

Bewilligungsempfänger



Abschlussbericht zum Förderprojekt

Hocheffiziente Textiltransferpresse auf Basis der Induktionstechnologie - InduPatch

Art des Berichtes:

Abschlussbericht zum Vorhaben mit dem Aktenzeichen 35772/01-21/2, gefördert durch die
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Verfasser: Herr Dietmar Nagel

Herr Julien Schultz

Schutterwald, August 2021

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	35772/01	Referat	21/2	Fördersumme	119.695 €
Antragstitel Hocheffiziente Textiltransferpresse auf Basis der Induktionstechnologie – InduPatch					
Stichworte					
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
12 Monate		11.05.2020			
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger Thermotex Nagel GmbH Schutterstraße 14 77746 Schutterwald				Tel +49 781 – 9616-13 Fax +49 781 – 9616-50	
				Projektleitung Dietmar Nagel	
				Bearbeiter	
Kooperationspartner KogiTEK UG In der Spöck 12 77656 Offenburg					
Hochschule Offenburg Institut für Unmanned Aerial Systems (IUS) Badstraße 24a 77656 Offenburg					
<i>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</i>					
<p>Die Textilkennzeichnung umfasst die Veredelung und Individualisierung hochwertiger Textilien wie Berufskleidung, Teamwear, Trikots oder ähnlichem; aber auch die einfache Kennzeichnung von Kleidungsstücken mit Namen, Personal- oder Identifikationsnummer. Dafür werden jährlich millionenfach sogenannte Transferemblem verwendet. Die Etiketten werden durch Druck und Hitze in einer Presse auf entsprechende Textilien appliziert. Dieser Vorgang ist äußerst ineffizient, weil die Pressen ein massives Aluminium-Element mit einer Leistung von typischer Weise ca. 3 kW dauerhaft auf ca. 200° C aufheizen, obwohl der Vorgang an sich nur wenige Sekunden dauert. Allein die in Deutschland betriebenen ca. 12.000 Thermotex-Transferpressen verbrauchen in etwa 7.500 kWh Energie, was dem Äquivalent von etwa 38.000 t CO2 entspricht.</p> <p>Ziel des Projekts war die Realisierung eines Demonstrators einer neuartigen Thermotransferpresse für die Textilkennzeichnung auf Basis der Induktionstechnologie. Dabei wurde die bislang verwendete massive Aluminiumplatte mit Heizspule durch ein deutlich leichteres, schneller erwärmbares Heizelement ersetzt.</p>					
<i>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</i>					
<p>Im Rahmen des Projekts wurde ein experimenteller, iterativer Entwicklungsprozess umgesetzt, der durch den Forschungspartner durch theoretische Simulationsrechnungen begleitet wurde.</p> <p>Nach dem Aufbau eines ersten Labormusters der Elektronik in einem modifizierten Kopf einer Thermotransferpresse erfolgte die experimentelle Entwicklung einer Messstrategie zur Überwachung der Temperatur und – darauf aufbauend – die Implementierung einer Regelstrategie zur direkten Regelung des Stroms.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Im Anschluss wurden die Ergebnisse der Partner zusammengeführt und die konkrete Spulengeometrie entwickelt. Da die Ergebnisse der Simulationsrechnungen nicht auf den Labormuster-Aufbau übertragbar waren, erfolgte eine experimentelle Analyse der Temperaturverteilung in unterschiedlichen Kopfkfigurationen aus verschiedenen Spulengeometrien, Stahlblechen sowie Homogenisations-Blechen aus Aluminium. Eine vorteilhafte Konfiguration wurde ausgewählt und in ein funktionsfähiges Demonstratorsystem überführt. Umfangreiche Messungen zur Charakterisierung des Aufheiz-Verhaltens sowie der tatsächlich erreichbaren Energieeinsparung schlossen das Projekt ab.

Ergebnisse und Diskussion

Die Textilkennzeichnung steht exemplarisch für einen industriellen Prozess, der häufig und wiederholt in Unternehmen aus vielen Branchen durchgeführt wird, einem hohen Kosten- und Effizienzdruck unterliegt und nicht mit einer typischen Hochtechnologie assoziiert ist – und dennoch einen Beitrag zum CO₂-Ausstoß der Industrie leistet. Die Umsetzung eines Systems mit hocheffizienter Energietechnik in einer solchen Querschnittstechnologie zeigt großes Potential für die Steigerung der Energieeffizienz über Branchengrenzen hinweg. Erste Messungen der Energieeffizienz zeigen, dass sich bereits mit der im Demonstrator integrierten Technologie-Reife Energieeinsparungen von 75 % und mehr im Vergleich zum konventionellen System erreichen lassen.

Fazit

Das Energieeinsparungspotential der Maschine ist beachtlich und resultiert hauptsächlich aus den geringeren Heizzeiten - zwischen den Patchvorgängen beim Abkühlen benötigt das System gar keine Energie; beim Halten der reduzierten Temperatur deutlich weniger Energie als die konventionelle Maschine. Die vorab geplante Abschaltung zwischen den Patchvorgängen wurde zur Projektlaufzeit verworfen da sonst die Patchzeiten länger als bei der konventionellen Maschine wären und dies mit maßgebender Faktor bei den Kunden ist.

Der zum Projektende vorliegende Demonstrator zeigt, dass die Induktionstechnologie auch im industriellen Prozess „Textilpatchen“ trotz hohem Kosten- und Effizienzdruck tatsächlich umsetzbar ist und zu wesentlichen Energieeinsparungen führen könnte.

Große Entwicklungsherausforderungen verbleiben jedoch trotz des in diesem Bericht dargestellten „Proof of Principle“: Insbesondere die Realisierung eines Elektronik- und Maschinendesigns, in dem die großen elektromagnetischen Felder zuverlässig geschirmt und damit beherrscht werden können, ohne die Leistung der Maschine zu begrenzen, bedarf noch umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	2
1. Zusammenfassung	7
2. Einleitung	8
3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse	11
3.1. Grundkonzeptionierung	11
3.1.1. Funktionsweise	12
3.1.2. Anforderungsprofil	13
3.1.3. Platinenaufbau	14
3.1.4. Temperaturmessung	14
3.1.5. Aufbau des Heizelements	15
3.1.6. Auslegung Schwingkreis	15
3.1.7. Definition des Mikrokontrollers	15
3.2. Aufbau eines Labormusters	16
3.2.1. Aufbau Hardware	17
3.2.2. Firmware und Temperaturregelung	20
3.2.3. Inbetriebnahme	20
3.3. Experimentelle Reglerentwicklung	21
3.4. Entwicklung der optimalen Spulengeometrie	24
3.1. Systemintegration zum Demonstrator	31
3.1.1. Herausforderungen bei der Systemintegration	34
3.2. Optimierter Aufbau	35
3.2.1. Weiterer Optimierungsbedarf	37
3.3. Energetisches Einsparpotential der Maschine	38
3.4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	43
4. Fazit	44

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1:	Schematischer Aufbau einer Patchmaschine mit resistier Induktionsheizung	11
Abbildung 2:	Kennlinie des im Demonstrator integrierten Schwingkreises	13
Abbildung 3:	Darstellung des Platinenaufbaus.....	14
Abbildung 4:	Labormuster der Heizeinheit	16
Abbildung 5:	Heizblech auf der Gegenseite der Isolationsplatte	17
Abbildung 6:	Blockschaltbild der Spannungsversorgung	17
Abbildung 7:	Schwingkreisanregung - Schaltbild	19
Abbildung 8:	Regelschleife Temperaturreglung	21
Abbildung 9:	Darstellung der Temperatur in den drei Patchphasen "Aufheizen", "Halten" und "Neu Aufheizen"	22
Abbildung 10:	Grafische Darstellung der P- I- und D-Anteile im realisierten Regler	23
Abbildung 11:	Fermat-Spule. Die Wicklungsdichte steigt von innen nach außen an.	25
Abbildung 12:	Simulationsmodell des Partners HSOG	26
Abbildung 13:	Ergebnis der FEM-Simulation der Temperaturverteilung	26
Abbildung 14:	Aufbau des Heizkopfes für den Demonstrator	31
Abbildung 15:	CAD-Repräsentation des Spulengrundrisses	32
Abbildung 16:	Erste gefräste Grundplatte mit Spulengrundriss und strukturierter Oberseite.....	32
Abbildung 17:	Momentaufnahmen: Produktion der Heizplatte. Fräsvorgang (links), Wicklung der Spule (rechts)	33
Abbildung 18:	Heizelement - Detailansicht.....	33
Abbildung 19:	Integration der Steuerplatine in den Innenraum der Maschine.....	34
Abbildung 20:	CAD-Zeichnung der modifizierten Grundplatte	36
Abbildung 21:	Neuaufbau mit Teflonfolie über dem Heizblech	36
Abbildung 22:	Gesamtansicht des Demonstrators	37
Abbildung 23:	Temperaturverlauf während Aufheizen und Patchen: Detailansicht	39
Abbildung 24:	Maschinenleistung während des Patchvorgangs.....	39

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1:	Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Heizplattenentwicklung	27
Tabelle 2:	Energieeffizienz Demonstrator: Überschlagsrechnung Arbeitstag, Vergleich zu Serienmaschine	41
Tabelle 3:	Aufstellung Energieverbrauch - prognostizierte Serienmaschine gegen Stand der Technik	42

Formelverzeichnis:

Formel 1:	Formel zur Berechnung der resistiven Erwärmung durch Induktion	9
Formel 2:	Formel zur Berechnung der in Wärmeenergie umgesetzten Leistung	9
Formel 3:	Formel zur Berechnung der Resonanz des Schwingkreises	15
Formel 4:	Mathematische Beschreibung der Fermat-Spule.....	24
Formel 5:	Formel zur Berechnung der magnetischen Feldstärke	24
Formel 6:	Feldstärke in Abhängigkeit des Spulenstroms	24

1. Zusammenfassung

Die ThermoTex Nagel GmbH wurde 1988 vom heutigen Geschäftsführer, Dietmar Nagel, gemeinsam mit seinem Vater gegründet. Seit dieser Zeit beschäftigt sich das Unternehmen mit der Entwicklung und Fertigung von Systemen zur Kennzeichnung und Reparatur von Textilien. Zur Veredelung und Individualisierung hochwertiger Textilien wie Berufskleidung, Teamwear, Trikots oder ähnlichem; aber auch zur einfachen Kennzeichnung von Kleidungsstücken mit Namen, Personal- oder Identifikationsnummer werden sogenannte *Transferemblem*e verwendet, die jährlich millionenfach verkauft und appliziert werden.

Dazu werden die Etiketten durch Druck und Hitze in einer Presse auf entsprechende Textilien appliziert, was als „patchen“ bezeichnet wird. Dieser Vorgang ist äußerst ineffizient, weil die Pressen ein massives Aluminium-Element mit einer Leistung von typischer Weise ca. 3 kW dauerhaft auf ca. 200° C aufheizen, obwohl der Patchvorgang an sich nur wenige Sekunden dauert. Allein die in Deutschland betriebenen ca. 12.000 ThermoTex-Patchmaschinen verbrauchen in etwa 7.500 kWh Energie, was dem Äquivalent von etwa 38.000 t CO² entspricht.

Die Textilkennzeichnung steht damit exemplarisch für einen industriellen Prozess, der häufig und wiederholt in Unternehmen aus vielen Branchen durchgeführt wird, einem hohen Kosten- und Effizienzdruck unterliegt und nicht mit einer typischen Hochtechnologie assoziiert ist – und dennoch einen Beitrag zum CO₂-Ausstoß der Industrie leistet. Die Umsetzung eines Systems mit hocheffizienter Energietechnik in einer solchen Querschnittstechnologie zeigt großes Potential für die Steigerung der Energieeffizienz *über Branchengrenzen hinweg*.

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Demonstrator einer Transferpresse mit einer Induktionsheizung umgesetzt. Dabei wurde die bislang verwendete massive Aluminiumplatte mit Heizspule durch ein deutlich leichteres, schneller erwärmbares Heizelement ersetzt. Besondere Herausforderungen im Projekt ergaben sich durch die Anforderung sehr hoher Temperaturgradienten von bis zu 20°C/sec sowie den Bedarf nach einer sehr homogenen Erwärmung der Unterseite des Heizelements, um einen gleichmäßigen Patchvorgang zu gewährleisten. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Einhaltung von Grenzwerten bezüglich der elektromagnetischen Abschirmung des Systems äußerst fordernd ist.

Erste Messungen der Energieeffizienz zeigen, dass sich bereits mit der im Demonstrator integrierten Technologie-Reife Energieeinsparungen von 75 % und mehr im Vergleich zum konventionellen System erreichen lassen.

2. Einleitung

Problemstellung

Zur Veredelung und Individualisierung hochwertiger Textilien wie Berufskleidung, Teamwear, Trikots oder ähnlichem; aber auch zur einfachen Kennzeichnung von Kleidungsstücken mit Namen, Personal- oder Identifikationsnummer werden sogenannte *Transferembleme* verwendet, die jährlich millionenfach verkauft und appliziert werden. Dazu werden die Etiketten durch Druck und Hitze in einer Presse auf entsprechende Textilien appliziert, was als „patchen“ bezeichnet wird. Dieser Vorgang ist äußerst ineffizient, weil die Pressen mit einer Leistung von typischer Weise ca. 1,5 – 3 kW dauerhaft auf ca. 200° C aufgeheizt bleiben, obwohl der Patchvorgang an sich nur wenige Sekunden dauert. Die in Deutschland in Betrieb befindlichen ca. 10.000 Patchmaschinen verbrauchen in etwa 6.300 kWh Energie, was dem Äquivalent von etwa 32.000 t CO² entspricht. Moderne Technologien der elektromagnetischen Erwärmung (Induktion, Mikrowellentechnik) hätten das Potential, die Energieeffizienz solcher Systeme maßgeblich zu erhöhen.

Als technologischer Marktführer mit einer großen Reichweite und hervorragenden Kundenkontakten ist das Unternehmen Thermotex immer bestrebt, die eigenen Produkte im Hinblick auf Effizienz und Anwendbarkeit hin zu verbessern. Dies motivierte umfangreiche Entwicklungsarbeiten mit dem Ziel, das massive Gusselement aus Aluminium durch flexiblere und schneller aufheizbare Systeme zu substituieren.

Technologische Basis des Projekts

Resistive Heizelemente werden nach Stand der Technik in vielen Anwendungen bereits heute durch neuartige Technologien wie insbesondere der Erwärmung über Induktionsfelder oder Mikrowellen substituiert. Die Übertragung dieser Technologien auf den Einsatz in Transferpressen scheitert jedoch bislang an der Herausforderung, ein speziell auf die gezielte Erhitzung des Klebers ausgelegtes System mit einer präzisen Temperaturmessung sowie der Integrationsmöglichkeit in eine herkömmliche Transferpresse zu entwickeln. Insbesondere die *Temperaturregelung* ist dabei äußerst herausfordernd, obwohl insbesondere die resistive Induktionserwärmung großes Potential für die Integration in einfach zu bedienende und kostengünstige Systeme zur Textilkennzeichnung bietet.

Bei diesem Ansatz zur induktiven Erwärmung werden durch Wirbelströme in Metall entstehende Verluste durch die nicht perfekte Leitfähigkeit der Metalle für den Energietransfer verwendet. Die dafür benötigten Anregungsfrequenzen sind vergleichsweise gering, wodurch die Systemintegration der Elektronik in entsprechende Systeme im Vergleich z. B. zu

Mikrowellenstrahlern erleichtert wird. Andererseits müssen jedoch die angeregten leitenden Flächen eine Mindestgröße aufweisen, um Wirbelströme entstehen zu lassen. Das Verfahren wird daher bevorzugt bei trägeren Systemen wie beispielsweise dem Induktionsherd angewandt.

Die resistive Erwärmung durch Induktion basiert auf der Lenz'schen Regel

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}.$$

Formel 1: Lenz'sche Regel

Danach induziert eine Magnetfeldänderung in einem ferromagnetischen Körper einen Wirbelstrom, der der Ursache der Änderung entgegengesetzt ist. Fließt dieser Strom in einem nichtidealen Leiter, so entsteht entsprechend dem Widerstand des Leiters Wärme. Die in Wärmeenergie umgesetzte Leistung kann über die Formel

$$P = R \cdot I^2$$

Formel 2: In Wärmeenergie umgesetzte Leistung

errechnet werden. Um das Heizelement mit der geforderten Dynamik zu erwärmen, muss die zu erwärmende Masse möglichst reduziert werden. Das zwingend ferromagnetische Heizblech muss dementsprechend dünn ausgelegt werden. Durch die im Vergleich z. B zu Kupfer oder Aluminium schlechte Wärmeleitfähigkeit von Stahlblech erwärmt das Blech jedoch inhomogen, hauptsächlich entlang des magnetischen (Wechsel-)felds. Hinzu kommt, dass die Wärme sowohl nach unten, über das zu patchende Textil in den Fuß der Patchmaschine, als auch zur Seite, über die Außenkanten des Heizfelds, abfließt. Dadurch entsteht ein zusätzlicher Temperaturgradient mit kühleren Temperaturen außen. Um diese komplexen thermodynamischen und elektromagnetischen Verhältnisse quantitativ zu untersuchen, sind umfassende Simulationsanalysen mit entsprechenden FEM-Programmen notwendig. Das ermöglicht ein Spulendesign, welches einerseits den Wärmefluss nach außen kompensiert und andererseits die Ausbildung einer homogenen Temperatur an der Unterseite eines Heizelements ermöglicht. Das IUAS verfügt über entsprechende Software und Mitarbeiter, welche solch eine FEM Berechnung durchführen können.

Zielgruppe des Systems

Die Firma ThermoTex Nagel GmbH ist Spezialist im Bereich von Textilkennzeichnungen und plant, die neuartige Transferpresse selbst herzustellen und europaweit zu vermarkten. Zielmarkt ist die Industrie zur Textilveredelung bzw. -dekoration von Arbeits- oder Mietkleidung, Sport- Freizeit- oder Funktionskleidung. Dazu zählen typischerweise auch Wäschereien und andere Dienstleistungsunternehmen, welche Berufs- und Arbeitskleidung anbieten. Die neue Transferpresse ist nicht nur äußerst energieeffizient, sondern sie ermöglicht erstmalig die Veredelung auch sehr hochwertiger – und temperaturempfindlicher – Textilien und verringert die Verletzungsgefahr an der Maschine.

Der Markt für die Applikation von Transferemblem ist vergleichsweise groß. Allein im Bereich der Wäschekennzeichnung werden im Jahr in Deutschland weit über 100 Mio. Transferemblem auf unterschiedlichste Kleidungsstücke appliziert. Die hier entwickelte Transferpresse ist insbesondere für Betriebe interessant, welche auch hochempfindliche Textilien verarbeiten, Emblem sehr unterschiedlicher Größe verarbeiten oder/und zwar mehrmals am Tag, aber nicht im Akkord patchen. Dies betrifft beispielsweise auch Seniorenheime, in denen Privatkleidung gekennzeichnet werden muss sowie verschiedenste Anbieter von kundenspezifisch dekorierte Kleidung. Daraus ergibt sich ein sehr hohes Marktpotential von mittelfristig bis zu 5 Mio. € allein für den Absatz der Patchmaschinen.

Der voraussichtliche Verkaufspreis orientiert sich an der Ausstattung der Transferpressen. Für das neuartige Gerät ist ein Verkaufspreis von – je nach Ausstattung, Gesamtleistungsfähigkeit und Anzahl an Heizelementen – von ca. 2.000 € bis 5.000 € geplant. Die Absatzzahlen sollen binnen ca. 3 Jahren nach Markteinführung auf das Niveau der jetzigen Absatzzahlen konventioneller Maschinen gesteigert werden. Mittelfristig – binnen ca. 5 Jahren – erwarten wir, auf Basis der neuartigen Technologie unsere Marktanteile noch steigern zu können und entsprechend mehrere Tausend Maschinen im Jahr europaweit absetzen zu können. Die dafür notwendigen Fertigungskapazitäten werden kontinuierlich und parallel zur Absatzsteigerung im eigenen Unternehmen bereitgestellt werden. Die Firma KogitTEK wird ebenfalls an der Vermarktung der Ergebnisse partizipieren. Im Rahmen dieses Projekts soll erstmals ein neues Geschäftsmodell verfolgt werden: Sämtliche Rechte an der im Rahmen des Projekts entwickelten Regelungstechnik des neuartigen Systems werden bei KogitTEK verbleiben. So kann das Unternehmen über die Zulieferung und Lizenzierung der erarbeiteten Ergebnisse erstmals eine kontinuierliche Umsatzquelle parallel zum bislang verfolgten Geschäftsmodell der Durchführung anspruchsvoller F&E-Aufträge erschließen.

3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

3.1. Grundkonzeptionierung

Im Rahmen des Projekts wurden grundlegende theoretische Kenntnisse über die Induktionstechnologie gesammelt und anhand dieser Kenntnisse ein Maschinenkonzept für eine Patchmaschine auf Induktionsbasis erarbeitet. Das in Abbildung 1 dargestellte Konzept sieht im Maschinenkopf eine Induktionsspule vor welche ein dünnes Stahlblech induktiv sehr schnell erwärmt. Für die Anregung des Reihenschwingkreises der Induktionsspule wurde eine Halbbrückenordnung gewählt. Überdiese Halbbrücke ist die im Schwingkreis angeregte Frequenz einstellbar und darüber die Leistung der Maschine.



Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Patchmaschine mit resistier Induktionsheizung

Dieses Konzept bietet mehrere Vorteile:

- Über eine in der Steuerung einstellbare Minstdifferenz zwischen Schwingkreisfrequenz und Resonanzfrequenz kann der fließende Strom – und damit die Heizleistung nahezu stufenlos und einfach begrenzt werden. So kann das einmal ermittelte Elektronik- und Spulendesign für nahezu beliebige Leistungsklassen der Maschinen (z. B. 3.5 kW, 2 kW) adaptiert werden.
- Die Dynamik des Aufheizprozesses und die letztendliche Zielgröße „Temperatur“ können über nur eine Regelgröße beeinflusst werden.

Allerdings ergeben sich aus der Strategie auch gewisse Herausforderungen, die im Projekt gelöst werden müssen:

- Die skizzierte Reglerstrategie funktioniert nur, wenn der Temperaturschwellwert für den Beginn des Verstimmprozesses präzise im Projekt eingestellt wird – andernfalls ergeben sich übermäßig lange Aufheizdauern oder Schwankungen in der Temperatur.
- Die Strategie basiert auf der Annahme, dass die Homogenität der Temperaturverteilung auf der Unterseite des Heizelements über die Spulengeometrie sowie die Ausgestaltung des Heizbleches rein konstruktiv erreicht werden kann. Diese Annahme muss im Projekt bestätigt werden.
- Der Wärmeabfluss während des Patchvorgangs muss abgefedert werden. Dazu müssen Zeitkonstanten ermittelt werden, nach denen sich ein Temperaturgleichgewicht eingestellt hat.

3.1.1. Funktionsweise

Die Induktionsheizung nutzt die physikalische Eigenschaft, dass ein stromdurchflossener Leiter ein Magnetfeld erzeugt. Dieses Magnetfeld erzeugt wiederum in einem weiteren Leiter (der Heizplatte) einen Wirbelstrom. Durch den endlichen Leitwert der Heizplatte entstehen Verlustleistungen, die in Form von Wärme dann abgegeben und zur Heizung genutzt werden.

Die Stärke des Magnetfelds ist direkt proportional zum Strom durch die Spule. Zur Stromerzeugung wird ein Schwingkreis verwendet, der zwar mit vergleichsweise kleinen Strömen $< 10\text{ A}$ angeregt wird; in dem jedoch Ströme bis ca. 100 A fließen. Sowohl die Stärke des Magnetfelds als auch die Stärke der Wirbelströme sind direkt abhängig vom Stromfluss im Schwingkreis. Der zur Aufrechterhaltung des Schwingkreises permanent einzuspeisende Strom entspricht der als Wärme in die Heizplatte eingespeisten Energie.

Um sonstige Verluste möglichst gering zu halten, sollte der Schwingkreis in der Nähe seiner Resonanzfrequenz betrieben werden, wobei die Resonanzfrequenz selbst nicht getroffen werden darf: Die dann fließenden extrem hohen Ströme würden sämtliche Bauteile im Stromkreis direkt zerstören. Allerdings kann man über eine Frequenzänderung des Schwingkreises den Arbeitspunkt und somit die Leistung definieren.

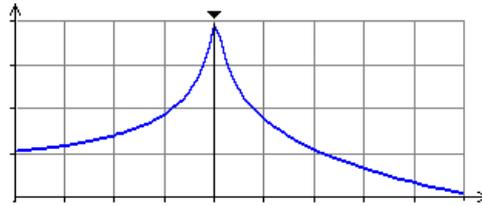


Abbildung 2: Kennlinie des im Demonstrator integrierten Schwingkreises

Die Frequenz wird über zwei Leistungs-Mosfets eingestellt, welche die Polung des Schwingkreises steuern. Somit können wir über eine Frequenz jede beliebige Leistung einstellen welche eine Maschine erreichen können soll. Abbildung 2 zeigt die Kennlinie des eingesetzten Schwingkreises. Die Frequenz ist auf der x-Achse aufgetragen; die Spitze zeigt die Resonanzfrequenz an. Unterhalb der Resonanzfrequenz verhält sich der Schwingkreis vermehrt kapazitiv, oberhalb induktiv. Da wir die Heizplatte induktiv erwärmen wollen, bewegen wir uns in der Frequenz stets oberhalb der Resonanzfrequenz und steigern somit die Leistung der Maschine durch Frequenzreduktion.

3.1.2. Anforderungsprofil

Die bedeutendste Anforderung an die Maschine ist die kurze Aufheizdauer. Die Maschine soll in weniger als 10 s von Raumtemperatur auf 200° C aufheizen können. Dabei muss die Wärme auf dem Patchfeld homogen verteilt werden. Wird die Heizplatte zu heiß wird das Textil beschädigt, erreicht es die Solltemperatur nicht haftet das Emblem nicht ausreichend. Natürlich sind auch die Herstellungs- und Bauteilkosten Teil der Kriterien welche bei der Bauteilwahl berücksichtigt wurden.

Basierend auf diesem Anforderungsprofil wurde zunächst ein Labormuster erarbeitet, während Simulationsarbeiten in Bezug auf die optimale Geometrie der Induktionsspule durch den Partner HSOG durchgeführt wurden. Die Ergebnisse des Labormuster-Aufbaus sind in den Kapitel 3.1.3 bis 3.3 dargestellt. Auf die Ergebnisse der Feldsimulation wird in Kapitel 3.4 eingegangen.

Im Anschluss wurden sämtliche Ergebnisse dann in einem Demonstrator zusammengeführt, dessen Aufbau in den Kapitel 3.5 und 3.6 beschrieben wird. Anschließende Untersuchungen zur theoretischen und tatsächlichen Energieeffizienz sowie ein Ausblick werden in Kapitel 3.7 dargestellt.

3.1.3. *Platinenaufbau*

Für das System wurde ein dreiteiliger Platinenaufbau konzeptioniert. Der Hauptteil der Platine wird von der Leistungselektronik mit Spannungsversorgung, Schwingkreis und Ansteuerung (Halbbrücke und IGBT-Treiber, Gelb) besetzt.



Abbildung 3: Darstellung des Platinenaufbaus

Der zweite Teil des Aufbaus beinhaltet den Steuermikrocontroller welcher die Ansteuerung des Schwingkreises regelt und die Messpunkte auf der Platine sowie den Temperatursensor ausliest.

Der dritte Teil des Aufbaus wird für die Serienmaschine nicht benötigt und beinhaltet weitere Möglichkeiten zur Temperaturmessung (über ein Thermoelement oder PT1000) und stellt die Möglichkeit der Debug-Ausgaben bereit.

3.1.4. *Temperaturmessung*

Die Dynamik der Maschine stellt eine große Herausforderung für die Temperaturmessung dar. Zunächst wurden unterschiedliche auf Berührung basierende Messstrategien untersucht. Alle ausgetesteten Temperaturmessungen über Berührung (PT1000, Thermoelement) sind für diese Anwendung jedoch zu träge.

Daher wurde eine berührungslose Temperaturmessung über einen Infrarot Sensor umgesetzt. Dieser Sensor wird hinter dem Heizblech montiert und misst somit die Temperatur möglichst nahe am Textil. Voraussetzung dafür, dass dieses Verfahren funktioniert, ist allerdings eine homogene Wärmeverteilung auf dem Heizblech da nur punktuell die Temperatur erfasst wird.

3.1.5. Aufbau des Heizelements

Das im Antrag dargestellte Konzept des Heizelementes sah einen Aufbau aus drei Teilen vor:

- Einer Induktionsspule für die Felderzeugung
- Einer thermischen Isolationsschicht zur Aufnahme mechanischer Kräfte sowie der Schirmung der Elektronik vom Heizelement
- Dem Heizblech selbst.

Dieser Aufbau konnte (Vergl. Abbildung 4) im Wesentlichen beibehalten werden, musste jedoch aufgrund der geänderten Strategie zur Temperaturmessung punktuell modifiziert werden.

3.1.6. Auslegung Schwingkreis

Die Resonanzfrequenz des Schwingkreises bestimmt sich über

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Formel 3: Resonanzfrequenz des Schwingkreises

Die ausgewählten IGBT-Transistoren sind bis zu einer Frequenz von 100 kHz spezifiziert. Die Resonanzfrequenz wurde daher deutlich unter 100 kHz gewählt. Dies vermeidet zudem übermäßige Schaltverluste in den Transistoren, da die Schaltverluste der Transistoren linear mit der Frequenz zunehmen. Daraus könnten bei unpassend gewählter Resonanz- und damit auch Schaltfrequenz Temperaturspitzen oder ein Wärmestau an den Transistoren auftreten.

Für den Prototypen wurde eine Spiralspule mit 37,1uH mit zwei 680nF Kondensatoren im Schwingkreis kombiniert, woraus sich eine Resonanzfrequenz von 22,4 kHz ergibt. Diese Resonanz ist deutlich unter 100 kHz und befindet sich auch außerhalb des hörbaren Bereichs was ebenfalls ein Kriterium bei der Auslegung darstellte.

3.1.7. Definition des Mikrokontrollers

Beim Mikrokontroller entschieden wir uns für einen Kontroller vom Typ STM32F0. Diese sind kostengünstig und die Anforderungen an den Mikrokontroller sind bei einer Taktung des Schwingkreises im Bereich von 20-100 kHz überschaubar. Wichtig war, dass er über einige Schnittstellen wie I2C für den Temperatursensor und zwei UARTs für die DEBUG-Ausgabe sowie die Kommunikation mit dem DEBUG-Kontroller verfügt. Zudem muss ein externes

Interrupt über einen Pin ausgelöst werden können um die Netzspannung kontrollieren zu können. Für den DEBUG-Kontroller verwenden wir ebenfalls diesen Kontroller.

3.2. Aufbau eines Labormusters

Für das Labormuster wurde einer bestehenden Transferpresse das Hezelement entfernt und mit einem Induktionsprototypen ersetzt. So mussten an der Maschine selbst nur kleine Änderungen vorgenommen werden. Als Isolationsschicht wurde eine 23 mm dicke Teflonplatte gewählt. Dieser Werkstoff lässt sich gut bearbeiten und ist äußerst hitzebeständig. Die Elektronik sitzt direkt auf dieser Platte, so dass die Leitungslängen möglichst kurz sind und die Messpunkte auf der Platine gut mit dem Oszilloskoptastkopf erreichbar sind.

In Abbildung 4 ist der Aufbau der Maschine zu sehen. Zu erwähnen ist der Temperatursensor, welcher durch die Induktionsspule auf das Heizblech sieht. Die grauen Platten auf der Spule sind Ferritplatten und verhindern, dass das Feld auch nach oben abgestrahlt wird und die Maschine selbst erhitzt. Man erkennt auch, dass die IGBT Transistoren und der Gleichrichter an einem Kühlkörper befestigt sind. Dies ist notwendig da diese Bauteile die größten Wärmeverluste erzeugen und ohne Kühlung thermisch zerstört werden würden.

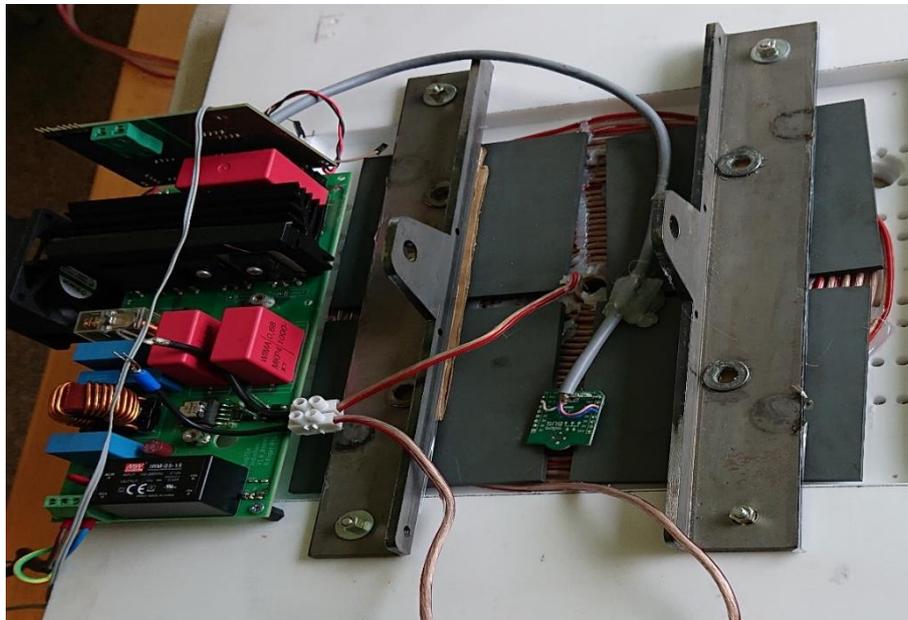


Abbildung 4: Labormuster der Heizeinheit

Abbildung 5 zeigt das Heizblech auf der Gegenseite der Isolationsplatte. Das Heizblech wurde zur Temperaturmessung mit dem Infrarotsensor mit einem hitzebeständigen schwarzen Lack lackiert und in der gleichen Form zugeschnitten wie die Spule darüber. Die Größe des Heizfeldes wurde für den Prototypen kleiner als die komplette Maschinengröße gewählt um die Leistung der Maschine bei gleicher Heizwirkung für die Tests zu reduzieren.



Abbildung 5: Heizblech auf der Gegenseite der Isolationsplatte

3.2.1. Aufbau Hardware

Wie schon beschrieben besteht die Hardware aus mehreren Teilbereichen welche wir an dieser Stelle etwas detaillierter beschreiben wollen.

Die Spannungsversorgung

Die Spannungsversorgung der Platine stellt räumlich den größten Teil der Platine dar, da die benötigten Bauteile recht groß sind. In Abbildung 6 ist der Schaltplan der Spannungsversorgung zu sehen.

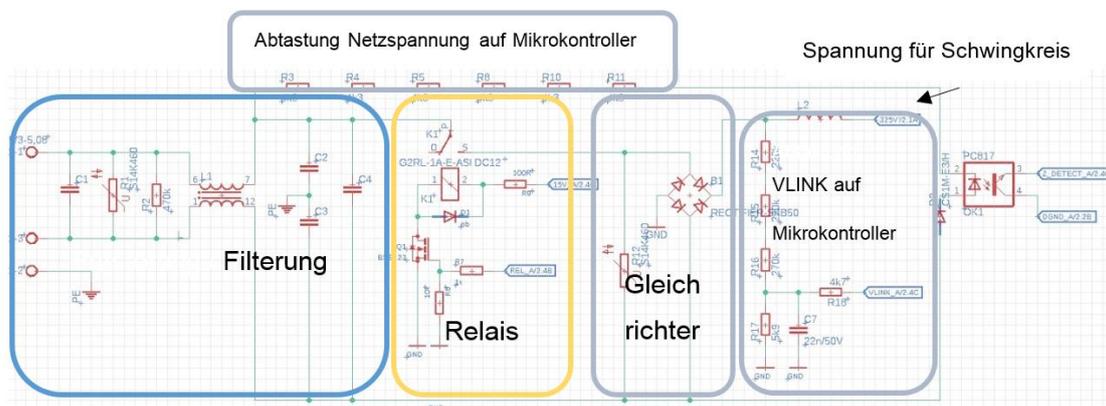


Abbildung 6: Blockschaltbild der Spannungsversorgung

Die Entstörung / Filterung zu Beginn verhindert, dass Störimpulse aus dem Netz in die Schaltung geraten und auch, dass Störimpulse der Schaltung ins Netz gelangen. Dies ist eine Standardbeschaltung von Leistungsgeräten mit hohen Schaltfrequenzen. Das nachfolgende Relais ist eine Sicherheitsvorkehrung, so dass die Netzspannung nur dann am Schwingkreis anliegt, wenn sie auch benötigt wird. Dies ist zum einen für die Entwicklung von Vorteil, da so die Regelung und die Ansteuerung der IGBT Transistoren auch ohne Netzspannung getestet werden kann, zum anderen ist es später in der Praxis auch ein Sicherheitsfeature, da die Netzspannung nur am Heizelement anliegt, wenn sie dort auch gebraucht wird.

Der Gleichrichter formt aus der 50 Hz Wechselspannung des Versorgernetzes eine 100 Hz gepulste Gleichspannung, da die negative Halbwelle nach oben geklappt wird. Somit hat an den IGBT Transistoren und für den Schwingkreis nicht die 230 V AC Netzspannung, sondern eine 325 V DC Spannung zur Verfügung. Die Polwechsel des Stromflusses im Schwingkreis werden dann durch die Halbbrücke realisiert welche im folgenden Abschnitt näher erläutert wird.

Bei der Realisierung einer Induktionserwärmung ist ein zentraler Aspekt zur Vermeidung von Belastungsreduktionen der Bauteile der ideale Zeitpunkt des Ein- und Ausschaltvorgangs des Schwingkreises. Der ideale Zeitpunkt hierfür ist, wenn die Netzspannung sich gerade in einem Nulldurchgang befindet. So sind die auftretenden Ströme um die Kondensatoren zu laden und die Energie in die Spule zu bekommen am geringsten. Schaltet man zu anderen Zeitpunkten ein oder aus kann es zu Peaks im Strom oder in der Spannung am Transistor kommen. Um diesen Einschaltzeitpunkt zu treffen muss die Netzspannung abgetastet werden. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, wird die Spannung über eine Widerstandsreihe reduziert. Anschließend wird die Polung (Highlevel/lowlevel) über einen Optokoppler überwacht und dann über VLINK an den Mikrocontroller gekoppelt. Dieses Signal löst am Mikrocontroller bei Flankenwechsel ein externes Interrupt aus, mit dem dann Ein- und Ausschaltvorgang synchronisiert werden.

Weiter wird am Mikrocontroller noch die VLINK mit einem ADC-Eingang abgetastet um festzustellen an welcher Stelle der Halbwelle wir uns befinden.

Die Schwingkreisanregung

Abbildung 7 zeigt den Aufbau der Schwingkreisanregung. Das vom Mikrocontroller ausgehende PWM-Signal stellt die Anregefrequenz des Schwingkreises dar. Mit dieser Frequenz lässt sich die Leistung der Maschine über die Resonanzkennlinie des Schwingkreises festlegen. Da die IGBT Transistoren eine Gatespannung von 15 V benötigen wird ein Treiberbaustein hierfür benötigt. Die Ansteuerung erfolgt über generische

Treiberbausteine, die die Einstellung der Totzeit (der Pause zwischen Ausschalten des ersten und Anschalten des zweiten Transistors) über eine externe Beschaltung ermöglichen.

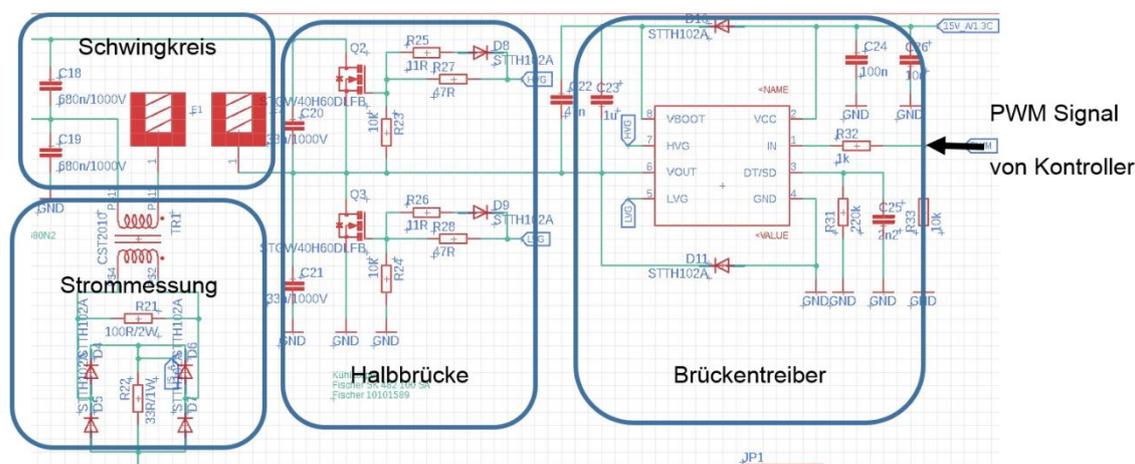


Abbildung 7: Schwingkreis- und Brückentreiber - Schaltbild

Dies ist wichtig, da ein gleichzeitiges Durchschalten beider Transistoren einen Kurzschluss und damit die Zerstörung der Bauteile hervorruft. Die Halbbrücke selbst besteht aus den beiden IGBT-Transistoren, welche für eine Spannung von 650 V und einen Strom von 100 A bei 100° C sowie 65 A bei 100° C spezifiziert sind. Die Kondensatoren parallel zu den IGBTs verlangsamen zwar das Schaltverhalten etwas, reduzieren aber auch die Schaltverluste, welche bei dieser Anwendung durch die hohen Ströme und Spannungen nicht zu vernachlässigen sind.

Der Schwingkreis

Für den Schwingkreis wurde ein Konzept ausgewählt, bei welchem zwei identische Kondensatoren verwendet werden. Es wurden auf der Prototypenplatte mehrere Platzhalterkondensatoren vorgesehen, um nachträglich die Größe anpassen zu können. Initial wurden 680 nF bestückt.

Die Spule des ersten Labormusters wurde mit einem dicken Lautsprecherkabel als gleichmäßig gewickelte Spirale realisiert. Diese Leitung weist zwar bei hohen Frequenzen einen Verlust durch den Skin-Effekt auf, dieser ist jedoch im hier betrachteten Frequenzbereich weitestgehend vernachlässigbar. Für weitere Labormuster oder einen Demonstrator kann eine Spule aus HF-Litze gewickelt werden.

Um den Strom im Schwingkreis messen zu können, wurde ein 1:200 Transformator in den Schwingkreis eingebaut. Über einen Messwiderstand kann der fließende Strom bestimmt und am Oszilloskop dargestellt werden.

3.2.2. Firmware und Temperaturregelung

Zentrale Komponente der Firmware ist eine Hauptschleife, welche sowohl die Kommunikation mit dem DEBUG-Controller als auch die Kommunikation zum PC im DEBUG-Fall realisiert. Weiter werden in dieser Hauptschleife verschiedene sicherheitskritische Funktionen getestet; wie beispielsweise, dass der Temperatursensor keine unrealistischen Werte (kleiner als definiertes Minimum oder größer als definiertes Maximum) anzeigt. Sollte solch ein Fall eintreten wird sofort die Spannungsversorgung des Schwingkreises mit dem Relais unterbrochen. Außerdem ist ein Watchdog implementiert, welcher das System im Falle eines Absturzes neu startet und somit auch das Relais der Schwingkreisversorgung öffnet.

Die Regelschleife der Temperaturregelung ist in Abbildung 8 zu sehen. Die Stellgröße ist wie oben beschrieben die Anregefrequenz des Schwingkreises, die über eine PWM im Controller generiert. Gemessen wird die Temperatur über einen Temperatursensor, der auch eine hohe Dynamik in der Temperatur verzögerungsfrei erfassen kann. Geregelt wird die Temperatur über einen PID-Regler.

Den Hauptanteil macht der P-Anteil des Reglers, da die Temperaturdifferenz beim Aufheizen meist sehr groß ist. Die Stellgröße ist über die Maschinenleistung begrenzt, daher heizt die Maschine mit voller Leistung bis sie kurz vor Erreichen des Sollwerts ist. Dann nimmt die Leistung über den P-Anteil ab und der I-Anteil läuft soweit hoch, dass der Sollwert tatsächlich erreicht wird.

Der D-Anteil ist nur zum Abfangen des Schließmoments da. Er detektiert den Temperaturabfall beim Schließen der Maschine und lässt die Maschine dann gleich wieder mit voller Leistung nachheizen.

Die große Schwierigkeit hier ist es, eine homogene Erwärmung des Blechs mit nur einer Temperaturmessung zu gewährleisten.

3.2.3. Inbetriebnahme

Für die Inbetriebnahme wurde eine Vorgehensweise entwickelt um die Maschine nicht direkt mit voller Last zu betreiben und die Bauteile evtl. zu überlasten.

Bei bauseitiger Veränderung wird vor Inbetriebnahme die Induktivität der Spule inkl. angebrachtem Heizblech gemessen. Anhand dieser Induktivität kann die Resonanzfrequenz rechnerisch ermittelt werden. Dementsprechend kann eine untere Schwelle für die Anregefrequenz bereits vor der Inbetriebnahme festgelegt werden.

Zur Inbetriebnahme wurde ein neuer Betriebsmodus implementiert, bei dem die Temperaturregelung deaktiviert ist. Stattdessen wird direkt über das DEBUG-Kabel die Frequenz des Schwingkreises eingestellt kann. Zunächst wurden die Kondensatoren mit 100 kHz angeregt – der höchsten für die IGBT-Transistoren der Halbbrücke freigegebene Frequenz, die etwa um den Faktor 4 über der rechnerisch ermittelten Resonanzfrequenz liegt. Bei dieser Frequenz sollte noch kein großer Strom fließen. Der Stromverlauf kann daher ausführlich analysiert und getestet werden, ohne dass eine Überhitzung zu erwarten ist.

Im Anschluss wurde die Anregefrequenz schrittweise unter Beobachtung des Stromschaubilds sowie der aufgenommenen Leistung und der aktuellen Temperatur reduziert. Auf unerwartete Effekte hätte so schnell reagiert werden können, beispielsweise durch Abschalten der Maschine. Bei Erreichen der zuvor definierten unteren Frequenzschwelle wurde dann wieder auf Temperaturregelung umgeschaltet, da Schäden durch Fehlansteuerung über den gesamten Frequenzgang hinweg ausgeschlossen sein sollten. Zusätzlich wurde die Erstinbetriebnahme mit einem einstellbaren Trenntransformator mit vergleichsweise geringer Leistung durchgeführt um die Netzspannung für die Tests zu reduzieren und somit Überspannungen im Schaltmoment zu vermeiden. Für weitere Untersuchungen wurde ein nicht einstellbarer Trenntransformator angeschafft, welcher einen Strom bis 10 A und somit eine Leistung bis 2,3 kW liefern kann.

3.3. Experimentelle Reglerentwicklung

Wie bereits in Kapitel 3.2.2 beschrieben, wird die Temperatur mit einem IR-Temperatursensor gemessen. Dieser weist keinerlei Verzögerung auf was bei der hohen Dynamik des Systems erforderlich ist. Die Leistung der Maschine lässt sich über die PWM sehr gut einstellen was eine präzise und schnelle Temperaturregelung erwarten lässt.



Abbildung 8: Regelschleife Temperaturregelung

Aufgabe bei der experimentellen Reglerauslegung ist es nun den PID-Regler so auszulegen, dass er möglichst schnell reagiert, die Maschine beim Aufheizen so lange als möglich mit voller Leistung aufheizt um die Aufheizdauer gering zu halten, die Solltemperatur möglichst nahe zu erreichen damit das Emblem auf dem Textil gut haftet und dennoch ein Überschwingen der

Temperatur vor allem bei geschlossener Maschine zu vermeiden um Textilschäden zu unterbinden.

Eine weitere Schwierigkeit bei dieser Auslegung stellt die Inhomogenität des erhitzten Blechs dar, da das Blech von dem angeregten Feld nicht gleichmäßig erwärmt wird. Da nur an einer Stelle des Heizelements mit dem IR Sensor die Temperatur erfasst wird ist es somit möglich, dass an anderen Stellen des Heizblechs eine andere Temperatur anliegt. Hier mischt sich dieses AP mit dem AP4 Entwicklung der optimalen Spulengeometrie welches als Ziel hat, eben diese Inhomogenität durch eine geänderte Spulenwicklung zu homogenisieren.

Die Reglerwerte wurden mit einigen Experimenten ermittelt. Der Patchvorgang wurde hierfür in drei Teilbereiche unterteilt wobei die Parameter in den verschiedenen Bereichen unterschiedlich stark agieren sollen. Die Reglerstrategie wird nachfolgend anhand des Temperaturverlaufs (Abbildung 9) sowie der Reglersignale (Abbildung 10) erläutert.

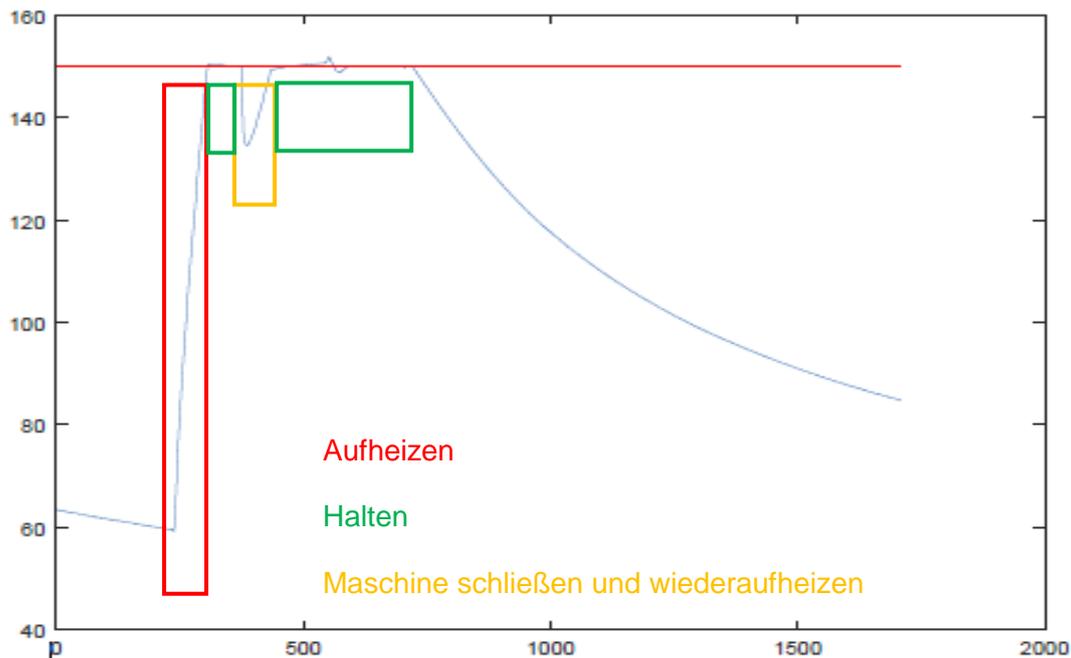


Abbildung 9: Darstellung der Temperatur in den drei Patchphasen "Aufheizen", "Halten" und "Neu Aufheizen"

Beim Aufheizen sollte die Maschine weitestgehend volle Leistung erbringen um die Heizplatte schnell auf Temperatur zu bekommen. Hierfür wird der P-Anteil entsprechend ausgelegt, dass die Maschine bis 10° C unter Solltemperatur die minimale Frequenz (maximale Leistung) anlegt. Ab diesem Moment soll der I-Anteil anwachsen um die Solltemperatur final zu erreichen und sie anschließend zu halten. Beim Starten des Patch-Vorgangs, d. h. beim Schließen der Maschine fällt die Temperatur aufgrund des Wärmeflusses zwischen Heizblech und Textil

und/oder Maschinentisch um einige Grad Celsius ab. Die Aufgabe des D-Reglers ist es, diesen Temperaturabfall schnell zu detektieren und direkt mit voller Leistung dagegen zu steuern.

Das Summensignal in Abbildung 10 liegt fast in der kompletten Aufheizphase am definierten Maximum und sinkt erst bei Erreichen der Solltemperatur ab. Interessant ist die Phase ab circa Sample 375, hier wird die Maschine geschlossen. Man erkennt, dass der grüne D-Anteil direkt in die Höhe ansteigt wobei der P-Anteil nur vergleichsweise langsam anwächst. An dieser Stelle dient der D-Anteil, dass die Maschine möglichst direkt bei Verschluss der Maschine mit voller Leistung gegen den Wärmeverlust ankämpfen kann. Dieser Wärmeverlust ist bei dieser Maschine recht groß da man aufgrund der Anforderung des schnellen Aufheizens ein dünnes Blech verwendet welches eine geringe Wärmekapazität aufweist. Daher ist die Maschine beim Aufheizen, jedoch auch beim Abkühlen sehr dynamisch. Durch das frühe nachheizen und durch ein optimales Blech (siehe Kapitel 3.4) kann dieser Temperaturverlust jedoch relativ geringgehalten und schnell kompensiert werden. Die Zeitreihen in Abbildung 10 waren die Grundlage der Definition eines optimalen Parametersatzes für die Regelung der Temperatur.

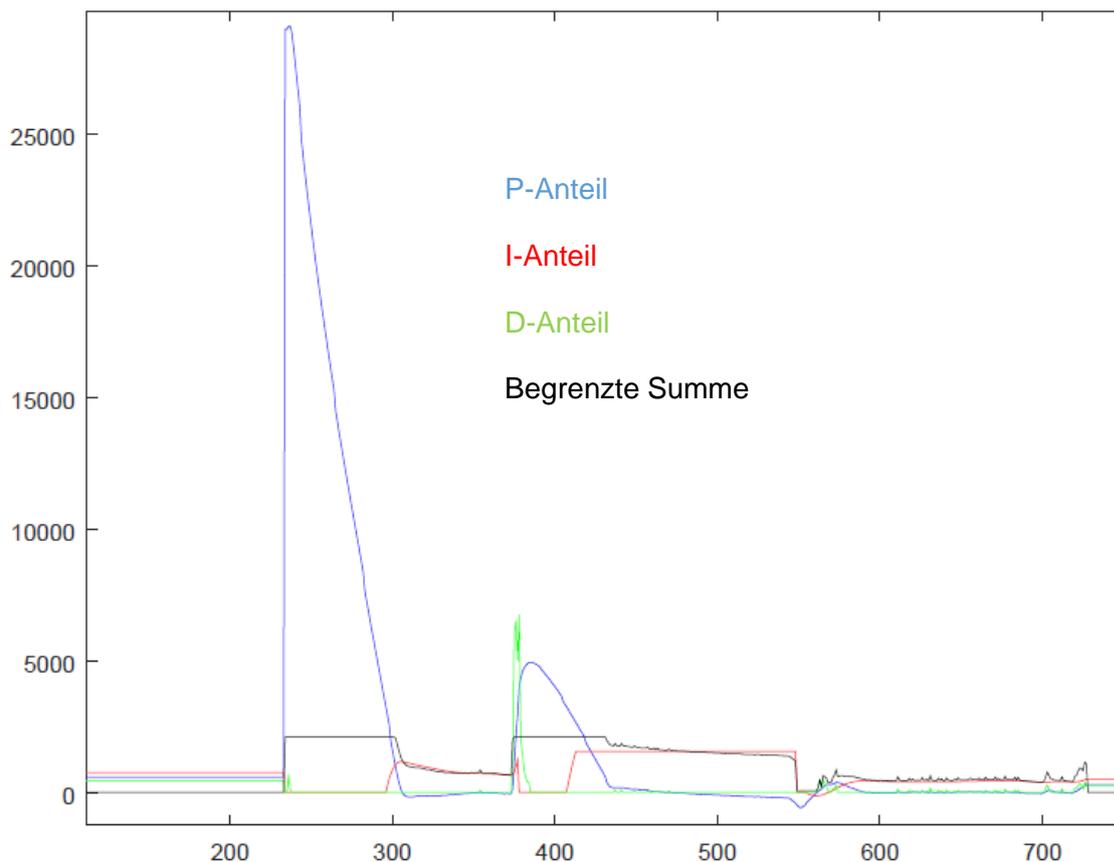


Abbildung 10: Grafische Darstellung der P- I- und D-Anteile im realisierten Regler

3.4. Entwicklung der optimalen Spulengeometrie

Aufgabe des Kooperationspartners HS Offenburg war es über FEM Simulation eine geeignete Spulengeometrie zur Homogenisierung der Wärmeverteilung zu erreichen. Bei gleichmäßig gewickelten Spulen wird im Zentrum und an den Außenseiten feldbedingt weniger Leistung erzeugt. Einen weiteren Faktor bilden hier die Verluste an den Außenseiten, da die Wärme dort an die Umgebung abgegeben werden kann. Zur Aufgabe der Hochschule gehörten das Simulieren der IST-Situation als auch die Optimierung und das Bereitstellen der geeigneten Spulengeometrie. Weiter sollte auch die hohe Dynamik des Systems beachtet werden da das System während des Aufheizprozesses nicht als eingeschwungen betrachtet werden kann.

Ausgangspunkt des Spulendesigns die sogenannte Fermat-Spule. Mathematisch beschrieben wird diese Spule durch die Formel

$$r(\varphi) = a \cdot \sqrt{\varphi}.$$

Formel 4: Mathematische Beschreibung der Fermat-Spule

beschrieben. Setzt man dies in die die Formel zur Berechnung der magnetischen Feldstärke

$$d\vec{B} = - \frac{\mu_0 I}{4 \pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

Formel 5: Berechnung der magnetischen Feldstärke

ein, so ergibt sich die Feldstärke in Abhängigkeit des Spulenstroms zu

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4 \pi} \cdot (\sqrt{\varphi_2} - \sqrt{\varphi_1})$$

Formel 6: Feldstärke in Abhängigkeit des Spulenstroms

Damit lässt sich theoretisch eine analytische Berechnung des magnetischen Flusses realisieren; allerdings können in solche Berechnungen die Wärmeabflussraten nach unten (ins Textil) oder zur Seite (über die Außenkanten) nicht miteinbezogen werden.

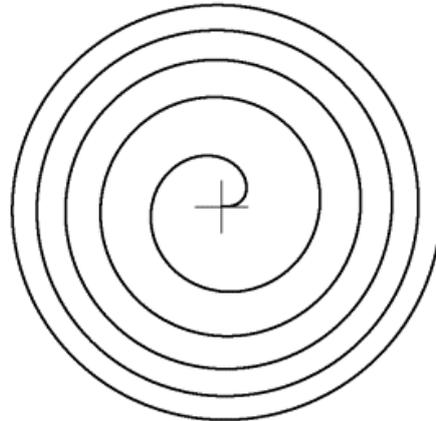


Abbildung 11: Fermat-Spule. Die Wicklungsdichte steigt von innen nach außen an.

Daher sollte die Anordnung des Heizelements nicht nur in Bezug auf die optimale Spulengeometrie, sondern auch in Bezug auf die Dimensionierung und Materialwahl des Heizbleches, welches die Spule zu einem Heizelement ergänzt, in einem kombinierten Ansatz aus Messungen am Labormuster und begleitenden Simulationen (Schwerpunkt Kooperationspartner HS Offenburg) komplett neu entwickelt werden. Über die gezielte Variation der Wicklungsdichte in Abhängigkeit der Position auf der Heizfläche (außen dicht, innen weniger dicht) sollte so trotz des unterschiedlichen Wärmeabflusses dann über eine temperaturbasierte Feldregelung eine homogene Erhitzung des Emblemklebers sichergestellt werden.

Dafür wurde zunächst der in Abbildung 12 dargestellte einfache Aufbau im Simulationsmodell nachgebildet und anschließend im Simulationsmodell untersucht. Die Spule wurde mit einer virtuellen Stahlplatte unterlegt, die über Induktion dann erwärmt werden sollte.

Erste Funktionstests des Modells zeigt Abbildung 13. Die Kopplung der Simulationslöser (Elektromagnetisch für die Wirbelströme sowie den Thermal Solver für die Wärmeverteilung) war erfolgreich; allerdings konnte in den Untersuchungen – im Gegensatz zum Experiment – keine wesentliche Inhomogenität der Temperaturverteilung in der Stahlplatte erzeugt werden.

Da der Ansatz, die optimale Spulengeometrie über Simulationsuntersuchungen zu ermitteln, damit nicht zielführend war, erfolgte eine experimentelle Untersuchung eines optimalen Heizelemente-Aufbaus durch die Partner Thermotex und KogiTek.

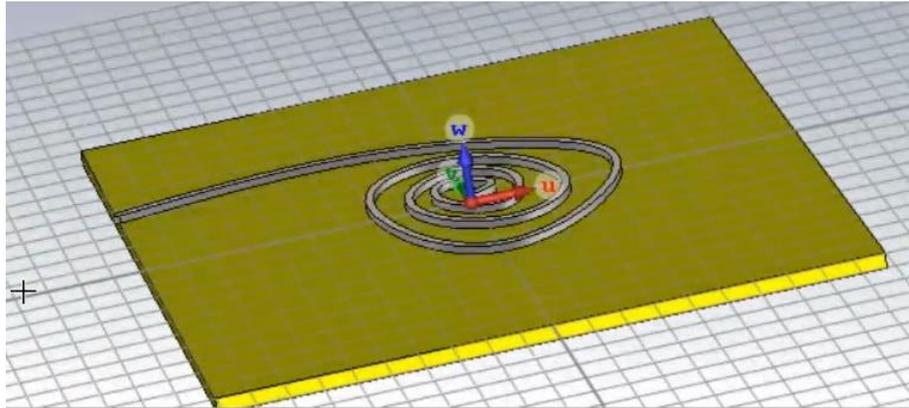


Abbildung 12: Simulationsmodell des Partners HSOG

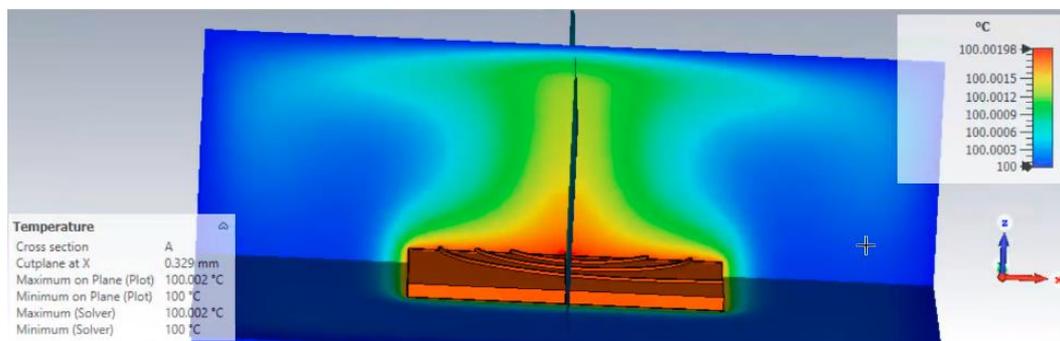


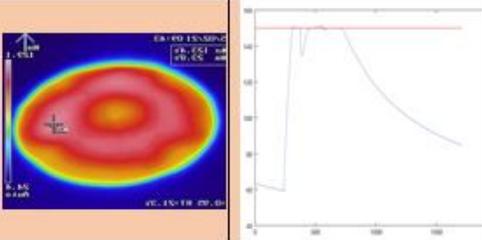
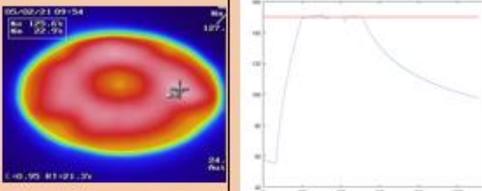
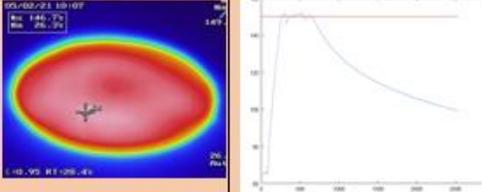
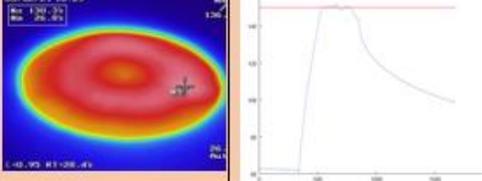
Abbildung 13: Ergebnis der FEM-Simulation der Temperaturverteilung

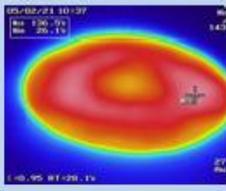
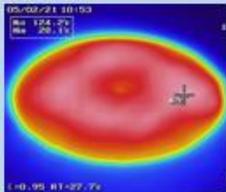
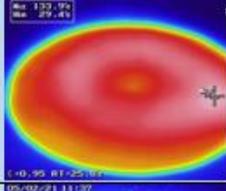
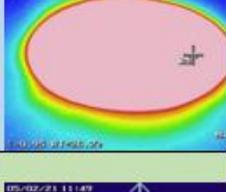
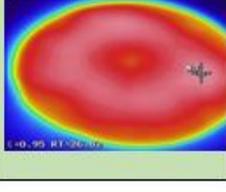
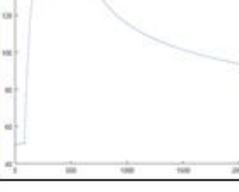
Die Ergebnisse der experimentellen Arbeiten sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Homogenisierung wurde über eine Kombination unterschiedlicher Materialien in einer Heizplatte erreicht. Die Heizplatte wurde dabei mit einer dünnen Aluminiumplatte kombiniert. Da Aluminium ein deutlich besserer Wärmeleiter als Stahl ist, verteilt diese Platte die vom Stahl erzeugte Wärme gleichmäßig. Es ist zu beachten, dass die Wärme bei dicken Blechen gleichmäßiger verteilt wird, andererseits aber die Aufheizdauer zunimmt. Um hier eine geeignete Kombination zu finden, wurde eine Messreihe mit verschiedenen Blechdicken und Zusammenstellungen durchgeführt.

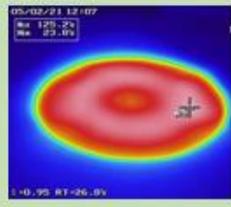
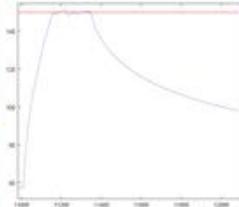
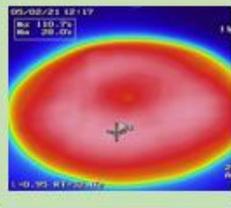
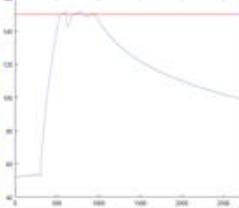
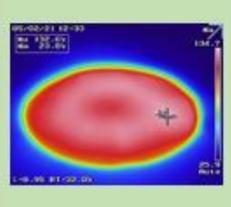
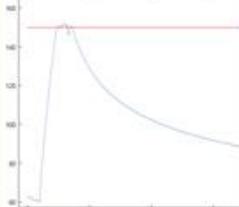
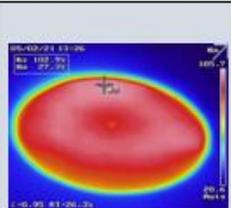
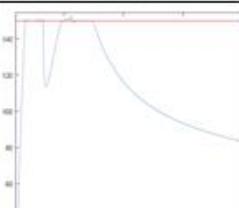
Im Ergebnis zeigte sich, dass ein dünnes Blech für eine schnelle Aufheizung mit einem eher dickeren Aluminium für eine gute Homogenität kombiniert werden sollte. Daher wurden für weitere Tests ein 0.5 mm Stahl- und ein 2 mm Aluminiumblech verwendet.

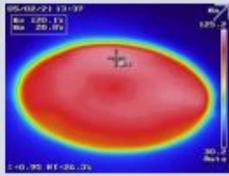
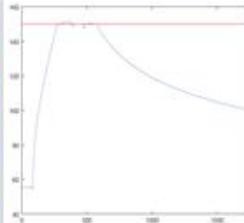
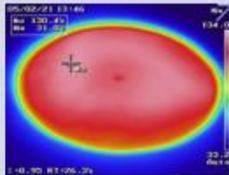
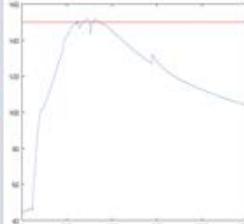
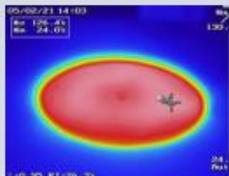
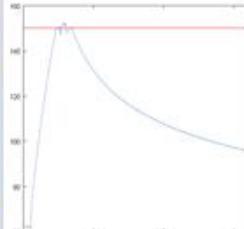
Ein weiterer großer Schritt in Richtung Homogenität war das flächige Verkleben dieser zwei Bleche mit Wärmeleitkleber. Dies brachte auch einen großen Fortschritt bei der Temperaturmessung, da auch im offenen Zustand die Temperatur der Aluplatte gemessen wurde. Zuvor wurden die beiden Platten erst beim Schließen der Maschine richtig aneinander gedrückt und der Wärmeaustausch konnte erst dann richtig funktionieren.

Tabelle 1: Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Heizplattenentwicklung

Nr.	Stahl		Alu				Aufheizdauer		Abkühldauer bis 100°C		Temperatur-einbruch	Dauer für Nachregelung	Homogenität	IR-Bild	
	0,5 mm	1mm	0,3mm	0,5mm	0,8mm	2mm	offen	geschlossen	offen	geschlossen					
1	1		1				6,6s		54s		135°C	6s	Nicht gut		
2	1		1					13,3s		54s			Nicht gut		
3		1	1				17,8s			180s	146°C	3,3s	Ok		
4		1	1					19,3s		81s			Ok		

5	1		1			7,8s		89s		117°C	8,7s	Nicht gut		
6	1		1			13,1s		111,7s				Nicht gut		
7		1		1		18,6s		107,7s		140°C	10,6s	Gut		
8		1		1		22,8s		147s				Gut		
9	1			1		9s		97,7s		141°C	6,7s	Gut		

10	1				1		14,9s		64s			Gut			
11		1			1	23,4		172s		143°C	6,3s	Gut			
12		1			1		27,3s		145,4s			Gut			
13	1					1	6,2s		56,1		114°C	14,9s	Sehr gut		

14	1					1	19s		121,1s			Sehr gut		
15	1					1	48,2s		200s	143°C	2,5s	Sehr gut		
16	1					1	36s		198s			Sehr gut		

3.1. Systemintegration zum Demonstrator

Bei der Systemintegration wurde der Aufbau des Labormusters in eine bestehende Serienmaschine eingebaut. Hierzu wurde das Heizelement der Serienmaschine mit dem Induktionsheizelement ausgetauscht. Ausgewählt hierfür wurde eine Maschine des Typs „Spirit“ mit einer Heizfläche von 115 x 150 mm. Dabei wurde ein Sandwichaufbau mit einer als Spulenhalter fungierender Kunststoffplatte, einer Isolationsschicht aus Teflon sowie dem Heizblech aus Stahl und Aluminium realisiert, der in Abbildung 14 dargestellt ist.

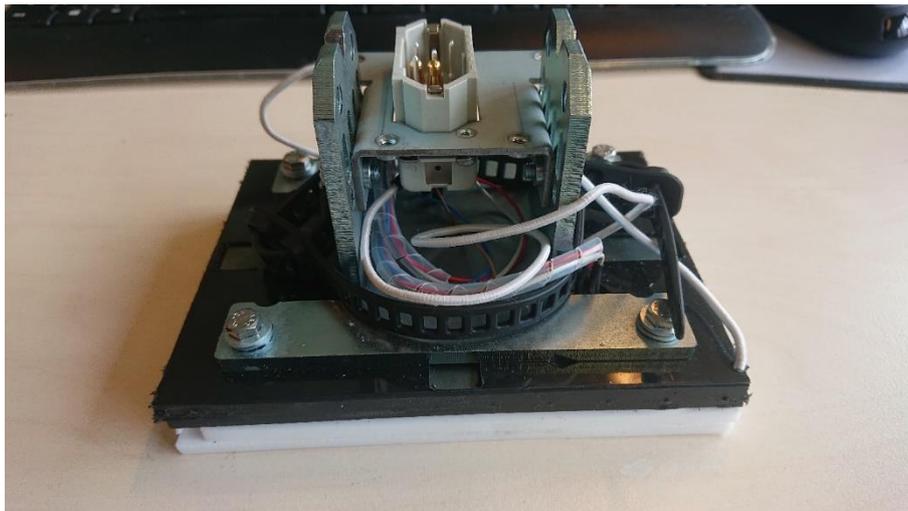


Abbildung 14: Aufbau des Heizkopfes für den Demonstrator

Der bestehenden Stecker des Serienheizelements sollte zunächst weiterverwendet werden. Daraus ergaben sich allerdings weiterführende Herausforderungen, die im nachfolgenden Kapitel detailliert dargestellt sind.

In der schwarzen Platte ist die Spule gewickelt. Der Grundriss der Spule wurde in einem CAD-Programm gezeichnet und ist in Abbildung 15 dargestellt. Man erkennt in der linken Abbildung die Taschen für die Ferrite, die eine Abstrahlung des Felds nach oben vermeiden sollen. Weiter sieht man die Löcher für die Befestigung als auch für den IR-Temperatursensor, welcher hinter der Platte platziert werden soll. Dieser hat einen Öffnungswinkel von 5° und damit in 40 mm Entfernung eine Messbreite von 7 mm. Auf der rechten Seite sieht man die Unterseite der Platte und erkennt die Spule. Die Löcher wurden in dem Versuch eine möglichst dichte Wicklung beizubehalten umfahren. An den Enden der Spule sind Durchführungen zur Rückseite vorgesehen um die Leitung zurück zu führen.

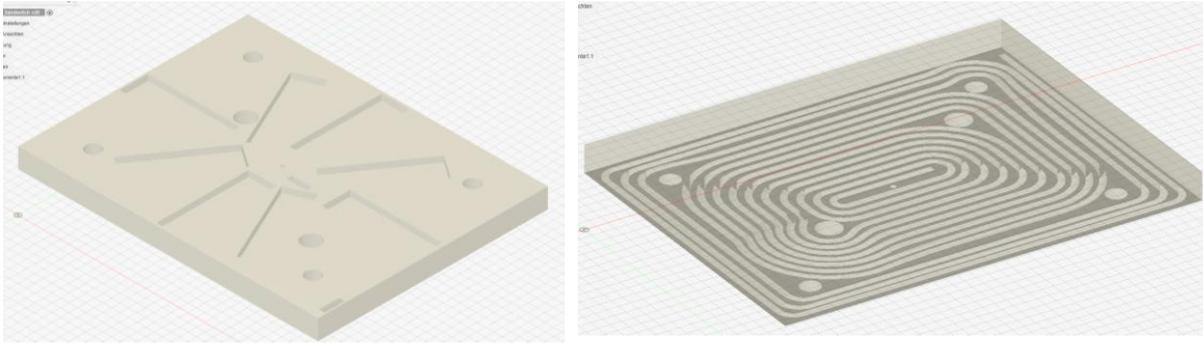


Abbildung 15: CAD-Repräsentation des Spulengrundrisses

In Abbildung 16 ist der erste Fräsprototyp zu sehen. Zur erleichterten Fräsbarkeit wurde dieser in einem Stück Sperrholz gefräst. An diesem Prototyp konnte die Spulenbreite sowie die Lochgrößen verifiziert werden bevor anschließend die Kunststoffplatte gefräst wurde.

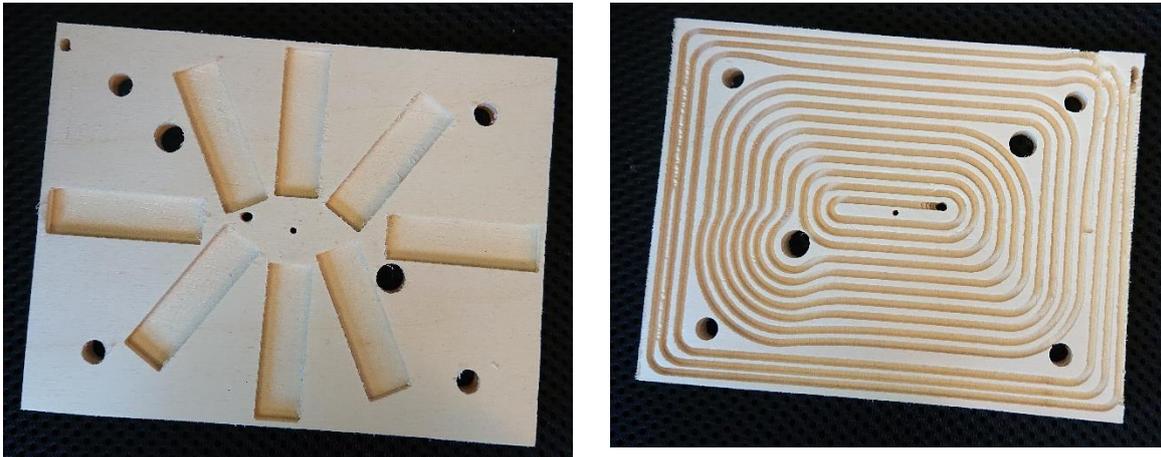


Abbildung 16: Erste gefräste Grundplatte mit Spulengrundriss und strukturierter Oberseite

Die Fertigung der Platte ist in Abbildung 17 dargestellt. Man erkennt die Spanbildung, welche auf diesem Bild ideal waren. Ist die Drehzahl zu hoch eingestellt, so erhitzt der Fräser zu sehr und das Kunststoff schmilzt, ist die Drehzahl zu langsam werden die Späne nicht schnell genug abtransportiert und der Fräser bricht ab. Daneben ist die Wicklungsvorrichtung zu sehen welche eigens für dieses Projekt entwickelt wurde. Diese erleichtert das Wickeln der Spule deutlich.



Abbildung 17: Momentaufnahmen: Produktion der Heizplatte. Fräsvorgang (links), Wicklung der Spule (rechts)

Unter die Spule wurde eine Teflonplatte als Isolationsschicht geschraubt. In dieser Teflonplatte sind Magnete eingeklebt, welche das Heizblech halten. In der folgenden Abbildung sieht man den Stecker des Serienheizelements. Hier wurden vier Serienpins für die Temperaturmessung verwendet. Für die Spulenleitungen wurden dicke Bananenstecker eingebaut, da die Serienpins für diese Ströme nicht zugelassen sind.

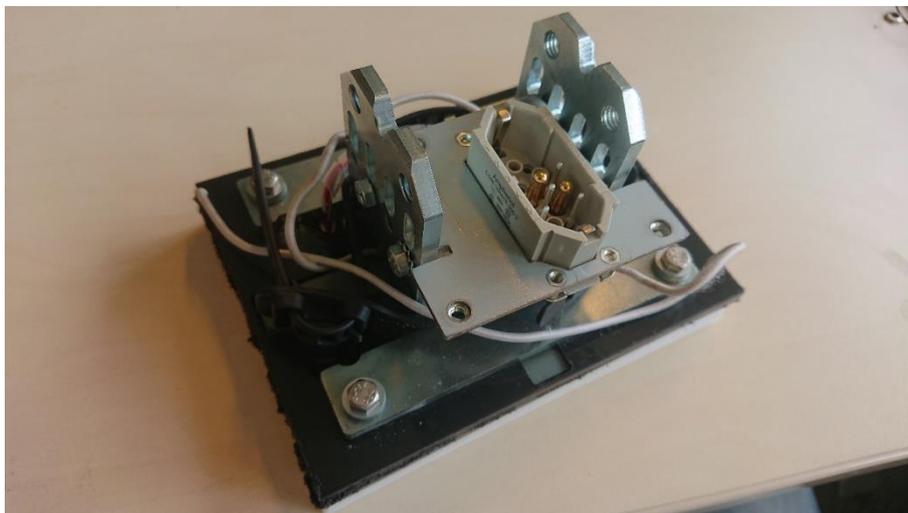


Abbildung 18: Heizelement - Detailansicht

Die Steuerplatine sollte im Innenraum der Maschine platziert werden. Dies ist Abbildung 19 zu sehen.

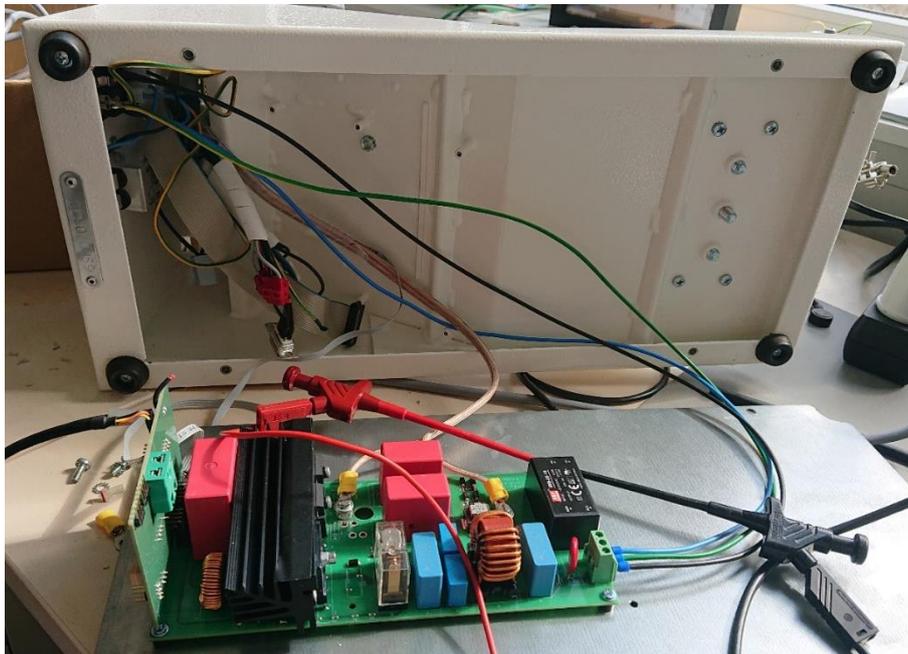


Abbildung 19: Integration der Steuerplatine in den Innenraum der Maschine

3.1.1. Herausforderungen bei der Systemintegration

EMV

Beim Labormuster wurde die Platine direkt neben die Spule platziert. So waren die Leitungslängen von Temperatursensor und Spule sehr kurz. Bei der Serienmaschine wurde die Platine in den Boden der Maschine gebaut und die Leitungen führten durch den Maschinenarm bis zum Heizkopf. Die Schirmung dieser langen Leitungen ist eine sehr große Herausforderung: Die hohen Pulsströme der Induktionsspule (ca. 100 A bei 25 kHz) störten den Temperatursensor zunächst derart, dass ein Betrieb der Maschine ausgeschlossen war. Auch die Datenübertragung an den PC über ein serielles Kabel wurde durch die Störungen stark gestört. Einige Temperatursensoren sind durch Überspannungseffekte auf diese Weise sogar kaputtgegangen. Bei der Optimierung wurde daher die Abschirmung der Spulenleitungen deutlich optimiert.

Temperaturmessung

Beim Labormuster wurde der Temperatursensor direkt hinter dem Blech positioniert. Bei diesem Aufbau wurde der Sensor weder vom Feld noch von den EMV Effekten gestört. Beim Neuaufbau wurde der Sensor in die Teflonplatte platziert. Jedoch erhitze diese sich so stark, dass der Sensor über die 85° C seiner spezifizierten maximalen Betriebstemperatur erhitze.

Daher musste für die Optimierung ein Sensor mit schmalen Öffnungswinkel herausgesucht werden. Der schmalste Öffnungswinkel beträgt bei diesem Sensortyp 5° was einer Messbreite von 7 mm in 4 mm Entfernung entspricht. Dadurch ist es möglich, den Sensor hinter die Spulenplatte zu platzieren wobei er kaum Wärmeeinflüsse verspürt. Diese Änderung sollte ebenfalls bei der nächsten Optimierungsstufe vorgenommen werden.

Stabilität

Die verwendeten Teflonplatten sind zwar sehr hitzeresistent, jedoch bei hohen Temperaturen nicht mehr steif. Diese sollten bei der nächsten Optimierung durch Glasfaser Verbundwerkstoffe ersetzt werden.

Haltemagnete

Beim Labormuster wurden die Bleche über Seltenerd-magnete gehalten. Dies wurde auch bei der Systemintegration so umgesetzt. Allerdings reizten wir hier die Temperaturbereiche bis 220°C voll aus wobei wir über die Currie Temperatur der Magnete kamen und diese in ihrer Haltekraft deutlich nachgelassen haben. Bei der nächsten Optimierung soll das Heizblech entweder durch die Teflonfolie gehalten werden oder durch Abkanten des Blechs als Einschub realisiert werden.

3.2. Optimierter Aufbau

Im nächsten Schritt wurde der Aufbau des Demonstrators basierend auf den in Kapitel 3.1.1 dargestellten Herausforderungen optimiert.

Um die EMV Probleme zu reduzieren wurden die Schwingkreisleitungen in einem Schirmgeflecht verlegt und der Serienstecker durch eine Durchführung ersetzt. Dadurch konnten die Leitungen in einem Stück von der Heizplatte bis zur Ansteuerungsplatine verlegt werden. Auch für den Sensor wurde ein geschirmtes Kabel verwendet. Die Schirmenden wurden jeweils mit der Maschinenmasse verbunden um eine bestmögliche Abschirmung zu erreichen.

Der IR-Temperatursensor wurde nicht mehr in das Feld und in die Isolationsplatte platziert, sondern schaut wie bereits beschrieben mit einem Öffnungswinkel von ca. 5° hinter der Spulenplatte platziert durch ein Loch von hinten auf das Heizblech. Somit bleibt die Temperatur des Sensors auch bei Dauerbetrieb im spezifizierten Bereich.

Eine weitere wichtige Optimierung war der Materialwechsel der Isolationsplatte. Statt der bisher verwendeten Teflonplatte wurde nun ein Glasfaserverbundstoff (TSE 8) verwendet. Dieser weist eine hohe thermische Isolierung und eine hohe Festigkeit auch bei hoher thermischer Beanspruchung auf. In diese Platte wurden 4 Sacklöcher für Einschraubhülsen

zur Befestigung geplant. Weiter wurden die zwei Löcher für die verschiedenen Positionen des Temperatursensors vorgesehen als auch vier Sacklöcher für die Magnete. Hier sollte noch einmal getestet werden, ob die nun 2 mm starke Isolation zwischen Heizplatte und Magnet die Erwärmung bis zur Curie-Temperatur verhindert. In Abbildung 20 ist die CAD-Zeichnung dieser Platte zu sehen. Man erkennt, dass auf der Unterseite lediglich die beiden Löcher für den Temperatursensor zu sehen sind und die Platte sonst flächig geschlossen ist. Dies soll die Druckverteilung beim Patchvorgang optimieren. Die beiden 9 mm großen Löcher sollten dennoch keine Druckminderung bedeuten, da das Blech mit 2.5 mm Dicke den Druck an diesen Stellen aufrechterhalten sollte.

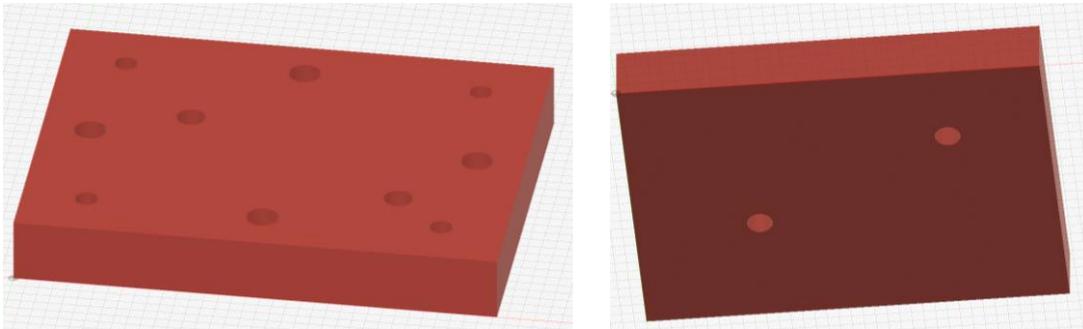


Abbildung 20: CAD-Zeichnung der modifizierten Grundplatte

Zusätzlich wurde im Neuaufbau eine ohnehin für den Betrieb benötigte Teflonfolie über Federn vor das Blech gespannt. Dadurch wird das Blech einfach in Position fixiert. In Abbildung 21 und Abbildung 22 ist der Neuaufbau zu sehen.

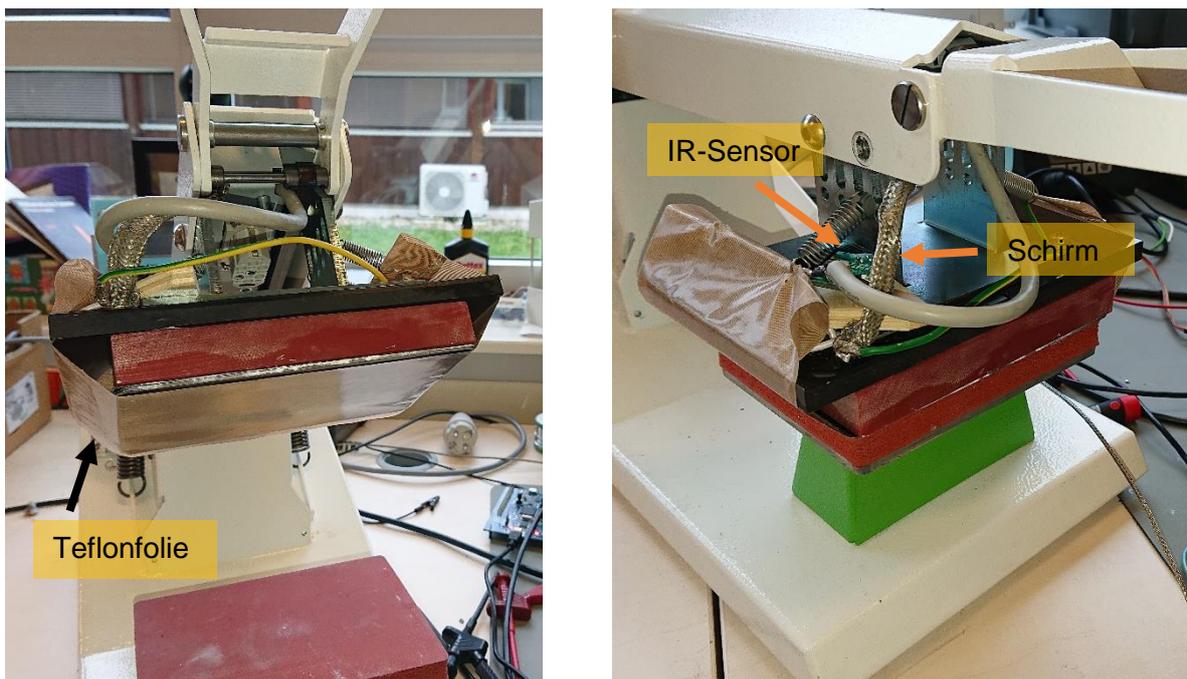


Abbildung 21: Neuaufbau mit Teflonfolie über dem Heizblech

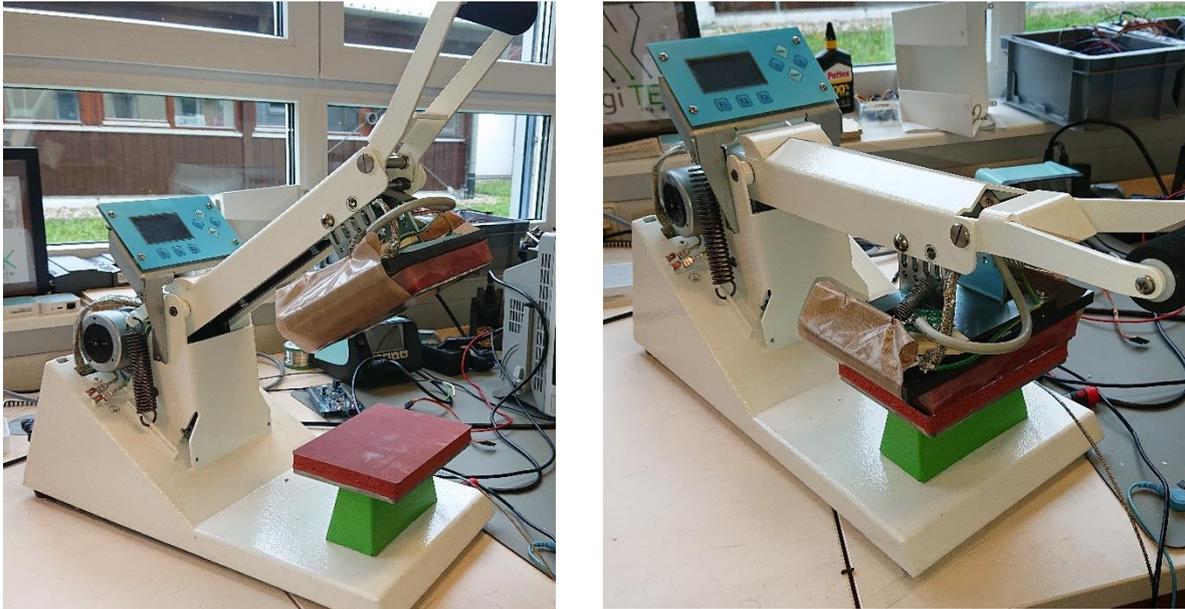


Abbildung 22: Gesamtansicht des Demonstrators

3.2.1. Weiterer Optimierungsbedarf

Die in Kapitel 3.1.1 genannten Probleme wollten wir an dieser Stelle noch einmal aufgreifen und beschreiben welche dieser Probleme mit den Änderungen gelöst wurden und welche weiter bestand haben.

EMV

Die EMV Problematik blieb weiterhin bestehen. Das Schirmgeflecht alleine reicht leider nicht aus um die Störung zu vermeiden. Damit die Maschine dennoch getestet werden konnte, wurde das Heizelement zu den Messzeiten abgeschaltet, damit der Sensor durch die hohen Ströme nicht gestört wird. Hierfür wird mit einem Optokoppler die Netzspannung auf Nulldurchgänge untersucht und nach 4 durchlaufenen Nulldurchgängen wird im Nulldurchgang das Heizelement abgeschaltet. Dann wird auf den nächsten Nulldurchgang gewartet damit die Felder sich weitestgehend abgebaut haben und gemessen. Nach der Messung wird wiederum ein Nulldurchgang abgewartet um das Heizelement wieder einzuschalten. Die Nulldurchgänge werden abgewartet um hohe Einschaltströme zu vermeiden. Dies würde die IGBT Transistoren unnötig belasten. Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass man mit nur wenig EMV Störung die Maschine betreiben kann. Nachteil ist, dass man durch das Abschalten des Heizelements in Summe nur in 60 % der Zeit heizt was wiederum zu einer Reduktion der Heizleistung führt.

Dementsprechend sollte hier bei der Umsetzung eines Prototyps eine Neuentwicklung der Elektronik durchgeführt werden, bei der Schwingkreiselektronik und Temperaturmessungsschaltung direkt in den Heizkopf integriert werden.

Temperaturmessung

Der Temperatursensor befindet sich beim neuen Aufbau oberhalb bis maximal in der Induktionsspule. Hier wird er deutlich weniger heiß. Bei laufenden Messungen erreichte er Temperaturen von maximal 55° C und ist somit im spezifizierten Arbeitsbereich.

Durch die Entfernung des Sensors zur Platte ist es aber enorm wichtig, dass der Sensor gut ausgerichtet ist. Sobald sich nur ein wenig anderes Material in dessen Sichtfeld befindet ist der Messwert zu niedrig, da er Sensor eine Mischtemperatur aus Blech und Umgebungsmaterialien misst. Hier müsste beim Redesign eine geeignete Halterung konzipiert werden und im besten Falle der Sensor direkt auf der Platine aufgelötet werden.

Stabilität

Die Stabilität des TSE 8 Materials ist beeindruckend. Auch bei Temperaturen über 250° C ist dieses Material noch absolut formstabil. Allerdings ist der Anschaffungspreis für solch eine Platte auch nicht günstig, so dass auch an dieser Stelle im Hinblick auf eine spätere Serienfertigung weitere Alternativen gesucht werden sollten.

Haltemagnete

Wie bereits beschrieben verlieren die Magnete bei hohen Temperaturen ihre Haftwirkung. Da beim neuen Aufbau und später auch beim Redesign eine Teflonfolie vor das Blech gespannt wird ist dies jedoch kein Problem mehr.

3.3. Energetisches Einsparpotential der Maschine

Der aktuelle Aufbau ist aufgrund der EMV Probleme auf 700 W begrenzt, daher beträgt die Aufheizdauer aktuell bei geöffneter Maschine circa 8 s, bei geschlossener Maschine circa 30 s.

Abbildung 23 zeigt den Temperaturverlauf des Aufheizens und Patchens bei kalter Maschine, d. h. der Maschinentisch etc. sind initial auf Raumtemperatur. Somit entspricht dies dem Worst Case bei der Patchzeit. Man erkennt, dass die Maschine zügig aufheizt und die Temperatur im geöffneten Zustand gut halten kann. Der anschließende Temperatureinbruch kommt vom Schließen der Maschine. Hier fließt viel Wärmeenergie an den kalten Maschinentisch ab. Die Maschine kann auch hier mit maximal 700 W nachheizen weshalb es knapp 20 s benötigt bis die Maschine wieder die Solltemperatur erreicht hat.

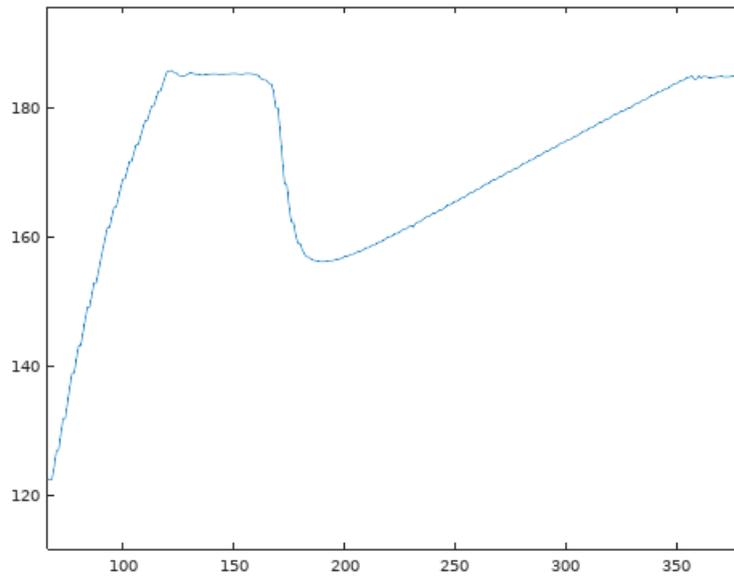


Abbildung 23: Temperaturverlauf während Aufheizen und Patchen: Detailansicht

Diese 20 s wären in diesem Fall die benötigte Patchzeit um das Emblem und den Kleber auf seine Fügetemperatur zu bekommen. Bei vorgeheiztem Maschinentisch, wie es nach einigen Patchvorgängen der Fall ist, reduziert sich diese Zeit merklich.

In Abbildung 24 ist die berechnete Leistung zu sehen. Diese wird aus den Temperaturmessdaten und den Wärmekapazitäten der Stahl- und Aluminiumplatte berechnet. Man erkennt, dass bei der Aufheizung eine Leistung von circa 700 W (teils höher aufgrund der Temperatursprünge zwischen den Messwerten) angelegt wird.

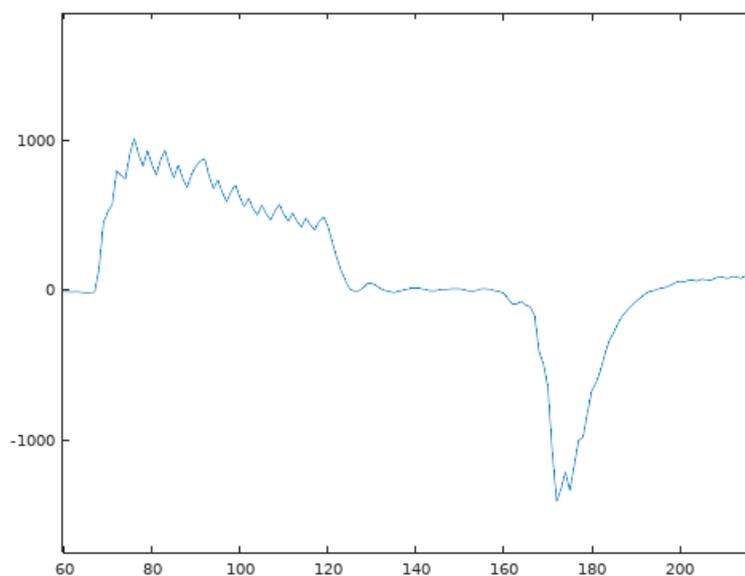


Abbildung 24: Maschinenleistung während des Patchvorgangs

Die anschließende Kerbe nach unten entspricht der Energie, die beim Schließen über den Temperaturverlust von den Platten abfließt. Man erkennt, dass diese Kurve auf etwa -1.200 W fällt. Da die Maschine durch den D-Anteil des PID Reglers direkt beim Schließen der Maschine mit 700 W nachheizt bedeutet dies, dass circa 1.900 W Heizleistung benötigt werden um einen Temperatureinbruch gänzlich zu vermeiden. Kann die Maschine wie beabsichtigt eine maximale Leistung von 1.500 W erbringen so bricht die Temperatur nur minimal ein und die Patchzeit kann auf wenige Sekunden reduziert werden.

Um das energetische Einsparpotential zu verdeutlichen wurde eine Berechnung auf Basis der Maschinenparameter angefertigt. Die erste Berechnung basiert auf dem Demonstrator mit Induktionsheizung und einer maximalen Leistung von 700 W. Die Solltemperatur ist in diesem Fall 200° C, die Aufheizdauer wurde bei beiden Maschinen gemessen und liegt bei der Spirit (Serienmodell) bei etwa 900 s, bei der Induktionsmaschine bei 30 s. Während der Abkühldauer auf 120° C wird das Heizelement nicht beheizt und verbraucht somit keine Energie. Die Patchzeit wird bei beiden Maschinen mit 20 s angenommen, wobei diese bei der herkömmlichen Patchmaschine energetisch keine Rolle spielt, da diese permanent heizt. Daher gibt es bei der konventionellen Maschine keine Wiederaufheizzeit, die Induktionsmaschine benötigt hierfür 10 s in welcher Zeit sie wieder mit voller Leistung heizt. Die Richtzeit entspricht der Zeit in der der Anwender das gepatchte Textil zusammenlegt und das neue Textil sowie das Emblem auf der Maschine ausrichtet. Diese Zeit wurde mit 3 min pro Textil angenommen. Da die Induktionsmaschine zwischen den Patchvorgängen auf 120° C abkühlen soll wird auch die Leistung benötigt um 120° C zu halten. Diese beträgt 150 W. Um die Maschine auf 200° C zu halten benötigt die Spirit 400 W, die Induktionsmaschine etwas mehr mit 500 W. Dieser Leistungsunterschied stammt von der geringeren Wärmekapazität, da bei dem dünnen Blech die Wärme schneller abfließen kann und die Umgebung durch die Pausenzeiten nicht so heiß wird wie bei der konventionellen Maschine. Da man in Summe 200 s für einen Patchvorgang benötigt (Patchzeit + Richtzeit) schafft man in 4 h 72 und an einem 8 h Arbeitstag 144 Embleme. Die Induktionsmaschine wird während der Pause ausgeschaltet, die konventionelle Maschine läuft erfahrungsgemäß in der 30 min Mittagspause aufgrund der langen Aufheizphase durch.

Tabelle 2: Energieeffizienz Demonstrator: Überschlagsrechnung Arbeitstag, Vergleich zu Serienmaschine

	Spirit	Induktionsmaschine	
Maximale Leistung [W]	700	700	
Temperatur [°C]	200	200	
Aufheizzeit	900	30	
Abkühldauer auf 120°C		120	
Wiederaufheizzeit	0	10	
Patchzeit	20	20	
Richtzeit	180	180	
Leistung 120°C halten [W]		150	
Leistung 200°C halten	400	500	
Arbeitstag:	Aufheizen		
	4h Patchen	72	Embleme in 4h
	30min Pause		
	4h Patchen		
==> 144 Embleme pro Tag			
Aufheizenergie [Wh]	175	5.833333333	
Arbeitsenergie pro Patch [Wh]		7.222222222	
Arbeitsenergie [Wh]	3400	1040	
Gesamtenergie Arbeitstag [kWh]	3.575	1.045833333	
Energieverhältnis Induktion zu konventionell	29.25%		
Energieeinsparung	70.75%		

Der Patchvorgang verläuft wesentlich effizienter aufgrund der kurzen Aufheizphase bei er Induktionsmaschine. Die Energie pro Patch setzt sich zusammen aus der Wiederaufheizzeit, in welcher mit voller Leistung geheizt wird, und danach direkt der Patchvorgang beendet werden kann, da man aufgrund der dünne des Blechs auch weiß, dass die Fügetemperatur direkt am Textil anliegt. Dazu kommt die Energie während der Richtzeit welche die Richtzeit abzüglich der Abkühldauer multipliziert mit der Halteleistung für 120° C entspricht. Diese Energie multipliziert mit der Anzahl an Patchvorgängen an einem Arbeitstag zuzüglich 2x der Aufheizenergie entspricht der benötigten Tagesenergiemenge. Bei der konventionellen Maschine entspricht die Tagesenergiemenge der Aufheizenergie zuzüglich der Halteenergie bei 200° C multipliziert über 8 h. Dies ergibt eine Energieeinsparung von über 70 %.

In wurde die gleiche Berechnung mit einer (noch unrealisierten) Induktionsmaschine mit 1.500 W Heizleistung durchgeführt. Hier reduziert sich die Aufheiz- und Wiederaufheizdauer. Daraus ergibt sich ein noch größeres Einsparungspotential von über 75 %.

Tabelle 3: Aufstellung Energieverbrauch - prognostizierte Serienmaschine gegen Stand der Technik

	Spirit	Induktionsmaschine
Maximale Leistung [W]	700	1500
Temperatur [°C]	200	200
Aufheizzeit	900	15
Abkühldauer auf 120°C		120
Wiederaufheizzeit	0	5
Patchzeit	20	10
Richtzeit	180	180
Leistung 120°C halten [W]		150
Leistung 200°C halten	400	500
Arbeitstag:	Aufheizen	
	4h Patchen	Embleme in
	30min Pause	72 4h
	4h Patchen	
==> 144 Embleme pro Tag		
Aufheizenergie [Wh]	175	6.25
Arbeitsenergie pro Patch [Wh]		5.972222222
Arbeitsenergie [Wh]	3400	860
Gesamtenergie Arbeitstag [kWh]	3.575	0.86625
Energieverhältnis Induktion zu konventionell	24.23%	
Energieeinsparung	75.77%	

3.4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Der im Rahmen des Projekts realisierte Demonstrator beweist die potentielle Leistungsfähigkeit des Systems. Für eine tatsächliche Markteinführung muss die Konstruktion umfassend überarbeitet werden. Dabei sollte die Hochfrequenz-Elektronik in den Maschinenkopf integriert werden, um die strengen EMV-Bestimmungen für eine Verwendung im industriellen Umfeld einzuhalten.

Obwohl diese Entwicklungsarbeiten noch mit erheblichen technischen Risiken in Bezug auf die EMV-Festigkeit, die mechanische Stabilität sowie das Thermomanagement behaftet sind, lassen die bislang durchgeführten Untersuchungen diese Weiterentwicklung als äußerst attraktiv erscheinen.

Die Vorteile einer solchen Maschine sowie die höhere Effizienz und Flexibilität ermöglichen die Durchsetzung eines um ca. 30% höheren Anschaffungspreises im Vergleich zu herkömmlichen Maschinen. Nach jetzigem Stand ist zu erwarten, dass sich die Marge beim Vertrieb solcher Maschinen geringfügig erhöhen könnte.

Zusätzlich zur Erhöhung der Gewinnmarge für die Patchmaschinen ergeben sich potentiell zusätzliche Marktanteile gerade bei Kunden, für die die Flexibilität (ohne Aufheizphase) sowie den schonenderen Patchvorgang der Maschinen ausschlaggebende Argumente für die Kaufentscheidung sind.

Basierend auf unserem aktuellen Marktzugang und fortlaufender Marktbetrachtung erwarten wir durch die Realisierung eines entsprechenden Systems ein Umsatzwachstum im Geschäftsbereich von etwa 20% nach Markteinführung.

Für unsere Kunden ergeben sich durch die Einführung solcher Maschinen Effizienzgewinne im Bereich von ca. 70%. Daraus ergeben sich Amortisationshorizonte für die Mehrkosten im Bereich von ca. 3 Jahren. Ausgehend von durchschnittlichen Nutzungsdauern der Maschinen von 10 Jahren und mehr stellt dies für unsere Kunden eine äußerst attraktive Möglichkeit dar, die Energieeffizienz der eigenen Anlagentechnik nachhaltig zu steigern.

4. Fazit

Das Energieeinsparungspotential der Maschine ist beachtlich und resultiert hauptsächlich aus den geringeren Heizzeiten - zwischen den Patchvorgängen beim Abkühlen benötigt das System gar keine Energie; beim Halten der reduzierten Temperatur deutlich weniger Energie als die konventionelle Maschine. Die vorab geplante Abschaltung zwischen den Patchvorgängen wurde zur Projektlaufzeit verworfen da sonst die Patchzeiten länger als bei der konventionellen Maschine wären und dies mit maßgebender Faktor bei den Kunden ist.

Der zum Projektende vorliegende Demonstrator zeigt, dass die Induktionstechnologie auch im industriellen Prozess „Textilpatchen“ trotz hohem Kosten- und Effizienzdruck tatsächlich umsetzbar ist und zu wesentlichen Energieeinsparungen führen könnte.

Große Entwicklungsherausforderungen verbleiben jedoch trotz des in diesem Bericht dargestellten „Proof of Principle“: Insbesondere die Realisierung eines Elektronik- und Maschinendesigns, in dem die großen elektromagnetischen Felder zuverlässig geschirmt und damit beherrscht werden können, ohne die Leistung der Maschine zu begrenzen, bedarf noch umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.