswerfern

Um eine Selbstreinigung der Auswerfer bei einer gleichbleibend guten Führung zu erhalten, wurden kurze Führungsbohrungen eingesetzt. Da zum Entformen der Bipolarplatten Auswerferstifte mit den Durchmessern 3 und 4 mm eingesetzt sind, wurde eine Führungslänge von 5 mm ausgewählt. Allerdings besteht bei dieser kurzen Führungslänge, im Vergleich zu der Länge des Auswerfers mit 253 mm, die Gefahr der Ausknickung. Um dies zu verhindern, wurde die Zwischenplatte (s. Abb. 48) vor den Distanzleisten eingebaut. Dies führte zu einer Verkürzung der Stifte um 66 mm.



Abb. 48: Neuaufbau des Werkzeuges

Des Weiteren wurden Führungseinheiten eingebaut (s. Abb. 49), die ein Verkanten der Auswerferplatten verhindern. Die Führungseinheiten bestehen aus Bolzen, die beim Entformen in den genau passenden Buchsen gleiten. Die hier verwendeten Bolzen sind ein neues Produkt, das von der Firma Meusburger angeboten wird. Sie haben zusätzlich zu der Führungsfunktion auch eine stützende Funktion. Diese Kombination spart Platz im Auswerferraum ein und erhöht die Stabilität des Werkzeuges.



Die Stützbolzen werden in einer Tasche von 4 mm mit der Paarung H7/f6 in der Zwischenplatte zentriert und angeschraubt. Dadurch lassen sich im Gegensatz zu Standard- Führungsbolzen zusätzliche Bohrungen einsparen, die die Steifigkeit der Platten beeinträchtigen. Als Gleitlager wurden wartungsfreie Gleitelemente mit integrierten Festschmierstoffen aus ölgetränktem Graphit verwendet. Diese eignen sich aufgrund der eingebauten Selbstschmierung des Materials besonders gut für die Führung und haben einen sehr geringen Einlaufverschleiß.





Mit Beginn eines neuen Spritzgießvorgangs muss sichergestellt sein, dass die Auswerferstifte zurückgeschoben sind, da diese sonst beim Schließen des Werkzeuges die gegenüberliegende Kavität beschädigen können. Um dies im Falle eines Versagens der Auswerferhydraulik zu gewährleisten, wurde ein Zwangsrückdrücksystem bestehend aus vier Rückdrückstiften mit einem Durchmesser von 10 mm eingebaut, die in den Auswerferplatten befestigt sind (s. Abb. 50). Beim Schließen des Werkzeuges werden sie durch die Formplatte der Düsenseite zurückgeschoben und drücken dadurch das Auswerferpaket in die ursprüngliche Lage zurück. [12,13]



Abb. 50: Zwangsrückdrücksystem



4.1.5 Auslegung der Stützbolzen

Bei dem konstruierten Werkzeug mit interner induktiver Temperierung handelt es sich um ein Versuchswerkzeug. Da es sich um völliges Neuland in der spritzgießtechnischen Verarbeitung hochgefüllter Graphit-Compounds handelt, ist nicht vorhersehbar, wie sich die Temperierung auf die Druckreduktion auswirkt. Aus diesem Grund und um späteren Versuchen zur Herstellung auch größerer Bipolarplatten nicht zu beeinträchtigen, musste das Werkzeug stabil genug aufgebaut werden.

Eine große Schwachstelle des Spritzgießwerkzeuges stellt der Ausstoßerraum dar, da hier die Schließ- und Zuhaltekräfte wirkungslos sind (s. Abb. 51). Dies führt bei dem hohen Einspritzdruck von 3500 bar zum Durchbiegen der Zwischenplatte, was auf die Maßgenauigkeit des Spritzteils Auswirkungen hat (s. Abb. 52). Damit es nicht zu dieser Durchbiegung kommt, wird die Zwischenplatte mit 12 Stützbolzen versehen, die mit einem Übermaß von 0,1 mm gegenüber den Stützleisten eingebaut werden (s. Abb. 53).



Abb. 51 Wirkungsbereich der Schließkraft (Kreuzschraffierter Bereich) [13]



Abb. 52 Plattendurchbiegung [14]





Abb. 53: Position der Stützbolzen

4.1.6 Auslegung des Angusssystems und Entlüftung

Bedingt durch die schlechten Fließeigenschaften des hochgefüllten Graphit-Compounds, ist es notwendig eine möglichst hohe Temperatur während des Einspritzvorgangs zu halten. Daher sollte die einzuspritzende Formmasse ursprünglich über eine offene Heisskanaldüse in den Verteilerkanal geleitet werden. Die Düse muss eine hohe Anzahl an Anforderungen erfüllen. Die wichtigsten davon sind in folgenden Punkten zusammengefasst:

- Basierend auf den gesammelten Erfahrungen mit dem bisherigen Spritzgießwerkzeug, sollte der Durchmesser des Angusskanals mindestens 8 mm groß sein. um die Druckverluste zu minimieren, werden jedoch 10 oder 12 mm bevorzugt
- Die Düse sollte einen austauschbaren Einsatz besitzen, um verschiedene Einspritzöffnungen testen zu können.
- Die Düse sollte bis zu einem Spitzendruck von 3500 bar belastbar sein und einer Massetemperatur von 400 °C standhalten.

Bei den hierzu durchgeführten Recherchen wurde deutlich, dass diese Anforderungen mit den in Normalien angebotenen Düsen nicht erfüllt werden können. Diese sind nur bis zu einem maximalen Druck von 2000 bar zugelassen. Um eine Lösung für diese Problematik zu finden, wurden mehrere Heißkanalsystem-Anbieter kontaktiert und nach der Realisierbarkeit dieser hohen Anforderung gefragt. Lediglich vier Anbieter sahen die Möglichkeit eine geeignete Düse für die hohen Anforderungen zur Verarbeitung des Graphit-Compounds herstellen zu können. Es wurde eine Düse mit einer Länge von über 200 mm und einem Durchmesser von 110 mm angeboten, die aufgrund ihrer Überdimensionierung nicht in das Werkzeug integrierbar war. Die anderen Angebote beinhalteten eine passende Düse, die durch eine verstärkte Ausführung des Düsenkörpers dem hohen Druck standhalten sollte. Jedoch konnte hierfür keine Garantie gewährleistet werden.



Aufgrund der damit verbundenen hohen Unsicherheit wurde diese Idee nicht weiterverfolgt und stattdessen eine sicherere Lösung gewählt, bei der die Maschinendüse in das Spritzgießwerkzeug eintaucht. Dadurch lassen sich der Schmelzmasseweg im Werkzeug kürzen und die Druck- und Temperaturverluste minimieren.

Untersuchungen am ZBT ergaben, dass die Maschinendüse der Krauss Maffei KM 500 einen Eintauchweg von 80 mm hat. Daraufhin wurde die Düsenseite des Werkzeugs angepasst, um das Eintauchen der Düse zu ermöglichen. Es wurden an der Formplatte, der Aufspannplatte und dem Zentrierring Aussparungen geschaffen. Diese sind größer als für die Düse benötigt, so dass sie keinen direkten Kontakt zu den Werkzeugplatten hat. Wie in Abb. 54 dargestellt, liegt die Düse nur an der Angussbuchse auf, um eine Erwärmung des Werkzeugs bzw. eine Abkühlung der Düse zu verhindern.



Abb. 54: Werkzeugaussparung für die Maschinendüse

Die Schmelzmasse wird von der Maschinendüse über einen Angusskegel, der in einer Angussbuchse eingearbeitet ist, an den Verteiler übergeben.

Die Angussbuchsen werden in verschiedenen Dimensionen als Normalien angeboten, wobei die folgenden Regeln bei der Auswahl zu beachten sind: [12]

- Der Radius der Angussbuchsenkalotte, in die die Düse mit ihrer Spitze eintaucht, muss größer als derjenige der Düsenspitze sein, wodurch die Kontaktfläche verringert, die Flächenpressung erhöht und Hinterschnitten vorgebeugt wird.
- Die Düsenbohrung muss kleiner sein als diejenige der Angussbuchse, um eine einwandfreie
 Dichtung zu gewährleisten.
- Die Bohrung der Angussbuchse muss konisch sein (1 bis 1,5° pro Seite), damit der Zapfen beim Öffnen des Werkzeugs aus der Bohrung gezogen werden kann.

Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurde eine Angussbuchse mit einem Bohrungsdurchmesser von 6,5 mm und einem Kalottenradius von 40 mm ausgewählt. Die konische Bohrung hat einen Öffnungswinkel von 1,3°. Um ein Verdrehen der Angussbuchse zu verhindern, wurde sie mit einem Zylinderstift in der Formplatte verstiftet. Wie bei der Maschinendüse wurde hier auch ein Einbauspalt eingearbeitet, damit es nicht zu einem großen Wärmeaustausch zwischen der Angussbuchse und dem Werkzeug kommt und somit zu einer frühzeitigen Erstarrung der Angusskegel (s. Abb. 55). Dies hat zusätzlich



den Vorteil, dass aufgrund der kleinen Führung von 5 mm die Montage und Demontage der Angussbuchse erleichtert wird.



Abb. 55: Einbau der Angussbuchse

Um ein gleichmäßiges Füllen des gesamten Querschnitts der Bipolarplatten zu erreichen, wird ein Bandanguss verwendet. Dieser besteht aus einem langgestreckten Verteilerkanal, der über einen Anschnitt mit dem Formnest verbunden ist. Die aus der Spritzgießeinheit einströmende Schmelzmasse gelangt zuerst in den Verteilerkanal. Da der Anschnitt einen engen Querschnitt besitzt, erzeugt er beim Werkzeugfüllvorgang eine Drosselwirkung. Dadurch füllt sich der Verteilerkanal zuerst mit der Formmasse, die dann gleichmäßig in das Formnest einfließt. [12]



Abb. 56: Bandanguss mit rundem Verteilerkanal [15]

Üblicherweise wird bei der Kunststoffverarbeitung ein Verteilerkanal mit einem runden Querschnitt benutzt (s. Abb. 56). Um die Fließwiderstände möglichst gering zu halten und eine bessere Qualität der Bipolarplatten zu erreichen, wurde bisher ein sehr breiter dreieckiger Anguss verwendet, der sich nahezu über die gesamte Länge der Platte erstreckt und eine Dicke von 5 mm hat (s. Abb. 57).





Abb. 57: Ausführung des bisherigen Angusses

In einem parallel laufenden Projekt konnte der Verteilerkanal mit Hilfe von durchgeführten Simulationen und Testversuchen verkleinert werden, ohne dabei die Fließlänge zu beeinträchtigen. Die Änderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- > Der Verteilerkanal wurde schmaler und 2 mm dünner konzipiert.
- > Der Abstand zwischen dem Angusskegel und dem Formnest wurde auf 20 mm gekürzt.

Diese Ergebnisse konnten nur bis zu einem gewissen Punkt auf die Konstruktion übertragen werden (s. Abb. 58). Da die Temperierbohrungen in der Formplatte bereits gefertigt waren, konnte die Breite des Verteilers nicht mehr verändert werden. Jedoch wurde bei der neuen Angussgeometrie eine Materialeinsparrung von 30% erzielt.



Abb. 58: Ausführung des neuen Angusses

Beim Spritzgießvorgang muss die in der Kavität befindliche Luft durch die eintretende Schmelze verdrängt werden können, da es sonst zu einer unvollständigen Formfüllung kommen könnte. Darüber hinaus können, aufgrund der Überhitzung der in der Kavität verdichteten Luft, örtliche Materialverbrennungen am Spritzteil entstehen (Dieseleffekt). Dabei kann sich ein korrosiv wirkender Formbelag bilden, der einerseits eine ständige Reinigung der Kavität erforderlich macht und somit einen automatischen Prozess beeinträchtigt, und anderseits, aufgrund von Korrosion und Abrasion, zu einer Schädigung der Kavitätsoberfläche führt. [12]

Besonders die hohe Dichtwirkung, aufgrund der überstehend eingebauten Formeinsätze, erschwert die Entlüftung. Damit eine gute Führung der Auswerfer im Werkzeug garantiert werden kann, werden sie in den Aufnahmebohrungen mit einer Spielpassung H7/g6 eingebaut. Dies hat zwangsläufig zur



Folge, dass die in der Kavität befindliche Luft über die Auswerferstifte entweicht, was zu den bereits erwähnten Ablagerungen führt. Um diese Problematik zu reduzieren und gleichzeitig eine bessere Entlüftung zu erzielen, wurden zusätzlich Entlüftungskanäle in der Werkzeugtrennebene eingearbeitet (s. Abb. 59). Die Luft kann beim Einspritzvorgang über einen Entlüftungsspalt, der entlang der Kavität verläuft, in einen Entlüftungskanal und dann aus dem Werkzeug entweichen. Die Größe des Entlüftungsspalts ist abhängig von den Fließeigenschaften der Schmelze. In der Regel wird ein Spalt zwischen 0,01 und 0,03 mm eingearbeitet [12]. Die Dimensionen der hier eingearbeiteten Kanäle sind in Abb. 60 dargestellt.



Abb. 59 Entlüftungskanäle Abbildung



Abb. 60 Dimensionen der Entlüftungskanäle

4.1.7 Werkzeugwärmedämmung

Bei der Verarbeitung von thermisch leitfähigen Compounds ist es notwendig, das Werkzeug schnell auf eine hohe Temperatur zu erhitzen und sie während des gesamten Füllvorgangs möglichst konstant zu halten, um eine Erstarrung der Schmelzmasse zu verhindern. Allerdings entstehen bei einem direkten Kontakt zwischen dem Werkzeug und den Aufspannplatten der Schließeinheit hohe Wärmeverluste, die zu einer ungleichmäßigen Wärmeverteilung im Werkzeug führen. Weiterhin bewirkt diese Wärmeübertragung eine große Wärmeausdehnung an den Maschinenaufspannplatten, die auf der beweglichen Maschinenseite die Reibung zwischen den Gleitlagern und den Führungsholmen erheblich erhöht. Die entstehende Reibung führt zu einem erhöhten Verschleiß und damit zu einer Verschlechterung der gesamten Werkzeugführung. [13]

Um diesen Wärmeübergang zu unterbinden, wurden Isolierplatten aus einem glasfaserverstärkten Hochtemperatur-Polymer an den Werkzeugsaufspannplatten befestigt. Der Aufbau dieser Isolierplatten ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Es wurden Platten mit 8mm Dicke genutzt.





Abb. 61: Isolierplatten- Aufbau

Aufgrund der in der beweglichen Seite des Werkzeugs befindlichen Hohlräume, wie dem Ausstoßerraum, verliert das Werkzeug viel Wärme durch Abstrahlung an die Umgebung. Um diese Wärmeverluste zu minimieren, wurde diese Werkzeugseite mit Wärmedämmplatten (gelbe Platten in Abb. 62) umhüllt.



Abb. 62: Wärmeisolierung an der Auswerferseite

4.2 Auslegung von Induktor und Temperierung

Nach der Festelegung und dem konstruktiven Aufbau des Grundwerkzeuges wurden die Daten an dem IKFF geschickt und die notwendigen Simulationen durchgeführt sowie die Geometrie des Induktors ausgelegt.



4.2.1 Auslegung des integrierten Induktors

Da das Werkzeug zwei Kavitäten besitzt, kam für jede ein einseitiger Flächeninduktor zum Einsatz, die parallel zueinander geschaltet werden. Der Induktor wurde in einer mäanderförmigen Anordnung ausgeführt und hat einen quadratischen Querschnitt mit einer Kantenlänge von 6 mm und einer Wandstärke von 2 mm. Die Herstellung des Induktors erfolgt modular aus mehreren Kupferhohlprofilen, die durch Hartlöten verbunden sind. Der Angussbereich wird nicht induktiv temperiert, da in diesem Bereich sehr geringe Fließwiderstände der Schmelzmasse herrschen. Die Daten und Erkenntnisse aus den Versuchen mit dem externen System konnten nur in sehr begrenztem Umfang auf das integrierte induktive System übertragen werden. Da beim integrierten System der Induktor vollständig vom Metall umgeben ist, herrschen grundsätzlich andere magnetische Bedingungen. So hat beispielsweise die Induktorgeometrie, welche beim externen System von entscheidender Bedeutung für den Wirkungsgrad und die Temperaturverteilung an der Oberfläche ist, beim integrierten System keinen so wesentlichen Einfluss. Hier wurde deshalb ein mäanderförmiger Induktor gewählt.

Bis zu einem gewissen Grad übernommen werden konnten hingegen die Ergebnisse aus den Paramtervariationen von Frequenz, Abstand und elektrischer Leistung sowie die grundlegende Vorgehensweise beim Aufbau der Simulationsmodelle und der Vernetzung.

Für die simulative Auslegung des vollständig integrierten induktiven Systems wurden wiederum dreidimensionale Modelle in ANSYS Workbench und Maxwell aufgebaut und entsprechende elektromagnetische und thermische Simulationen und Parametervariationen durchgeführt. Wie schon zuvor beim externen Induktor wurden Ergebnisse aus den Simulationen unmittelbar in die Konstruktion des Werkzeuges übernommen und erneute Simulationen mit der veränderten Geometrie durchgeführt. Dabei konnte auf die am IKFF vorhandene Erfahrung bei der simulativen Auslegung von Spritzgusswerkzeugen mit intergrierter induktiver Beheizung zurückgegriffen werden.





Abb. 63 Ergebnisse der simulierten Erwärmung eines Werkzeuges mit integriertem Induktor

Aus den Versuchsreihen mit dem externen Induktor ergab sich eine zusätzliche Anforderung an das Erwärmungsprofil des Induktors. Da sich in den Versuchen mit dem externen Induktor gezeigt hatte, dass sich hinter den angussfernen Kernen trotz der Zusatztemperierung Bindenähte bilden können, sollte dieser Bereich gezielt höher beheizt werden, als der angussnahe. Deshalb wurde ein asymmetrischer Induktor zunächst simuliert und anschließend konstruiert.

Simuliert wurde anhand eines zweidimensionalen Schnitts quer durch den Kavitätseinsatz (s. Abb. 64). Abb. 63 zeigt zunächst eine erste symmetrische Induktorversion für zwei Kavitäten. Im Weiteren soll jedoch nur noch auf die letztendlich verwendete asymmetrische Ausführung getrennt je Kavität eingegangen werden. Anhand dieser Simulationen konnte die Induktorgeometrie und die Position der Kühlkanäle innerhalb des Einsatzes angepasst werden.





Abb. 64 Zweidimensionale thermische Simulation des Kavitätseinsatzes mit asymmetrischem Induktor

Die Ergebnisse aus der simulativen Auslegung wurden direkt in die Konstruktion der Kavitätseinsätze und des Induktors umgesetzt. Das Erwärmungsverhalten des Kavitätseinsatz wurde in Voruntersuchungen außerhalb des Werkzeuges charakterisiert und die Thermographieaufnahmen wurden mit den Simulationsergebnissen abgeglichen. Dabei zeigte sich der in der Simulation vorhergesagte Temperaturgradient über die Kavität (s. Abb. 66).



Abb. 65 Kavitätseinsatz mit asymmetrischem Induktor





Abb. 66 Heizprofil des asymmetrischen Induktors



Abb. 67 Vergleich der Kühlzeiten an einem Demonstratorbaurteil

Zusätzlich zur Erwärmung des Werkzeugs wurde ein alternatives Kühlkonzept der Kühlung entwickelt und untersucht. Die Grundidee ist die permanente Innenkühlung des Induktors, welche von Generator zur Verfügung gestellt wird, zur Werkzeugkühlung zu nutzen. Dabei wird der elektrisch und thermisch isolierende Luftspalt zwischen Induktor und Werkzeug mit einer thermisch sehr gut leitenden Keramik fest im Werkzeug vergossen. Durch diese thermische Kontaktierung ist es nun möglich, die über die Induktion in das Werkzeug eingebrachte Wärme über die Induktorinnenkühlung wieder abzuführen. Der Induktor wird in seiner Funktionalität vom reinen Heiz- zum vollständigen Temperierelement erweitert. Dieses Konzept wurde anhand eines einfachen Demonstrators untersucht (s. Abb. 67).



4.2.2 Integration in das Werkzeug

Die Induktoren wurden zusammen mit den Temperierbohrungen in die Formplatte eingebaut (s. Abb. 68). Durch diese erwärmt sich zuerst die Formplatte und anschließend durch Wärmeleitung der Formeinsatz. Der Induktor wird mit einer Keramik-Schicht umhüllt und in den Nuten festgeklemmt. Dadurch wird seine genaue Positionierung bei einer gleichzeitigen elektrischen Isolation gewährleistet.



Abb. 68: Aufbau des Induktors und der Temperierung (Entwurf 1)

Dieser Aufbau beinhaltete die folgenden Probleme:

- > Der Übergang zwischen der Formplatte und den Formeinsätzen beeinträchtigt die Temperierung und führt zu Temperaturverlusten.
- Der Kühlkanaldurchmesser von 6 mm ist nicht ausreichend, um die gesamte Wärme von der Kavität abzuführen, so dass es zu einer langsamen Erstarrung der Schmelze kommen kann und somit zu langen Zykluszeiten.
- Die Abstände zwischen den Temperierbohrungen und den Auswerferbohrungen oder Induktornuten sind sehr klein (zwischen 0,3 mm und 1 mm), wodurch sich die Fertigung dieser Bohrungen als sehr problematisch gestaltet.

Unter dem Gesichtspunkt, einen größtmöglichen Wirkungsgrad bei der Temperierung zu gewährleisten, wurden die Induktornuten und die Temperierbohrungen in die Formeinsätze nochmals versetzt (s. Abb. 69).



Abb. 69: Aufbau des Induktors und der Temperierung (Entwurf 2)

Da der Induktor fest in den Nuten eingebaut ist, wurden die Abdeckungen auf die Teilungsebene verlegt (s. Abb. 70). Dadurch wird der Induktor zuerst in dem Formeinsatz positioniert und dann zusammen mit diesem in das Werkzeug eingebaut.



Abb. 70: Aufbau der Induktor-Abdeckung

Es wurde bereits erwähnt, dass durch die Integration der Induktorspule nicht nur die Kavität erwärmt wird, sondern auch alle in unmittelbarer Nähe befindlichen elektrisch und magnetisch leitfähigen Teile des Werkzeugs. Aus diesem Grund erfordert die Beschränkung der Erwärmung in den Formeinsätzen eine Abschirmung des Magnetfelds zu den äußeren Elementen des Werkzeugs. Um dies zu gewährleisten, wurde der Induktor, wie die nachfolgende Abbildung zeigt, mit Feldkonzentratoren aus Aluminium umhüllt.





Abb. 71: Abschirmung des Induktors in der Formplatte

Im Bereich unter den Formeinsätzen können aufgrund der hohen Schließkräfte keine Konzentratoren eingebaut werden. Die Abschirmung erfolgt über einen großen Abstand zwischen dem Induktor und der Formplatte (s. Abb. 72).



Abb. 72: Abschirmung des Induktors im Bereich des Formeinsatzes

4.2.3 Auslegung der Temperierung

Bei der Auslegung der Temperierbohrungen ist es notwendig, dafür zu sorgen, dass die Wärme aus der mit Formmasse gefüllten Kavität schnell und gleichmäßig abgeführt wird, da sonst Verzugserscheinungen oder sogar Rissbildungen am Spritzteil entstehen. Zudem führt eine nicht ausreichende Kühlung zu langen Abkühlzeiten (s. Abb. 73).



Abb. 73: Temperierbohrungsabstände zur gleichmäßigen Wärmeabfuhr [13]



Um eine gleichmäßige Formnestwandtemperatur durch eine gleichmäßige Wärmeabfuhr zu gewährleisten, sind neben der Bohrungsgröße auch die Bohrungsabstände zu der Kavität und die Abstände untereinander sehr wichtig. Diese sind, wie Tabelle 1 zeigt, von der Spritzteilwandstärke abhängig. Mit zunehmender Wanddicke muss auch eine zunehmende Wärmemenge aus der Kavität abgeführt werden. [13]

Spritzteilwanddicke s in mm	Abstand c in mm	Abstand b in mm	Kanaldurchmesser d _⊺ in mm
1 - 2	10 - 20	12 - 16	6 - 8
2 - 4	20 - 25	16 - 22	8 - 10
4 - 6	25 - 32	22 - 28	10 - 12

Tabelle 1: Temperierbohrungsgrößen im Verhältnis zur Spritzteilwanddicke [13]

Entsprechend dieser Tabelle war die Einbringung größerer Temperierbohrungen mit einem Kanaldurchmesser von 8 mm erforderlich, damit der Druckabfall gering bleibt. Allerdings konnte dieses Maß bei den Bohrungen in den mittleren Bereichen der Formeinsätze, aufgrund von geringer Wandstärke zwischen Induktornuten und den Auswerferbohrungen, nicht eingehalten werden. Der erste Entwurf für die Lösung dieser Problematik war zwei übereinanderer stehende Bohrungen, die parallel durchströmt werden, anzubringen (s. Abb. 74). Dadurch kann ein gleicher Querschnitt auf der gesamten Länge des Temperierkreises eingehalten werden und somit eine gleichmäßige Strömung des Temperiermediums. Nach Absprache mit dem Projektpartner konnte diese Anordnung nicht eingesetzt werden, da die Kanäle vor der Heizphase ausgeblasen werden müssen. Diese Entleerung der Formeinsatz-Kühlkanäle ist zur Verbesserung der Energiekopplung notwendig sowie zur Vermeidung einer Werkzeugschädigung durch eine Überhitzung des Kühlwassers mit einer möglichen explosiven Dekompression.

Daraufhin entstand die Anregung, die Verzweigungen der Temperierbohrungen durch einen rechteckigen Kanal zu ersetzen. Diese Form stellt aufgrund der scharfen Ecken eine Schwachstelle dar, die eventuell durch die Kerbwirkung zu einer Schädigung der Kanäle führen kann. Daher wurden in einem zweiten Entwurf Langlochbohrungen eingearbeitet (s. Abb. 75), die durch das Senkerodieren problemlos gefertigt werden konnten.



Abb. 74 Konstruktion der Temperierbohrungen (Erster Entwurf)





Abb. 75 Konstruktion der Temperierbohrungen (Zweiter Entwurf)

Da allein die Auswerferseite induktiv erwärmt wird, ist zu erwarten, dass unterschiedliche Temperaturen in den Werkzeugseiten herrschen. Um eine optimale Temperierung des Werkzeugs zu erzielen bzw. um die Temperatur auf den beiden Werkzeughälften ausgleichen zu können, wurde eine separate Temperierung vorgesehen. Zum Einsatz kommen insgesamt vier Temperiergeräte. Auf jeder Werkzeughälfte wird die Formplatte zusammen mit dem Anguss-Einsatz über einen ersten Kreis mit Öl temperiert und die Temperatur in den Kavitätseinsätzen über einen zweiten Kreis mit Wasser geregelt. Zusätzlich werden die Induktoren vom Generator mit Wasser durchströmt, um deren Überhitzung zu unterbinden. In der nachfolgenden Abbildung sind die einzelnen Temperierkreise dargestellt.



Abb. 76: Temperierkreise



Die Strömungswege des Temperiermediums werden durch Verschlussschrauben und Verschlussstopfen geschlossen (s. Abb. 77). Die Verschlussstopfen werden durch eine Montagezange in den Bohrungen positioniert und sicher montiert.



Abb. 77: Strömungsweg des Temperiermediums

5 Versuche mit integrierter induktiver Temperierung

5.1. Isotherme Spritzgießversuche

Aufgrund der durchgeführten konstruktiven Änderungen an dem Werkzeug, war es notwendig, isotherme Spritzgießversuche durchzuführen, um einen Bezugspunkt im Hinblick auf die Prozessparameter sowie die Qualität der Bipolarplatten für die induktiven Spritzgießvorgänge zu ermitteln. Als Ausgangsituation wurden die Prozessparameter des bisherigen Werkzeugs gewählt (Versuchsreihe1 Abb. 78). Hierbei gelang eine Füllung von zwei Kavitäten bei gleichbleibenden Zykluszeiten von ca. 17s zu erreichen, wodurch eine Verdopplung der Produktivität erzielt wurde. In den Untersuchungen konnte ein stabiler Prozess dargestellt werden, bei dem eine gleichbleibend gute Qualität der Bipolarplatten erreicht wurde. Des Weiteren konnte bei den Bipolarplatten kein Rissbildung und Ausbrüche festgestellt werden



Abb. 78: Einspritzdruck der isothermen Spritzgießversuche



Weitere Versuche (Versuchsreihen 2 und 3), den Einspritzdruck zu reduzieren, sind gescheitert, da Haarrisse bereits bei einem Druck von 3000 bar an den Bindenähten entstanden. Bei einem Druck von 2700 bar konnten die Bipolarplatten nicht mehr vollständig gefüllt werden (s. Abb. 79).



Abb. 79: Fehlerhafte Bipolarplatte (Versuchsreihe 3)

5.2. Induktive Spritzgießversuche

Nach der Abmusterung des neuen Spritzgießwerkzeuges erfolgten Untersuchungen mit der induktiven Temperierung. Ziel war es, den Einspritzdruck auf ein Niveau von Standard Spritzgießmaschinen zu reduzieren, ohne dabei die Zykluszeiten erheblich zu erhöhen.

In der nachfolgenden Abbildung sind die wichtigsten Versuchsreihen dargestellt. Hierbei konnten, bei einer gleichbleibend guten Formfüllung, der maximale Einspritzdruck auf 2500 bar und die bisher notwendigen Massenströme von 580 cm³/s um bis zu 100cm³/s reduziert werden (Versuchsreihe 2). Die Formnestoberfläche wurde bei einer Generatorleistung von 10 kW von einer Anfangstemperatur von 50 °C auf 150 °C erwärmt, was Heizraten von mehr als 2 K/s entspricht.





Abb. 80: Ausgewählte Versuchsreihen der induktiven Untersuchungen

In der Versuchsreihe 3 zeigte sich, dass eine Erhöhung der Formnesttemperatur auf 115 °C ausreichend für eine gesamte Formfüllung ist, wodurch die Heizzeiten und somit die Zykluszeiten um 15 s gekürzt wurden. Abb. 81 zeigt einen Vergleich zwischen den hergestellten Platten in isothermen und induktiven Prozessen.





Abb. 81: Hergestellte Bipolarplatten mit einem Einspritzdruck von 2500 bar und einem Volumenstrom von 100 cm³ (links in isothermer- und rechts in induktiver Prozess)

Bei der Verarbeitung von neuartigen Verbundwerkstoffen wie z.B. Carbon Nanotubes (CNT) beeinflussen die Prozessparameter die Ausbildung von leitfähigen CNT-Netzwerken. So werden im Spritzgießprozess niedrige Einspritzgeschwindigkeiten bevorzugt, um die Nanopartikeln in der Schmelzmasse gleichmäßig zu verteilen und somit die elektrische Leitfähigkeit der Bauteile zu erhöhen. In der Versuchsreihe 4 wurde dieser Aspekt auch untersucht. Dabei wurde die Einspritzgeschwindigkeit auf 30 cm³/s reduziert. Die Bipolarplatten waren zwar unter diesen Prozessbedingungen nicht vollständig gefüllt, jedoch war eine starke Verlängerung des Fließweges im Gegensatz zu isothermen Prozess zu vermerken (s. Abb. 82). Auch eine Erhöhung der Generatorleistung (Versuchsreihe 5) hatte keine Auswirkung auf der Qualität des Spritzteils, da die Kavitätstemperatur unverändert blieb. Grund hierfür ist, dass aufgrund der thermischen Kontaktierung der Formeinsätze zu den äußeren Werkzeugträgern einerseits die eingeführte Wärme durch Wärmeleitung an das Grundwerkzeug übertragen wird, andererseits die Grundtemperierung entgegenwirkt und die Formeinsätze abkühlt. Dadurch kommt es zu einer Stabilisierung der Temperatur an der Formnestwand.





Abb. 82: Hergestellte Bipolarplatten in der Versuchsreihe 4 (links in isothermer- und rechts in induktiver Prozess)

5.3. Qualitätsprüfung

Die Bipolarplatten haben in der Brennstoffzelle eine Vielzahl von Aufgaben zu erfüllen. Dazu zählen untereinander die elektrische und thermische Kontaktierung zu den benachbarten Zellen sowie die Abdichtung der Gasmedien nach außen hin. Daher sollen die Bipolarplatten möglichst maßtreu und gerade sein. Durch den Einsatz einer induktiven Temperierung und der damit verbundenen Reduzierung der Prozessparameter werden Werkzeug sowie Spritzgießmaschine weniger beansprucht, was sich auf die Maßhaltigkeit der Bipolarplatten positiv auswirkt (s. Abb. 83). Besonders die Durchbiegung der Platten wird erheblich reduziert. So zeigten die 3D-Vermessungen, wie in Abb. 84 und Abb. 85 dargestellt, eine Verbesserung der Durchbiegung von 290 µm.



Abb. 83: Maßhaltigkeit der Bipolarplatten





Abb. 84: Durchbiegung der Bipolarplatten (isotherme Prozesse)



Abb. 85: Durchbiegung der Bipolarplatten (induktive Prozesse)

Im Standard Spritzgießverfahren wird der im Compound enthaltene Kunststoff nach außen gedrängt und es entsteht eine isolierende Schicht auf der Oberfläche der Bipolarplatten, die die elektrische Leitfähigkeit der Platten verschlechtert. Dadurch wird eine mechanische Nachbearbeitung erforderlich. Im induktiven Spritzgießprozess zeigten die hergestellten Bipolarplatten eine Verringerung des Kontaktwiderstandes (s. Abb. 86). Dies ist bedingt durch die hohe Kavitätstemperatur, die zu einer Zersetzung dieser Polymerschicht führt. Hier würde möglicherweise eine weitere Erhöhung der Werkzeugtemperatur dazu führen, dass die Nachbearbeitung nicht mehr notwendig ist. Jedoch konnte das aufgrund der bereits erwähnten Stabilisierung der Werkzeugtemperatur nicht überprüft werden.





Abb. 86: Flächenspezifischen Einzelwiderstände der Bipolarplatten (links isothermer- und rechts induktiver Prozess)

6.0 Allgemeine Empfehlungen für Brennstoffzellenanwendungen

6.2 Werkzeugkonzept mit integrierter induktiver Beheizung

Für das Projekt nimmt der Spritzgießprozess eine elementare Stellung ein. In dem gesamten Verfahren und der konstruktiven Umsetzung ist sicherzustellen, dass der Fertigungsprozess nicht behindert wird. Für das Spritzgießen von hochgefülltem Graphit-Compound werden aufgrund seiner hohen Viskosität und Wärmeleitfähigkeit ein besonders hoher Druck und eine hohe Bearbeitungstemperatur benötigt. Deswegen kann nur eine richtig ausgelegte Werkzeugkonstruktion die geforderte Formteilqualität, eine störungsfreie Produktion und eine lange Standzeit des Werkzeugs garantieren. In enger Zusammenarbeit der Projektpartner wurden die Werkzeugparameter daher folgendermaßen definiert:

- Die Werkzeugabmessungen wurden aufgrund der Maschinengröße auf eine Kantenlänge von ca. 600*600 mm2 und einer Werkzeughöhe von 480 mm festgelegt.
- Die jeweils 22 Auswerfer pro Formnest wurden so positioniert, dass eine gleichmäßige Entformung gewährleistet ist.
- Für die interne induktive Erwärmung wurden entsprechende Zwischenplatten vorgesehen, die auch eine interne Öltemperierung ermöglichen.
- Bedingt durch die hohen Einspritzdrücke und Schließkräfte muss die Durchbiegung der einzelnen Komponenten erfasst und durch konstruktive Gegenmaßnahmen kompensiert werden.

Auf Basis der maschinenseitigen Vorgaben und der Ergebnisse aus den Vorversuchen mit dem externen Induktor wurde ein entsprechender Versuchsträger entwickelt. Dieser musste gegenüber dem konventionellen Werkzeug den Anforderungen entsprechend modifiziert werden. Dazu wurde er mit zwei einzelnen Kavitäten konzipiert, die jeweils in entsprechende Formeinsätze eingearbeitet wurden. Dies ist darin begründet, dass im Falle einer Beschädigung der Kavität und einer Änderung der Form


oder Größe der Bipolarplatte, ein schneller und einfacher Austausch der Formeinsätze ermöglicht wird. Zudem stellte sich im weiteren Verlauf der Konstruktion heraus, dass dies notwendig ist, um den Induktor einbauen und die Temperierungskanäle an den Funktionsträger des Formeinsatzes (Auswerfer und Induktornuten) anpassen zu können. Die Umleitung der Schmelzmasse in der jeweiligen Kavität erfolgt über einen Verteilerkanal in Form zweier symmetrisch angeordneter Bandangüsse. Die Kavitäten und der Verteilerkanal lassen sich durch den Zusammenbau von drei Formeinsätzen zusammenstellen. Durch den Tausch des Angusseinsatzes ist es daher möglich, eine Kavität zu sperren, wodurch ein direkter Vergleich mit dem bisherigen Werkzeug im Hinblick auf die Prozessparameter vorgenommen werden kann.



Abb. 87 Komplettes Werkzeug

Da es sich um neue technische Herausforderungen in der spritzgießtechnischen Verarbeitung hochgefüllter Graphit-Compounds handelt, war nicht vorhersehbar, wie sich das Werkzeug unter diesen Belastungen aus hohen Drücken und Temperaturen verhält. Für die Konstruktion und Auslegung wurde daher auf die Simulationsergebnisse aus AP 2 und AP 3 zurückgegriffen.





Abb. 88 Werkzeug im CAD und montiert auf einer Palette

Die hohe Anzahl der Auswerfer, die Schwächung der Formeinsätze durch die Induktorspulen und die Anzahl an Temperierkanälen machten einen sehr komplexen Aufbau des Werkzeuges notwendig. Die Schwächung der Werkzeugmitte durch die Fremdeinbauten stellte hier ein besonderes Problem dar. Durch die hohen Drücke, gerade in diesem Bereich, besteht hier die Gefahr der Durchbiegung und damit die der Maßungenauigkeit des Spritzlings. Um dem entgegenzuwirken, wurden hier neuartige Stützstempel verbaut, die der Verformung entgegenarbeiten sollen.

Um die Formeinsätze während des Spritzgießvorganges beheizen zu können, musste der Induktor in diese integriert werden. Die Versuche mit dem externen Induktor hatten ergeben, dass dieser den Bereich um die Heizkanaldüse zu stark aufheizt und so zu einem teigigem Verhalten des Spritzlings bei der Entformung führt. Dieses Verhalten war bei den ersten Simulationen unter Arbeitspaket 2 nicht zu erwarten und wurden daraufhin im Arbeitspaket 4 in der Konstruktion des neuen Induktors berücksichtigt.



Abb. 89 Schnitt durch die Formeinsätze und den Induktor

Abb. 89 zeigt deutlich den hier angepassten engeren Stand der Induktorspulen auf der angussfernen Seite. Hierdurch ist es möglich, dort einen höheren Energieeintrag und damit eine höhere Temperatur zu erzielen. Da das Werkzeug zwei Kavitäten besitzt, kam für jede davon ein Flächeninduktor zum Einsatz, die parallel zueinander geschaltet wurden. Der Induktor wurde in einer mäanderförmigen Anordnung ausgeführt und hat einen quadratischen Querschnitt mit einer Kantenlänge von 6 mm und einer Wandstärke von 2 mm. Die Herstellung des Induktors erfolgte modular aus mehreren Kupferhohlprofilen, die durch Hartlöten gefügt wurden. Der Angussbereich wird nicht induktiv temperiert, da in diesem Bereich sehr geringe Fließwiederstände der Schmelzmasse und ausreichend hohe Temperaturen herrschen.

Bei Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera konnten die vorab simulierten Parameter verifiziert werden. Auf den Aufnahmen sind die Bereiche mit den unterschiedlichen Temperaturen deutlich zu erkennen (s. Abb. 90).

Da es hier zu einem massiven Eintrag von Wärmeenergie in die einzelnen Kavitäten kommt, ist die Betrachtung der weiteren Werkzeugtemperierung von Bedeutung. So wurde, um die Kühlleistung und die mechanische Stabilität des Werkzeugs weiter zu verbessern, der Induktor mit einer speziell für die



Ummantelung von Induktoren entwickelten Keramik vergossen. Durch die gute Wärmeleitfähigkeit der Keramik von 14,9 W/mK ist es nun möglich, die Induktorkühlung zur Kühlung der Kavität sowie des Bauteils zu nutzen und dadurch die Kühlleistung zu erhöhen. In das Werkzeug selber wurden fünf getrennte Kühlkreisläufe eingebaut. Dies gewährleistet bei Bedarf eine optimale Temperierung des gesamten Werkzeuges.





Die Kühlung mittels Induktor erlaubt es, in Zukunft Werkzeug und Induktor in wesentlich dünnere Platten zu integrieren, da möglicherweise auf eine konturnahe Kühlung verzichtet werden und damit der Induktor flacher gestaltet werden kann. Die Kühlzeiten können durch die unterstützende Induktorkühlung abhängig von der Durchflussmenge und der Kühlwassertemperatur, gegenüber der herkömmlichen, konturnahen Kühlung reduziert werden.

Das Referenzwerkzeug der ZBT GmbH ist ein Spritzgießwerkzeug mit einer Kavität und einem Heißkanal und wird am ZBT für die Produktion von Bipolarplatten genutzt. Durch die Erfahrungen und Verbesserungen, welche in den neuen Versuchsträger eingeflossen sind, konnte ein wesentlich verbesserter Prozess abgebildet werden. Durch die neue Auslegung konnte konstruktiv auf den Heißkanal verzichtet werden und es wurde die Möglichkeit geschaffen, zwei Kavitäten gleichzeitig zu füllen. Weiter wurde in ausgiebigen Versuchsreihen nachgewiesen, dass eine Reduzierung des Einspritzdruckes von 1000 bar und eine Verminderung der Einspritzgeschwindigkeit auf rund 100 cm³/s möglich ist.







Abb. 91 Spritzlinge aus dem Induktionswerkzeug

6.2 Sicherheit

Die Sicherheit beim Betrieb von Induktionserwärmungsanlagen werden in folgenden Normen bzw. Vorschriften geregelt: **DIN EN 60519-3 (VDE 0721-3):** (Elektrowärmanlagen)

BGI 891: (elektrische Prüfanlagen)

BGI 839: (Elektromagnetische Felder)

26. Verordnung des Bundes-Immisionsschutzgesetzes BImSchV

Aus diesen Dokumenten lassen sich für induktive beheizte Spritzgusswerkzeuge die nachfolgend formulierten Anforderungen ableiten.

Sicherheitsanforderungen für den Betrieb eines Induktors

Für den Betrieb eines externen Induktors zur Oberflächenerwärmung an einem Spritzgießwerkzeug sind verschiedene Sicherheitsaspekte zu beachten:

Schutz vor elektrischen Strömen

Sicherung gegen direktes Berühren

Forderung:

Alle Teile der Erwärmungsanlage inkl. aller elektrischen Einrichtungen müssen in Gehäusen untergebracht oder in geeigneter Form gegen direktes Berühren gesichert sein. (DIN EN 60519-3 (VDE 0721-3) Abschn. 13.1)

Geeignete Maßnahmen sind unter anderem: Isolierungen, Abdeckungen, Gehäuse, Hindernisse, Sicherheitsabstand. (BGI 891)

Forderung:



Freiliegende Heizinduktoren ohne elektrische Isolierung sind durch Schutzgitter oder ausreichenden Abstand gegen zufälliges Berühren zu sichern. (DIN EN 60519-3 (VDE 0721-3) A3)

Maßnahme:

Wenn sich der Induktor während der Heizphase im geöffneten Werkzeug befindet, ist er durch die Abdeckung der Maschine gegen direktes Berühren geschützt.

Bei geschlossenem Werkzeug befindet sich der Induktor außerhalb der Maschinenabdeckung. Ist hier kein ausreichender Sicherheitsabstand gegen direktes Berühren sichergestellt, so ist ein Gehäuse um das gesamte Koppelgetriebe vorzusehen.

Möglich ist auch das automatische Abschalten des Induktors in der oberen Ruhelage durch einen Endlageschalter.

Schutz im Fehlerfall

Forderung:

Eine effektive Maßnahme zum Schutz im Fehlerfall (z. B. Bruch des Induktors) muss vorhanden sein, z. B. automatische Abschaltung der Stromversorgung. (BGI 891)

Maßnahme:

Generator und Maschine werden an eine Notaus- und Sicherungskette angeschlossen, so dass im Fehlerfall Maschine <u>und</u> Generator abgeschaltet werden.

Forderung:

Zuverlässiges Erkennen einen möglichen Induktorbruchs, insbesondere bei einem integrierten Induktor.

Maßnahme:

Ein Induktorbruch hat eine Veränderung des Kühlwasserstroms zur Folge, was vom Generator erkannt wird. Zusätzlich hat ein Bruch des Induktors eine massive Änderung der Resonanzfrequenz des durch den Induktor gebildeten Schwingkreises zu Folge. Diese Änderung der Resonanzfrequenz wird ebenfalls durch den Generator erkannt.

Forderung:

Bei Kontakt des Induktors mit dem Werkstück (z.B. bei Induktorbruch) darf kein Strom über die Spritzgießmaschine fließen.



Maßnahme:

Ein Kontakt des Induktors mit dem zu erwärmenden Werkzeug kann über eine sog. Erdschlußüberwachung, wie sie auch beim induktiven Härten eingesetzt wird, detektiert werden (Optionale Funktion des Generators).

Hierbei schaltet der Generator automatisch ab, wenn während der Heizphase ein Erdschluss (Kontakt von Induktor mit Werkstück) detektiert wird.

Absperrung von elektrischen Versuchs- und Prüffeldern

Forderung:

Laut BGI 891 müssen Prüf- und Versuchsfelder mit Spannungen bis 1 kV mit Seilen o. ä., nichtleitenden Absperrungen (Ständerhöhe mind. 1000 mm) abgetrennt sein. Zusätzlich ist das Prüffeld mit dem Warnschild W08 und alle Zugänge zum Prüffeld mit dem Verbotsschild P06 zu kennzeichnen.

Maßnahme:

Diese Forderung kann sehr einfach durch eine geeignete Absperrung der gesamten Maschine und das Anbringen der entsprechenden Beschilderung erfüllt werden.

Schutz vor elektromagnetischen Feldern

Forderung:

Ausreichender Schutz vor elektromagnetischer Strahlung durch geeignete technische und organisatorische Maßnahmen. (BGI 839)

Maßnahme:

Laut BGI 839 können bei hochfrequenten Feldquellen ohnehin erforderliche Schutzgitter gleichzeitig als Abschirmung dienen. Schutzgitter werden in Abschn. 1.1 als Schutz gegen direktes Berühren gefordert. Eine Abschaltung des Induktors in der Ruheposition mittels Endlageschalter reduziert die elektromagnetische Strahlung zusätzlich.

Als organisatorische Maßnahmen ist der betreffende Bereich mit den Warnschildern W12 & W13 sowie dem Verbotsschild P11 und P16 zu kennzeichnen.

Maximal zulässige Grenzwerte sowohl für elektrische Spannungen als auch für die Feldstärken waren den hier aufgeführten Dokumenten nicht zu entnehmen.

Zusammenfassung



Ausgehend von den oben genannten Sicherheitsanforderungen werden folgende Empfehlungen für den Betrieb des Induktors ausgesprochen:

- Verwendung eines Generators mit Erdschlusserkennung
- Koppelgetriebe mit Endlageschalter zur automatischen Abschaltung des Induktors
- Zusätzliche Sicherung des Koppelgetriebes durch ein Gitterkäfig gegen direktes Berühren des Induktors in der oberen Ruheposition und als Abschirmung gegen die elektromagnetische Strahlung.
- Gemeinsame Notaus- und Sicherungskette für die Spritzgießmaschine und den Generator
- Absperrung des Generators und der Maschinen mit den von der BG geforderten Mitteln und der geforderten Beschilderung



Benötigte Warn- und Verbotsschilder:



Warnschild W08: Warnung vor elektr. Spannungen



Warnschild W13: Warnung vor magnet. Feld



Warnschild W12: Warnung vor elektromagnet. Feld



Verbotsschild P06: Zutritt für unbefugte Verboten



Verbotsschild P11: Verbot für Personen mit Herzschrittmacher



Verbotsschild P16: Verbot für Personen mit Implantaten aus Metall



Literatur

- [1] Zentrum für BrennstoffzellenTechnik, 2010 <u>http://www.zbt-duisburg.de</u>
- [2] Heinzel, A., Mahlendorf, F., und Roes, J. Brennstoffzellen Entwicklung, Technologie, Anwendung, 3. Auflage, 2006.
- [3] Can Kreuz. PEM-Brennstoffzellen mit spritzgegossenen Bipolarplatten aus hochgefülltem Graphit-Compound.
- [4] Technische Unterlagen des Generators TrueHeat MF 5020, TRUMPF, 2010
- [5] Voigt, C., Höller, S., Küter, U. Brennstoffzellen im Unterricht, 1. Auflage, 2005
- [6] Schinköthe, W., Zülch, M. Temperierung von Spritzgusswerkzeugen durch vollständig integrierte induktive Beheizung. Abschlußbericht DFG-Projekt Schi 457/9. IKFF, 2009
- [7] Walther, T. Geräte- und Verfahrenstechnik zur Induktiven Werkzeugtemperierung beim Mikrospritzgießen. Diss. IKFF, Bericht Nr. 20, 2003.
- [8] Tewald, A. Entwicklung und Untersuchung eines schnellen Verfahrens zur variothermen Werkzeugtemperierung mittels induktiver Erwärmung. Diss. IKFF, Bericht Nr.13, 1997.
- [9] Schaumburg, C. Mikrospritzgießen mit induktiver Werkzeugtemperierung. Diss. IKFF, Bericht 17, 2001.
- [10] Geitmann S. Wasserstoff & Brennstoffzellen, Die Technik von Morgen, 2004
- [11] Technische Unterlagen Spritzgießmaschine Krauss Maffei, Typ KM 500 1900C, 2010
- [12] Menges, Michaeli, Mohren. Spritzgießwerkzeuge Annleitung zum Bau von Spritzgieß-Werkzeugen, 5. Auflage, 1999
- [13] Beitl F. 1000 Tipps zum Spritzgießen Band2: Spritzgießwerkzeuge, 2. Auflage, 2005
- [14] "Wiki" der Berufsschule Winsen, 2010 <u>http://www.bs-wiki.de/mediawiki/index.php/Bild:Durchbiegung.jpg</u>
- [15] Krahn H., Eh D., Vogel H., 1000 Konstruktionsbeispiele für den Werkzeug und Formenbau beim Spritzgießen, 2008
- [16] Zülch M. Temperierung von Spritzgusswerkzeugen durch vollständig integrierte induktive Beheizung, Diss. IKFF Bericht Nr. 33, 2010