

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht EffiBlech

CO₂ effiziente elektrische Antriebe – Entwicklung einer industrietauglichen Prozesskette von gedruckten Magnetblechen (vom Pulver bis zum Bauteil)



Förder-Nummer 03EN4013

Verbundpartner:

- Siemens AG, Foundational Technologies, München (Koordinator)
- ASYS Group, EKRA Automatisierungssysteme GmbH
- Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Institutsteil Dresden
- Optonic GmbH, Freiburg im Breisgau
- MUT Advanced Heating GmbH, Jena
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS), Erlangen

Laufzeit des Verbundvorhabens:

Datum Bericht:

von: 01.06.2021

bis: 30.11.2024

27.06.2025

Inhalt

1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzungen des Vorhabens	3
3. Planung und Ablauf	4
3.1. Erstellung des Pflichtenheftes	4
3.2 Zusammenarbeit der Partner	4
4. Wissenschaftlich-technischer Stand: Zusammenfassung	5
5. Erzielte Ergebnisse: ausführliche Darstellung	6
5.1 Entwicklung Druckprozess.....	6
5.2 Anlagenentwicklung Siebdruck	11
5.3 Entwicklung Qualitätssicherung	18
5.4 Anlagenentwicklung Sinterprozess	28
5.5 Thermische Prozesse - Entwicklung und Einsatz für Mustermotor.....	33
5.6 Konzept für die industrielle Einführung.....	39
5.7 Weiterverarbeitung der gesinterten Bleche (Isolation, Handling) und Aufbau des Stators	54
5.8 Berechnung des Primärenergieverbrauchs und des CO ₂ -Footprints	73
Industrialisierungsprozess Primärenergieverbrauch.....	78
6. Nutzungspotentiale der gedruckten Bleche	82
Energieeinsparung in der Herstellungs- und Nutzungsphase von el. Maschinen	82
7. Veröffentlichungen der Ergebnisse	85

1. Aufgabenstellung

Elektrische Antriebe in Industrieanwendung die zunehmend auch in Automobilen eingesetzt werden weisen bereits eine hohe Energieeffizienz in der Energieübertragung auf. Dennoch sind höhere Effizienzklassen ein Schlüsselement zur Verringerung der kumulierten Verluste von Elektromotoren, die fast 40% des Energieumsatzes der bereitgestellten elektrischen Energie im Energienetz von Industrienationen ausmachen. Neben den Ohm'schen Verlusten in den Spulen der Elektroantriebe sind auch el-magn. Verluste in den Statoren aus Elektroblechen ein wesentlicher Faktor. Bisher gängige Elektrobleche für Motoren (sog. nicht-kornorientierte FeSi-Bleche) werden in einem aufwändigen mehrstufigen Verfahren mit mechanischen Umformprozessen und Wärmebehandlungsschritten hergestellt, um die gewünschten geometrischen und elektro-magnetischen Eigenschaften zu erzielen.

Seit den 1990er Jahren werden in einem pulvermetallurgischen Ansatz weichmagnetische Komponenten für Motorkerne in einem Press- und Wärmebehandlungsprozess hergestellt sog. SMCs (soft magnetic composites). Diese sind jedoch aufgrund ihrer geringen mechanischen Festigkeit und ungünstigeren Verlusteigenschaften in die in der radialen Flussrichtung für die überwiegende Zahl an Motortypen als Statorkerne nicht geeignet.

Aufgrund der o.g. Nachteile der klassischen Elektroblech-Technologie und des SMC-Ansatzes wurde im Projekt die neuartige flexiblen, pulvermetallurgisch-drucktechnischen Herstellungsrouten durch Siebdruck weiterentwickelt. Dabei sollten fertigungstechnische Herausforderungen adressiert werden, um die Herstellung der auf diese Weise prozessierten Motorkomponenten auf eine höhere Automatisierung und Qualität und Reproduzierbarkeit zu heben und Abschätzungen zur Energieeinsparung des Herstellprozesses zu ermöglichen. Gleichzeitig sollte eine Prototypfertigung von Statoren ermöglicht werden und die Vorteile des neuartigen Herstellprozesses in einem Motordemonstrator gezeigt werden.

2. Voraussetzungen des Vorhabens

Gemäß Energiekonzept 2010 und Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung soll durch den Übergang auf elektrische Antriebe die Menge entstehender Treibhausgase um mindestens 80 % gegenüber dem Jahr 1990 sinken.

Die bereits erwähnten konventionell gefertigten Elektrobleche für E-Motoren (sog. nicht-kornorientierte FeSi-Bleche) werden in einem aufwändigen mehrstufigen Verfahren mit mechanischen Umformprozessen und Wärmebehandlungsschritten hergestellt, um die gewünschten geometrischen und elektro-magnetischen Eigenschaften zu erzielen. Folgende Einschränkungen ergeben sich bei der Herstellung:

- Aufgrund der momentan verwendeten Walz- und Stanztechnologien sind Standard-Elektrobleche ca. 300 – 500 µm dick. Die Dicke der Elektrobleche hat einen direkten Einfluss auf Wirbelstromverluste. Je dünner ein Blech ist, desto geringer sind die Wirbelstromverluste. Eine Reduzierung der Blechdicke gelingt im konventionellen Herstellprozess nur unter hohem Aufwand und Kosten, so dass effizientere Bleche nicht in großem Stil in Motoren Einsatz finden.
- Die Formgebung für Rotor oder Stator, der sog. Blechschnitt wird durch subtraktive Prozesse wie Stanzen oder Laserschneiden erreicht, wodurch ein erheblicher Anteil von bis zu 50 % des

bereits vollständig prozessierten Elektroblechs als Verschnitt bzw. Abfall einer erneuten Aufbereitung zugeführt werden muss.

3. Planung und Ablauf

Die Planung für die Arbeitspakete mit den jeweils beteiligten Partnern wurde auf die notwendige Übergabe von Ergebnissen für das Industrialisierungskonzept sowie den Aufbau eines Blechpaketes in neuer Technologie für einen Muster-Motor aufgestellt. Die Verzögerung an diesen Schnittstellen war Hauptursache der notwendigen Verlängerung um ein halbes Jahr.

Arbeitspakete (AP)	Leiter	beteiligte Partner						1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr				4. Jahr		PM	
		SI	IF	EK	OP	MU	FA	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II		
1	Pflichtenheft	SIE	X	X	X	X	X																3
2	Pulveranpassung	IFAM	X																				26
3	Herstellung Bleche	IFAM	X																				37
4	Siebdruckanlage	EKRA																					61
5	Qualitätskontrolle und Handlingsysteme	OPT	X		X																		47
6	Wärmebehandlung	MUT	X	X																			43
7	Demonstratormotor	SIE	X	X	X																		16
8	Industrialisierungs-konzept	FAPS	X	X	X	X	X																36
9	Isolation und Weiterverarbeitung	SIE						X															49
10	CO ₂ -Footprint	FAPS	X	X	X	X	X																7
	Meilensteine												MS1					MS2				MS3	→

3.1. Erstellung des Pflichtenheftes

Zusammen mit allen Partnern des Förderprojekts wurde zunächst ein Pflichtenheft für die einzelnen Teilaufgaben erstellt, so dass nicht nur eine detaillierte technische Aufgabenstellung erarbeitet, sondern auch die Grundlage für die intensive Zusammenarbeit der Partner gelegt werden konnte. Die einzelnen Aufgabenstellungen und die Umsetzung des Pflichtenhefts sind in den jeweiligen Kapiteln zu den erzielten Ergebnissen dargestellt.

3.2 Zusammenarbeit der Partner

Zur Erstellung des Pflichtenheftes wurden bereits zu Beginn des Projektes sog. Projekt-Cluster definiert, in denen die jeweils eng zusammenhängenden Themenschwerpunkte durch die beteiligten Partner gemeinsam erarbeitet werden sollten (Abb. 1). Dies wurde auch über die Erstellung der Anforderungen hinaus weitergeführt, so dass in regelmäßigen Cluster-meetings die Ergebnisse und neue Erkenntnisse besprochen, und das weitere Vorgehen abgestimmt werden konnte. Die Berichterstattung erfolgt in den Arbeitspaketen, im Schwerpunkt durch die im Antrag verantwortlich gezeichneten Kooperationspartner.

Die Zusammenarbeit der Partner im Verbundprojekt war überaus zielorientiert. Die Motivation aller Projektmitarbeiter konnte über die gesamte Projektlaufzeit auf einem sehr hohen Stand gehalten werden. Jeder Projektpartner hat sich als Technologieführer auf seinem Themenbereich bewiesen.

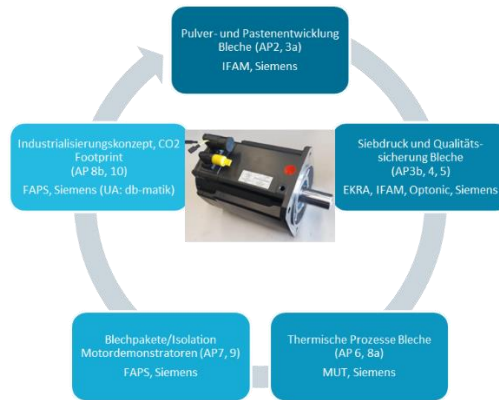


Abb. 1 Projekt- Cluster für die Bearbeitung der Themenschwerpunkte

4. Wissenschaftlich-technischer Stand: Zusammenfassung

Im Rahmen der Aufgabenstellung konnten die Ausgangsmaterialien (Eisenpulver, Additive und Hilfsstoffe), charakterisiert, den funktionalen und prozess-technischen Anforderungen entsprechend weiterentwickelt und angepasst werden. Ebenso wurden Siebdruckparameter für die Magnetbleche optimiert. Nachdem die geplante Siebdruckanlage für höheren Durchsatz und für größere Flächen entwickelt war, konnten Bleche für den Aufbau des Motormotors (Stator) gedruckt werden. Das Projekt konnte daher auch einen Grundstein für die Fertigung von massenproduktionstauglichen Siebdruckanlagen zur Herstellung von gedruckten Magnetblechen zum Einsatz in CO₂ effizienten elektrischen Antrieben legen. Zur Qualitätskontrolle an der Siebdruckanlage stand das neu entwickelte und im Labor getestete optische System zur Bestimmung von geometrischen Daten, insbesondere zur Überwachung der Blechdicke und deren Homogenität zur Verfügung. Hierbei konnten mit den neu entwickelten B-Serie Messkameras die angestrebte Messgenauigkeit von ca. 5µm erreicht werden. Die skalierbare Auslegung des Systems ermöglichte bereits beim Einsatz von zwei Kameras die Vermessung von 33% der Druckteile direkt im Anschluss an den Trocknungsvorgang. Dies ermöglichte die Nachregelung von Druckparametern noch im laufenden Batch. Die für einen Industrialisierungsfähigen Prozess entwickelten Verbesserungen in der Sintertechnik hinsichtlich Erhöhung der Ofenbeladung und Reduzierung der Ofenzyklenzeit wurden an mehreren Batch-Öfen bei unterschiedlichen Partnern an den Prototypblechen gezeigt. Dies hat die Untersuchung der Sinterunterlage sowie des Chargieraufbaus beinhaltet. Zudem wurden Skalierungsmöglichkeiten sowohl für den Batch Betrieb als auch für einen kontinuierlichen Prozess untersucht und entwickelt. In diesem Rahmen wurde ein Demonstrator für einen quasi-kontinuierlichen Ofen entworfen und gebaut. Nach Prozessierung von Blechen unter Beteiligung aller Partner war die Anzahl der Gutteile der gesinterten Bleche für den Aufbau des geplanten Motorstators ausreichend. Der zum Projektende aufgebaute Prototyp wurde im Motorprüfstand im erwarteten Bereich qualifiziert. Das Industrialisierungskonzept, die Detailauswertung zum Energiewertstrom sowie zur CO₂-Bilanzierung wurden für die Laborlinie und die angestrebten höheren Einstiegsvolumina erarbeitet. Mittels Berechnungen und vorhandenen Stützstellen für einen kontinuierlichen Sinterprozess, konnten Extrapolationen für höhere Produktionsvolumina ein Energieeinsparpotential im Vergleich zum konventionellen Herstellungsprozess von ca. 10% aufzeigen.

5. Erzielte Ergebnisse: ausführliche Darstellung

5.1 Entwicklung Druckprozess

Ausgangsmaterialien

Das Ziel für die Optimierung skalier-fähiger Ausgangsmaterialien bestand für die Partner IFAM und Siemens darin, geeignete Eisen-basierte Pulver auszuwählen, zu beschaffen und zu charakterisieren. Das Carbonyleisenpulver erfüllte die magnetischen Spezifikationen, wobei die Koerzitivfeldstärke (Hc), die einen guten Hinweis für die Hystereseverluste des Bleches gibt, in einem günstigen Bereich (< 35 A/m) liegt. Alternative Pulver weisen aufgrund von Verunreinigungen höhere Verlustwerte auf. Mit diesen Pulvern wurden Pasten hergestellt und charakterisiert. Der gesamte Prozess erstreckte sich über den Zeitraum von Monat 4 bis Monat 22.

Die wesentlichen Erkenntnisse sind, dass die Siebdruckpaste auf ein wässriges System umgestellt werden konnte (Kostensenkung). Die Stabilität der Pasten beträgt dabei bis zu 7 Tage und die Größe der Agglomerate variiert zwischen 20 und 40 µm, abhängig vom verwendeten Mischverfahren. Die Größe der Pastenbatches wurde durch den Einsatz von Hochenergie-Dissolvern auf 10 kg je Ansatz erhöht, um wirtschaftlich Tagesmengen von bis zu 30 kg bereitzustellen.

In Kooperation von IFAM und Siemens wurden verschiedene alternative Eisenausgangspulver erworben und hinsichtlich Ihrer Eignung getestet, um eine kostengünstigere Variante mit vergleichbaren Eigenschaften zum bestehenden Prozessstandardpulver zu finden. Eine Übersicht über die Pulvereigenschaften verschiedener Hersteller und -qualitäten finden sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Kenndaten der getesteten Eisenpulver

Lfd Nr.	Hersteller	Typ	C/O-Gehalt [wt%] *	Kornform	Sinterdichte [%]	Hc [A/m]
Ref		Carbonyl		Sphärisch	>98	107
1	A	Recycelt	0,04/ 0,52	Sphärisch	>98	148
2	B	Gasverdüst	0,004/ 0,06	Sphärisch/ agglomeriert	80	133
3	B	Gasverdüst	0,007/ 0,06	Sphärisch/ agglomeriert	86	127
4	C	Elektrolytisch	<0,05 / NA	Plättchen	86	165
5	C	Elektrolytisch	<0,04 / NA	Plättchen	92	179
6	D	Carbonyl	0,03 / 0,85	Sphärisch	98	318
7	D	Carbonyl	0,03 / 1,15	Sphärisch	97	335

Alle Pulver wurden analog der Übersicht (s. Abbildung 1) charakterisiert. Alle getesteten Pulver wurden mit dem bestehenden Prozessstandardpulver verglichen. Eine Auswahl der gemessenen Daten zur Sinterdichte und den weichmagnetischen Eigenschaften (Koerzitivfeldstärke Hc) findet sich in ebenso in Tabelle 1.

Aus den Sinterergebnissen geht hervor, dass keines der alternativ getesteten Pulver eine Dichte von >95% der theoretischen Dichte erreicht und gleichzeitig eine vergleichbar niedrige Koerzitivfeldstärke wie das Standardprozesspulver aufweist.

Bei den gasverdüsterten Pulvern ist die Verdichtung der Pulver nicht ausreichend. Beide Pulver sind für klassische PM-Prozesse (Verpressen auf >95% mit anschließender Wärmebehandlung) ausgelegt und auch eine Zugabe des Sinteradditives zeigt nur eine geringe, nicht ausreichende Verbesserung der Eigenschaften. Beide Pulver sind folglich nicht für den angestrebten Prozess geeignet, da die Gründichte der gedruckten Proben maximal 50 - 60% beträgt.

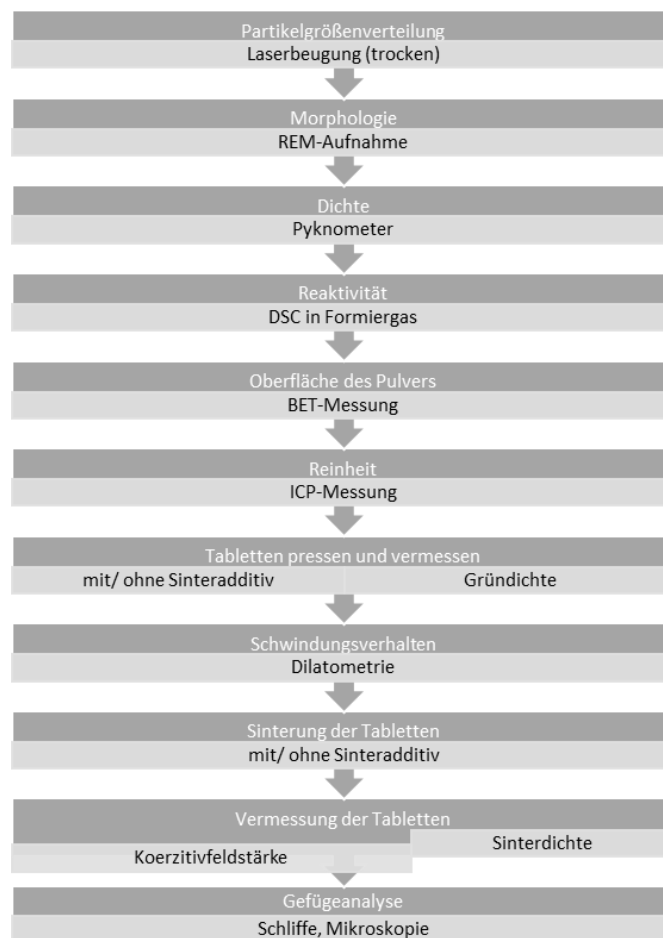


Abbildung 1: Ablaufschema der Pulverbewertung

Die elektrolytischen Eisenpulver, die alternativen Carbonyleisenpulver sowie die recycelten Pulver zeigen hingegen eine ausreichende Sinteraktivität aufgrund der großen Pulveroberfläche. Diese zeigen jedoch eine Verschlechterung der Koerzitivfeldstärke. Bestimmend für die magnetischen Eigenschaften ist neben einer hohen Sinterdichte eine ausreichend hohe Korngröße. Diese ist bei den getesteten Pulvern geringer als im Standardpulver. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde im Projektverlauf auf das Standardprozesspulver zurückgegriffen.

Entwicklung Druck und Charakterisierung von Testmustern

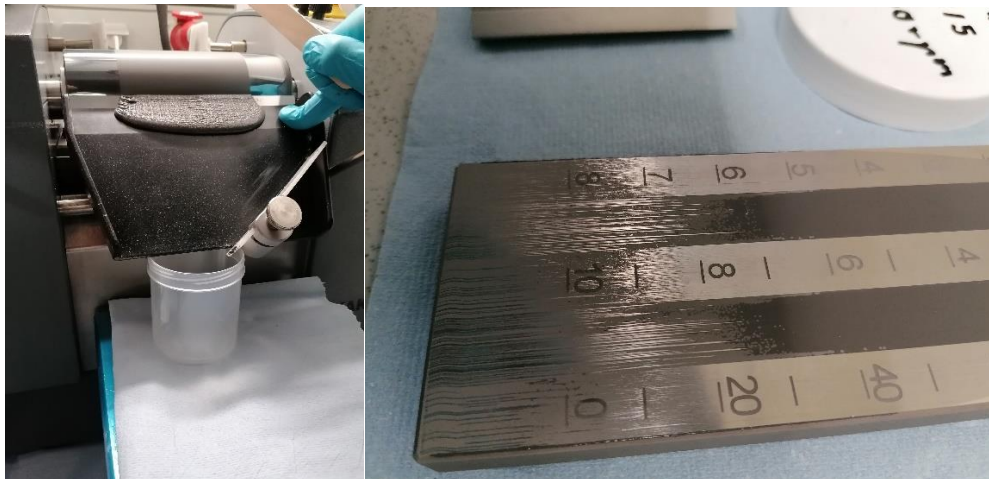
Das zugeordnete Arbeitspaket hat sich schwerpunktmäßig mit der Herstellung von wässrigen Drucksuspensionen, deren Verarbeitung im Siebdruckprozess zu Elektroblechen sowie deren Sinterung beschäftigt.

Druckpasten

Zu Beginn des Projekts wurde gemeinsam eine Pastenspezifikation erstellt. Die wesentlichen Anforderungen sind:

- wässriges Lösemittel (Kosten)
- hohe Pulverbeladung (>40vol%) zur Realisierung hoher Schichtdicken
- hohe Prozessgeschwindigkeiten (>200mm/s) zur Realisierung geringer Zykluszeiten

Aus dem in AP2 ausgewählten Reineisenpulver wurden wässrige Druckpasten für den Siebdruck mit einer Pulverbeladung von 42vol % entwickelt. Die Pasten enthalten neben dem Lösemittel und dem Binder eine Reihe von Additiven (Dispergator, Netzmittel, Weichmacher usw.) um die Fließeigenschaften exakt einstellen zu können. Die Druckpasten wurden in Gebinden von ca. 2 kg angemischt und anschließend homogenisiert. Hier zeigte sich, dass der Mischprozess einen wichtigen Einfluss auf die Agglomeratgröße der Druckpasten hat. Diese Agglomerate sind nicht gewünscht, da sie zum einen Siebmaschen „verstopfen“ können und damit Druckfehler erzeugen und zum anderen zu einer erhöhten Oberflächenrauigkeit beitragen. Angestrebt ist, dass die Agglomerate < 20 µm sein sollen. Die Abbildung 3 zeigt Aufnahmen von Grindometermessungen bei Verwendung von einem 3 Walzstuhl. Darin ist zu erkennen, dass die Agglomerate im Bereich von 20 µm sind.



Ablösen vom Drucksubstrat und Umsetzen auf ein Sintersubstrat zu ermöglichen. Durch gezielte Anpassung der Oberflächenspannung der Druckpaste konnte diese Forderung eingehalten werden (siehe Abbildung 4).

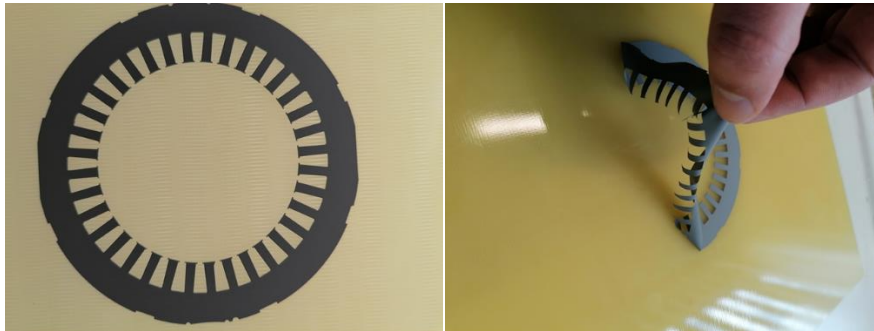


Abbildung 4: Auf Zielsubstrat gedrucktes Elektroblech vor dem Ablösen (links) und beim Ablösen per Hand (rechts).

Die Druckpasten haben ein Verarbeitungsfenster von 5 – 7 Tagen. In diesem Zeitraum ändert sich die dynamische Viskosität der Paste sowie der pH-Wert in einem sehr geringen Umfang.

Siebkonfiguration

Die Auswahl der Druckformkonfiguration ist ein wichtiger Bestandteil für den Siebdruckprozess. Die Randbedingungen für die Auswahl waren wie folgt:

- Realisierung einer Trockenschichtdicke von 110 bis 150 μm
- Oberflächenrauigkeit $R_a < 5 \mu\text{m}$

Die erzielbare Trockenschichtdicke ist ein komplexes Zusammenspiel aus Siebeigenschaften, Druckparametern und den rheologischen Eigenschaften der Druckpaste.

Mit steigender Drahtdicke der Druckformen steigt das Maschenvolumen an und somit die übertragbare Schichtdicke. Nachteil ist jedoch, dass die Rauigkeit der gedruckten Schichten ebenso ansteigt. Dementsprechend wurde versucht, die spezifizierte Schichtdicke mit einem möglichst feinmaschigen (dünn-drahtigen) Siebgewebe zu erreichen. Die erste wichtige Maßnahme hierfür ist der Einsatz einer *Druckraket-* statt *Flutrakelklinge* für den Flutungsprozess (siehe Abbildung 5). Dadurch wird die beim Fluten in die Siebmaschen eingetragene Pastenmenge maximiert. Mit diesem Prozessansatz wurden anschließend verschiedene Druckgewebe ausgewählt und die mittlere Schichtdicke pro Übertragungsvorgang bestimmt. Wie in Abbildung 6 zu erkennen ist, kann die spezifizierte Trockenschichtdicke mit einem dünn-drahtigen Gewebe (VA200/36) erreicht werden.



Abbildung 5: Klassischer Aufbau aus Flut- und Druckraketklinge (links) und neuer Aufbau aus Druck- und Druckraketklinge (rechts)

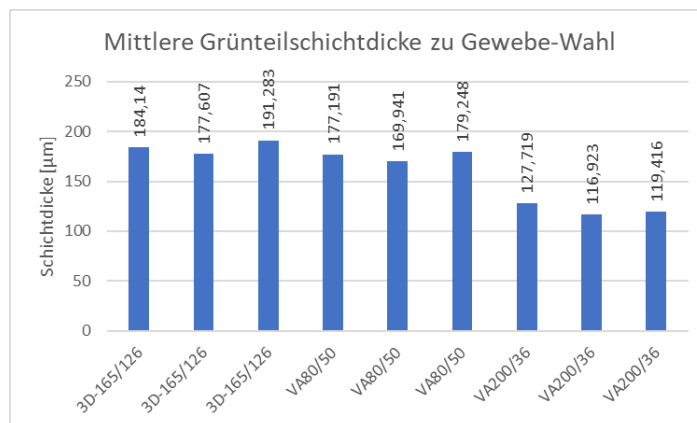


Abbildung 6: Grünteildicken nach Gewebe-Wahl

Voraussetzung für das Erreichen der Trockenschichtdicke mit diesen dünnrahtigen Geweben ist jedoch, dass die Downstop-Einstellung am Drucker am äußersten Rand des Prozessfensters eingestellt wird. Der Prozess wird dadurch schwieriger zu kontrollieren und führt beim Serienprozess zum teilweisen Ausdrucken jeder zweiten gedruckten Probe (siehe Abbildung 7).

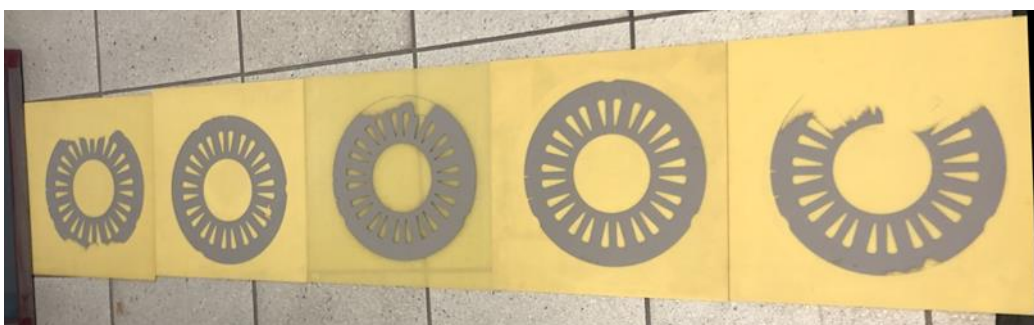


Abbildung 7: Druckdefekte, die von zu hohem Downstop herrühren.

Dementsprechend wurde im weiteren Verlauf des Projektes auf ein Gewebe mit größeren Drahtdurchmesser für die Herstellung der Demonstratorbleche zurückgegriffen.

Die wesentlichen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Gewebe möglichst fein

- Schichtdickenbegrenzung
- Drucken-Fluten (gewinkelt)
- Zykluszeit 4s bei Einfachnutzen
- magn. Eigenschaften liegen in der Spezifikation

Für die generellen Herausforderungen (Druckfehler, Pinholes auf der Rückseite, s. Kap. 5.7) musste ein Kompromiss zwischen Geschwindigkeit und Druckdefekten gefunden werden.

5.2 Anlagenentwicklung Siebdruck

Der Projektpartner EKRA zeichnete hauptverantwortlich für die Bearbeitung des Arbeitspakets 4, dessen Zielstellung die Entwicklung und der Aufbau einer vollautomatisierten Inline-Siebdruckanlage zur Hochdurchsatzproduktion von Magnetblechen im additiven Verfahren war.

Zur Erreichung dieses Ziels wurden nachstehende Aufgaben definiert, die gleichzeitig die Charakteristika der späteren Automatisierungslösung bilden sollten:

- Vergrößerung der druckbaren Bauteilgröße
- Reduktion der Zykluszeit
- Erhöhung der Genauigkeit der Maschine
- Integration einer Inline-Qualitätssicherung
- Automatisiertes Prozess-Handling und intuitive Bedienung
- Gleichmäßigkeit des Lagenauftrags

Zeitlicher Verlauf und wesentliche Erkenntnisse

Das Anlagenkonzept wurde in gemeinsamer Abstimmung mit den Projektpartner in Halbjahr 1 und 2 definiert. Erste Grundfunktionen (Rahmen, Oberteilhub, Rakeltraverse) konnten bereits im zweiten Projekthalbjahr durch die Konstruktionsabteilung begonnen werden, wurden im Halbjahr 3 abgeschlossen und in einem Reviewtermin mit den Projektpartnern diskutiert. Die für das Projekt essenziellen Begleitfunktionen (Substrattransport, Substratfixierung durch Drucknest) wurden im vierten Projekthalbjahr konstruiert. Parallel dazu wurden die Nebenfunktionen (Pastennachführung durch Dispenser und Prozessraumklimatisierung) entwickelt. Verursacht durch die Komplexität der Aufgabenstellung, reichte deren Entwicklung bis weit in das fünfte Projekthalbjahr hinein, in welchem bereits die Materialbeschaffung der Grundkomponenten und erste Montagarbeiten parallel vollzogen wurden. Die Montage der Automatisierungslösung wurde in Halbjahr 6 zusammen mit der Inbetriebnahme abgeschlossen. Die Verifikation der Prozesszeit und -qualität startete im sechsten Halbjahr und endete im siebten Projekthalbjahr (Tab. 1)

Tabelle 12: Zeitlicher Verlauf Meilensteine Entwicklung und Aufbau Automatisierungslösung

Projekthalbjahr						
1	2	3	4	5	6	7
Konzept						
	Entw. Grundfunktion					
			Begleitfkt			
			Entw. Nebenfunktionen			
				Beschaffung		
				Montage		
					IB	
					Verifikation	

Nachfolgende wesentliche Erkenntnisse stellen ein Ergebnis dieses Projektverlaufs dar.

1. Die Aufgabenstellung, Magnetbleche unter Einhaltung von Sollqualität und Zykluszeit im Mehrfachnutzen zu drucken und so das Zykluszeitziel von 2 Sekunden je Blech zu erreichen, konnte erfolgreich gelöst werden.
2. Die Druckparameter Absprung und Rakelgeschwindigkeit sind die Haupteinflussgrößen der Druckaufgabe, was durch einen DoE erkannt werden konnte.
3. Der eigentliche Druck der Magnetbleche stellte sich als einfacher zu bewältigen dar, als die Nebenfunktionen Prozessklima und Pastennachführung im Industrialisierungsmaßstabs zu entwickeln.
4. Die Dimensionen des Großformatdruckers erzeugen eine Komplexität bei der Montage von Baugruppen und bei der Endmontage. Das Einmessen der verschiedenen Gewerke zueinander unter Einhaltung der vorgegebenen Toleranzen zur Erreichung der Maschinengenauigkeit ist eine Herausforderung.

Vergrößerung der druckbaren Bauteilgröße und Reduktion der Zykluszeit

Wie bereits eingangs erwähnt verfügen Druckmaschinen, die in einem vergleichbaren Anwendungsfeld operieren, über einen Druckbereich von 300 x 300 mm bei etwa 5 Sekunden. Weiter sind diese Anlagen mit einer einzelnen Transport- und Prozessspur ausgestattet.

Als technische Innovation wurde die neue Druckmaschine einerseits deutlich größer dimensioniert und andererseits in zwei Betriebsarten konzipiert. So wuchsen die Außendimensionen der Anlage in Länge und Breite um mehr als das 1,5-fache (Abb. 1).



Abbildung 1: Größerer Druckbereich durch 1,5-fach vergrößerte Maschinendimensionen

In der Betriebsart 1 ist eine SingleLane-Konfiguration vorgesehen. Hier können großformatige Substrate mit einer einzelnen Transportspur ein- und ausgefördert werden. Im Gegensatz dazu werden in der zweiten Variante, der MultiLane-Konfiguration, zwei unabhängig voneinander arbeitende Transportspuren eingesetzt, um die Maschine zu beladen, den Druck durchzuführen und die Maschine wieder zu entladen. Das Be- und Entladen der Substrate erfolgt in einem ineinander kämmenden Ablauf, während die Rakelbewegung und somit der Pastenübertrag, kontinuierlich stattfinden. So wird die Zykluszeit über das asynchrone Ansteuern der beiden Transport reduziert. Das parallele Prozessieren von mehreren klein- bis mittelformatigen Substraten in Y-Dimension des Druckers („nach hinten, in die Tiefe“) ist damit möglich. Um den Produktionsdurchsatz weiter zu erhöhen wurde beschlossen, auch in der X-Dimension mehrere Magnetbleche auf dem Trägersubstrat anzuordnen.

Durch die Aufteilung des zur Verfügung stehenden baulichen Raumes ergaben sich die in Tab. 2 dargestellten Größenverhältnisse.

Tabelle 2: Vergleich SingleLane und MultiLane

	Single Lane	Multilane
min. Druckformat/ Substratlänge (X/Y)	80 x 50 mm	80 x 50 mm
max. Druckformat (X/Y)	600 x 760 mm	480 x 275 mm
max. Substratkantenlänge (X / Y)	750 x 800 mm	480 x 300 mm
min. Distanz zwischen Substraten (Y)	-	100 mm

In der Y-Dimension fand somit eine Verdopplung der gleichzeitig bedruckbaren Substrate statt. Ebenso erfolgte eine Verdopplung in X-Dimension ermöglicht durch die Vergrößerung der Maschinendimensionen. Im Ergebnis konnten in dieser maximalen Konfiguration vier Magnetbleche gleichzeitig prozessiert werden, im sogenannten 4-fach Nutzen (Abb. 2).



Abbildung 2: 4-fach Nutzen im Druckprozess

Die Produktionstermine hatten neben der Herstellung der Bleche für den Demonstratorbau ebenfalls das Ziel die Zykluszeit und somit die Einhaltung des Projektziels zu verifizieren. Die dabei verwendeten Zielprozessparameter waren 350 mm/s Flutgeschwindigkeit und 200 mm/s Druckgeschwindigkeit. Im Vergleich zu anderen Druckprozessen lassen sich diese Geschwindigkeiten als moderat bewerten. Erreicht wurden in dieser Konfiguration 4 Magnetbleche innerhalb von 7 Sekunden. Umgerechnet auf das einzelne Magnetblech konnte also eine Zykluszeit von 1,75 Sekunden erzielt werden, was unterhalb des zu Beginn ausgegebenem Projektziels von 2 Sekunden liegt (Tab. 3). Ein Großteil der nötigen Magnetbleche wurde auch in der 2-fach Nutzen Konfiguration produziert, da der Ausstoß des Druckers für die nachfolgenden Prozesse der Trocknung und Inspektion zu groß gewesen wäre.

Tabelle 3: Gegenüberstellung Projektziel und Projektergebnis Zykluszeit

Projektziel Zykluszeit 1 Magnetblech	Projektergebnis Zykluszeit 1 Magnetblech	Projektergebnis Zykluszeit 4 Magnetbleche
2 Sekunden	1,75 Sekunden	7 Sekunden

Einige Software-Arbeiten bei der Entwicklung dieses Mehrspur-Konzepts wurden nicht wie geplant intern durch EKRA-Mitarbeiter durchgeführt. Mehrere Mitarbeiter aus der Software-Abteilung hatten das Unternehmen verlassen. Die Programmierarbeiten wurden daher vollständig als FuE-Fremdleistungen eingereicht (Ausführung durch Optonic, s. Kap. 5.3). Auf Grund dieser Tatsache hatte sich auch der Fokus der Programmierarbeiten verschoben.

Erhöhung der Genauigkeit der Maschine

Großformatdrucker haben konzeptbedingt niedrigere Prozessgenauigkeiten als vergleichbare Drucker im Klein- bis Mittelformat. Es werden größere Siebe verwendet, bei welchen es während des Drucks zu größerem Siebverzug kommt. Ein großer Siebverzug wirkt sich negativ auf die Übertragstreue zwischen Druckform und Druckergebnis aus, speziell was die Rundheit anbelangt.

Somit war eines der Projektziele, die Anlagen Grundgenauigkeit und die Prozessgenauigkeit zu verbessern, um dem Einflussfaktor „großes Sieb“ entgegenzuwirken.

Durch die Unterteilung in mehrere Transportspuren wurde es möglich auf die Charakteristika des Siebes in der vorderen und hinteren Hälfte in Druckrichtung gesondert einzugehen, was über eine Anpassung des Fein-Justage Ablauf adressiert wurde.

So wurde die Software des Kamera- und Ausrichtemoduls vollständig überarbeitet. Dies beinhaltete die Aufteilung des Maschinengesamtsystems in mehrere Koordinatensysteme. Beide Transportspuren wurden mit separaten Kamerasystemen ausgestattet, wodurch eine Einzelausrichtung zum Sieb ermöglicht wurde. In Summe wurden 3 Koordinationsysteme eingeführt (Separation Sieb, Spur 1 und Spur 2), die in den zuvor erwähnten, ineinander kämmenden Ablauf, mit entsprechender Ausrichteansteuerung eingebettet werden mussten.

Der Nachweis für die Maschinenfähigkeit wurde mit einem externen Kamera-Prüfsystem erbracht, das eine Ausrichtgenauigkeit von $\pm 12,5 \mu\text{m}$ @ 6s je Spur nachwies. Vergleichbare Siebdruck-Großformatdrucker erzielen hier typischerweise Werte $> \pm 25 \mu\text{m}$. Die Zielsetzung bei Projektstart lag bei einem Wert von $\pm 15 \mu\text{m}$ @ 6s.

Ein weiterer Angriffspunkt für eine Verbesserung der Genauigkeit lag im dynamischen Ausgleich des Siebverzugs. Im Projekt wurde auf eine vollständige Realisierung möglicher Funktionen jedoch verzichtet. Zur Nachführung der Siebhöhe und Nachführung der Siebposition in y-Richtung während der Rastbewegung wurden lediglich Konzepte erarbeitet und die Maschine mit der notwendigen Hardware ausgestattet. In Summe war dadurch weniger Programmierarbeit erforderlich als angenommen. Diese Änderung der Anforderung hatte zur Folge, dass verschiedene Funktionen zum dynamischen Ausgleich des Siebverzugs nicht programmiert werden mussten. Die erforderliche Qualität des Druckbilds konnte auch ohne diese Funktionen erreicht werden. Als die Hardware-Entwicklung der Maschine durchgeführt wurde, lag dieses Erkenntnis noch nicht vor, weswegen die Maschine mechanisch für die Funktionen vorbereitet ist.

Zur Identifikation erfolgskritischer Prozessparameter wurde ein DoE zum Beginn des Projekts durchgeführt, der den Absprung (indirekt „Siebhöhe“) als Haupteinflussfaktor für die Druckqualität identifizierte. Eine Realisierung bis zur vollen Funktion war nicht notwendig. Es ergab sich im Verlauf des Projekts, dass eine sehr gute Rundheit des Drucks nicht mehr erforderlich war. Ein konturnaher Druck und anschließendes Endstanzen der finalen Form ermöglichten im Demonstratoraufbau eine sehr gute Rundheit.

Weiter wurde im Rahmen des durchgeführten DoEs eine Auswertesoftware entwickelt. Mit den drucker-eigenen Kameras konnten damit Positionsabweichungen zwischen Testsieb und gedruckten Strukturen ermittelt werden. Dies wurde über eine das Druckformat überspannende Matrix hinweg untersucht, um den Siebverzug quantitativ genauer charakterisieren zu können.

Integration einer Inline-Qualitätssicherung

Großformatdrucker verfügen nicht über eine für dieses Anwendungsfeld spezifische Qualitätsabsicherung, die Voraussetzung für eine stabile Prozessierung und damit geringe Fehlerkosten ist. Hinzu kam, dass das im Projekt entwickelte Mehrspurdruck-Konzept, mit den drei neu implementierten Koordinatensystemen, zusätzliche Anforderungen an eine Regelschleife stellte.

Als Vorarbeit diente der bereits beschriebene DoE. Es fand eine Analyse der Korrelation relevanter Inspektions-Kriterien zu Druckparametern statt. Neben dem Absprung wurden auch Rakelkraft und Rakelgeschwindigkeit als in Summe drei für eine Closed-Loop Regelung relevante Steuergrößen identifiziert.

Wie bereits für die oben diskutierten Nachführungs-Funktionen, war auch die Entwicklung der Kommunikations-Schnittstelle im Projektverlauf obsolet geworden. Der konturnahe Druck machte es nicht mehr erforderlich, eine Closed-Loop Regelung zu etablieren. Eine Regelung zur positiven Beeinflussung der Rundheit war nicht nötig, da das Endstanzen auf die finale Kontur des Magnetblechs keine absolute Rundheit mehr erforderlich machte (siehe auch vorherige Ausführungen). Es sind daher entgegen der ursprünglichen Planung weniger Personalkosten angefallen. Die Kommunikationsschnittstelle zur Regelung der Druckparameter wurde zwar Software-seitig vorbereitet, aber inhaltlich nicht entwickelt. Weiter war im Produktionsszenario das Inspektionsgerät nicht mehr wie ursprünglich geplant Teil der verketteten Produktionslinie, sondern wurde offline als Halbautomat betrieben.

Automatisiertes Prozess-Handling und intuitive Bedienung

Der Betrieb moderner Anlagen erfordert speziell geschultes Personal, da zahlreiche prozessrelevante Einstellungen derzeit noch manuell vorgenommen werden müssen. So wurde im Projekt das Ziel verfolgt, speziell den Automatisierungsgrad des Rakelwerks deutlich zu erhöhen. Dazu sollten zusätzliche Prozessparameter wie der Downstop und der Rakelwinkel automatisiert angesteuert werden. Gegenwärtig werden beispielsweise auch Einstellungen wie der Absprung (Abstand zwischen Druckform und Substrat) manuell durch den Bediener justiert, was zu einer starken Abhängigkeit des Druckergebnisses von individuellen Bedienerinflüssen führt.

Im Rahmen des Förderprojekts wurde ein motorischer Rakelkopf für den Mehrspurdrucker realisiert. Über ein Zusammenspiel aus motorischer Ansteuerung der Rakelhöhen gekoppelt mit verschiedenen Wegmesssystem wurden Zustellbewegungen in μm -Genauigkeit erzielt. Dadurch ließen sich korrekte Maschineneinstellungen sowie qualitativ hochwertige Druckergebnisse einfach und zuverlässig während allen drei Produktionsterminen schnell reproduzieren. Dabei ist zu bemerken, dass der Druckprozess jeweils von unterschiedlichen Beteiligten in kürzester Zeit ohne wesentliches Anpassen der Druckparameter wieder angefahren werden konnte. Es musste lediglich die Druckgeschwindigkeit in geringem Maße nachjustiert werden, um die übertragene Schichtdicke je nach Pastencharge zu steuern. Die übrigen Druckparameter wurden durch den motorischem Rakelkopf vollständig prozesssicher reproduziert.

Teil des Prozess-Handlings war im weiteren Sinne auch das Herstellen einer konstanten Prozessumgebung, die sich durch eine Temperatur von 20 °C und eine relative Luftfeuchte von über 60 % definierten. Hierzu wurden Voruntersuchungen mit einem leistungsstarken Umluftklimagerät an einem konventionellen Halbautomatik-Drucker durchgeführt.

Die hier gewonnen Erkenntnisse wurden bei der Auslegung des Luftstroms für den Großformat-Mehrspurdrucker miteinbezogen. Es entstanden zwei neue Diffusoren zum kontrollierten Einleiten der Prozessluft, die wiederum um ein Absaugsystem am Anlagenboden in das Umluftklimagerät rückgeführt wurde. Nur durch diesen Luftkreislauf war es möglich, die hohen Werte der relativen Luftfeuchte zu erreichen.

Neben der Prozessumgebung war auch das Nachdosieren der hochdichten Eisenpaste auf das Sieb Bestandteil des zu automatisierenden Prozess-Handlings. Ziel war es, eine Funktion zu entwickeln, die das Nachführen der Paste ermöglicht, ohne die Bedienerhaube öffnen zu müssen. Denn jedes Öffnen der Haube führt zu einem Luftaustausch zwischen der kontrollierten Prozessatmosphäre und der Umgebungsluft. Bereits kurze Unterbrechungen von 20 bis 30 Sekunden zur manuellen Nachdosierung hätten deutlich längere Stillstandszeiten zur Folge, da das stabile Prozessklima erst wiederhergestellt werden müsste.

Im Projektverlauf fiel die Entscheidung auf eine Dispenslösung mit einer Peristaltikpumpe, die entsprechend den Anforderungen ausgelegt und in den Mehrspursiebdrucker integriert wurde. Zusätzlich wurde beschlossen, den Pastenbehälter, aus dem die Peristaltikpumpe das Druckmedium fördert, mit einem motorischen Rührwerk auszustatten. Diese Ergänzung wurde notwendig aufgrund der rheologischen Eigenschaften der Eisenpaste. Im Rahmen der Tests zeigte sich, dass die geringe Förderleistung und Saugleistung der verwendeten kleinen Peristaltikpumpe für die hochdichte Eisenpaste (4 g/cm^3) nicht ausreichend war. Zwar sorgte das motorische Rührwerk im Behälter für eine kontinuierliche Scherung der Paste, wodurch deren Viskosität zunächst reduziert wurde. Beim Durchfluss durch die Pumpe und das Schlauchsystem stieg die Viskosität jedoch wieder an. Aufgrund des unzureichenden Materialvorschubs erstarrte die Paste im Schlauchsystem, bevor die Dispenslanze überhaupt die Position über dem Sieb erreichen konnte.

Aufgrund dessen wurde beschlossen auf ein Kreislauffördersystem für die Paste umzustellen (Abb. 3). Ziel war es, die Paste dauerhaft in Bewegung zu halten und so ein Erstarren im System zu verhindern. Unterstützt sollte dies durch den Einsatz einer deutlich leistungsfähigeren Peristaltikpumpe werden. Auch fanden weitere, aufwendige Optimierungen der Fluidik statt, um Strömungsverluste zu minimieren.

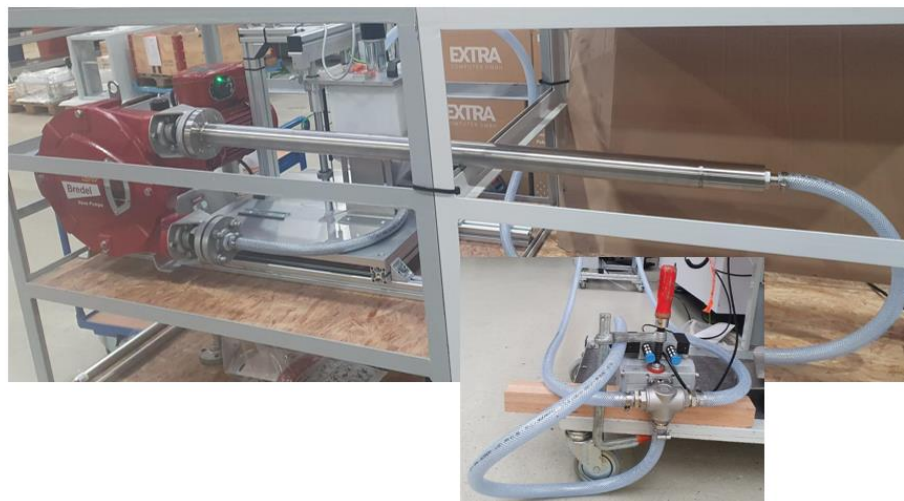


Abbildung 3: Kreislauffördersystem zum Paste Nachlegen

Trotz der Einbindung externer Fachleute und Lieferanten konnte die Paste mit dem gewählten Kreislaufförderansatz nicht zuverlässig transportiert werden. Rückblickend zeigt sich, dass die technische Herausforderung mit Blick auf die Eigenschaften der Eisenpaste (hohe Dichte und Viskosität) unterschätzt wurde. Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergibt sich die Empfehlung, die Paste künftig mit

einer um 15 bis 20 % reduzierten Viskosität zu formulieren. Zudem sollte das Konzept der mechanischen Förderschnecke als alternative Methode untersucht werden.

Gleichmäßigkeit des Lagenauftrags

Die Menge der auf das Drucksubstrat übertragenden Paste wird durch die variierenden Siebrückstellkräfte über der Siebfläche beeinflusst. Um einen gleichmäßigen Auftrag der Paste zu gewährleisten, wurden verschiedene Lösungsansätze und Maßnahmen im Förderprojekt geprüft.

Letztlich wurde als neue Funktion die variable Druckgeschwindigkeit während des Rakelvorgangs umgesetzt. So wurde eine Anpassungsmöglichkeit realisiert, um zwischen den Spuren definierte Beschleunigungsrampen und Geschwindigkeitsplateaus abzufahren.

Umsetzung Produktionslinie

Der angestrebte Aufbau des Demonstrator-Elektromotors erforderte die Ausstattung des Mehrspurdruickers mit Zu- und Abfuhrbändern. Diese wurden im Rahmen des Projekts neu entwickelt. Ziel war es, die großformatigen Substrate über einen neu konzipierten, zweisepurigen Transportablauf zeitgerecht und prozesssicher dem Siebdrucker zuzuführen.

Die Produktionslinie für den Druck der Magnetbleche des Demo-Elektromotors wurde nicht bei Siemens in Bad-Neustadt a.d. Saal aufgebaut. Die Produktionslinie wurde bei EKRA aufgebaut (Abb. 4). Bei EKRA wurden entsprechend auch die Magnetbleche produziert. Somit reduzierten sich die Reiseaktivitäten der EKRA-Mitarbeiter auf ein Minimum.



Abbildung 4: vollautomatisierte Siebdruckanlage am Standort EKRA Bönningheim

5.3 Entwicklung Qualitätssicherung

Kameraentwicklung

Funktionsprinzip

Unsere Ensenso Kameras arbeiten nach dem Prinzip des räumlichen Sehens (Stereo Vision), das dem menschlichen Sehvermögen nachempfunden ist. Zwei Kameras betrachten dabei eine Szene aus unterschiedlichen Positionen. Obwohl der Bildinhalt beider Kamerabilder identisch scheint, weisen sie Unterschiede in der Lage der betrachteten Objekte auf (Abbildung 12). Da Abstand und

Betrachtungswinkel der Kameras sowie die Brennweite der Optiken bekannt sind, kann die Ensenso-Software diese Abweichungen mittels Triangulationsverfahren in bekannte Längen konvertieren und damit die 3D-Koordination des Objektpunkts für jeden einzelnen Bild-Pixel bestimmen. Das Ergebnis ist eine 3D-Punktewolke, die Grundlage für viele Anwendungen ist, in denen räumliche Objektinformationen benötigt werden.

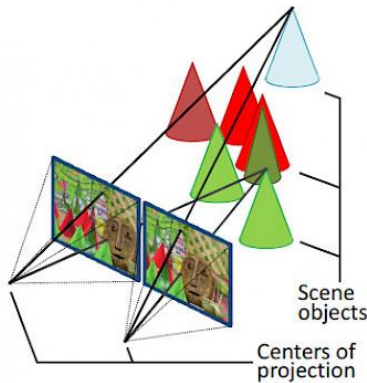


Abbildung 12: Stereo Vision Konzept

Das Matching-Verfahren des Bildvergleichs beruht dabei auf Kontrast- und Helligkeitsabstufungen der Sensorpixel. Die Qualität von Stereo Vision ist damit direkt von Lichtverhältnissen und den Oberflächenbeschaffenheiten (Textures) der Objekte in der Szene abhängig. Auf wenig texturierten bzw. spiegelnden Oberflächen können deshalb nur wenig markante Bildpunkte erkannt, verglichen und örtlich bestimmt werden. Die Folge sind unvollständige Tiefeninformationen der Szene.

Ein lichtstarker Projektor der Ensenso Kameras projiziert auch bei schwierigen Lichtverhältnissen, mittels einer Pattern-Maske, eine kontrastreiche Textur auf das abzubildende Objekt und ergänzt somit die auf dessen Oberfläche nicht oder nur schwach vorhandenen Strukturen (Abbildung 231). Mittels der Hilfsstrukturen auf der Objektoberfläche kann das Matching-Verfahren eine viel höhere Anzahl an Bildpunkten, inklusive ihrer Positionsänderung, erkennen und daraus eine vollständigere, homogenere Tiefeninformation der Szene erstellen.

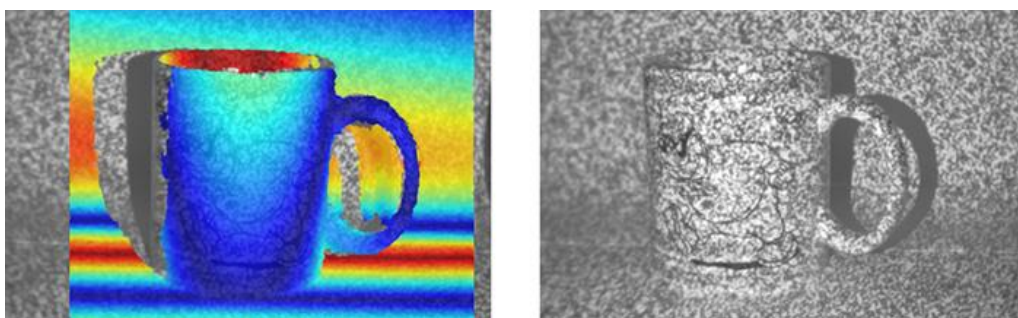


Abbildung 23: Verbesserung der 3D Rekonstruktion durch projiziertes Muster

Anwendung auf Vermessung von Statorblechen

Die Randbedingungen an das Inspektionssystem stellen sehr hohe Anforderungen an die verwendete 3D-Kamera. Zum einen wird eine sehr hohe Messgenauigkeit im Bereich einiger Micrometer benötigt,

andererseits muss bedingt durch die Bauteilgröße der Bleche ein großer Bereich von bis zu 300x300mm vermessen werden. Um die angestrebte Genauigkeit der 3D-Daten zu erreichen, muss eine Kamera mit einem Bildfeld verwendet werden, welches deutlich kleiner ist als die zu untersuchende Teile. Dies kann nur durch die Kombination mehrerer Einzelaufnahmen zu einem Gesamtbild erreicht werden. Zudem werden hohe Anforderungen an die Zykluszeit gestellt, um einen möglichst hohen Anteil der produzierten Bleche inspizieren zu können.

Um ein skalierbares Inspektionssystem aufzubauen war die Entwicklung einer neuen Messkamera innerhalb des Projektes notwendig. Diese Neuentwicklung hatte zwei zentrale Ziele:

Skalierbarkeit: Um die Bildaufnahmedauer zu optimieren ist ein Mehrkamerasystem mit lokaler Rechenleistung notwendig.

Genauigkeit: Um die notwendige Messgenauigkeit zu erreichen wird eine auf diese Größenordnung optimierte 3D-Kamera mit geringem Sensorabstand und damit großem Vergenzwinkel benötigt.

Die Integration eines lokalen Prozessors und Speicherkapazität in jeder einzelnen Kamera ermöglicht eine unabhängige Bildaufnahme an jeder Aufnahme position. Die Pixeldaten zunächst parallel über 4 MIPI lanes in den Speicher des Prozessors übertragen (4 Gbit/s). Hier ist auch eine lokale Vorverarbeitung möglich. Die Bilder können dann während der Fahrt zur nächsten Aufnahme position bzw. parallel zum Bauteilhandling zur Auswertung auf den PC übertragen werden. Da diese Kapazität auf jeder Kamera vorhanden ist erhalten wir ein skalierbares System, in dem sich die Anzahl der Kameras flexibel an die Bauteilgröße und geforderte Taktzeit anpassen lässt.

Durch ein neues Hardware design ist es möglich die zwei Stereokameras näher zusammen zu bringen (Abb. 3 und 4). Dies optimiert die Aufnahmequalität, da die Bildsensoren so ohne Einbußen in der Sichtfeldgröße näher an das zu vermessende Objekt herangeführt werden können. Zudem ist eine kompakte Bauweise notwendig, da nur so mehrere Kameras nebeneinander mit überlappendem Bildfeld montiert werden können.

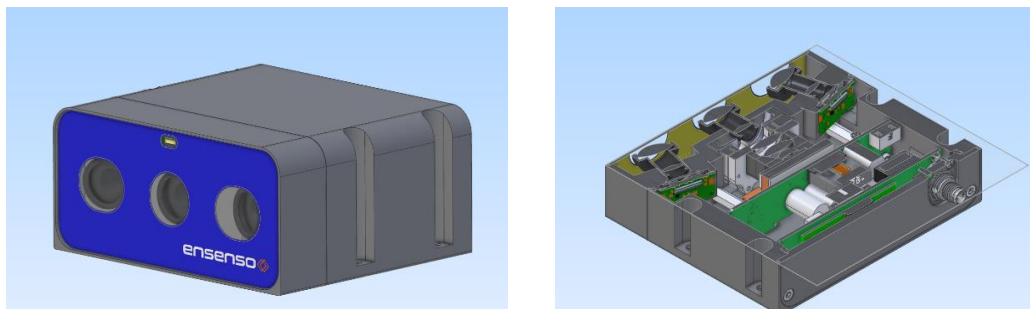


Abbildung 3: Design4 der neuen "B-Serie" Messkamera

Der geringe Sensor- und Projektorabstand einerseits und enge Montagedichte andererseits konnte erreicht werden, indem die Bauteile in mehreren Ebenen angeordnet wurden: vorne Optiken, Kamerachip und Projektormodul, dahinter CPU mit Speichereinheit und schließlich anschlussseitig die Spannungsversorgungselektronik.

Betrieb mit mehreren Messkameras

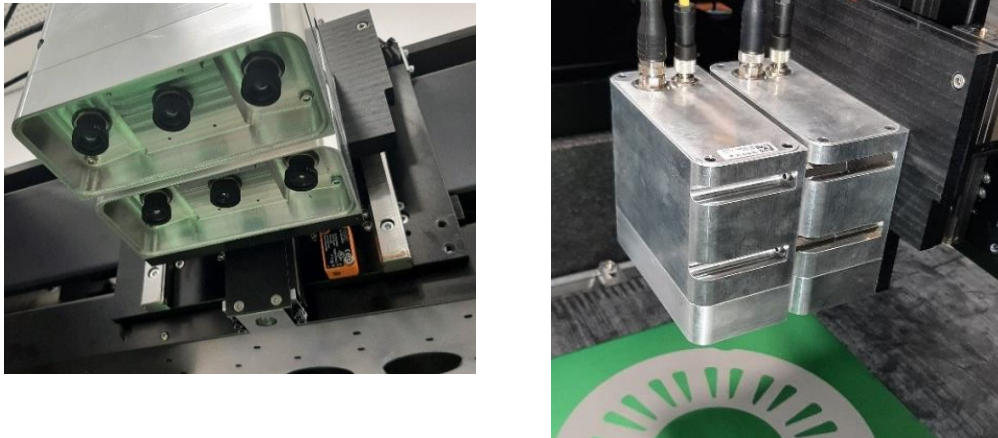


Abb. 4 Neues Setup mit zwei parallellaufenden 3D-Kameras

Das neuentwickelte Kameramodell ermöglicht die schnelle Aufnahme der Rohdaten über das gesamte zu vermessende Bauteil. Um das Teil in seiner Gesamtheit vermessen zu können müssen diese einzelnen 3D-Bilder zu einem einzigen Datensatz zusammengeführt werden. Dies erfordert insbesondere auch eine weiterentwickelte Kalibrierung zwischen den Kameras einerseits und der Motorachsen andererseits. Durch eine geschickte Anwendung von geometrischen Transformationen war es uns möglich dies in einen einzigen Kalibrierprozess zu integrieren. Es genügt ein Kalibriermuster in Sichtfeld einer der Kameras zu bringen. Danach werden vollautomatisch mehrere Bilder mit allen Kameras an verschiedenen Motorpositionen aufgenommen. Durch eine numerische Optimierung können die gewonnenen Daten dann verwendet werden, um die genaue Relativlage der einzelnen Komponenten zu bestimmen. Mit diesem neuen Kalibrieralgorithmus und der bereits entwickelten Stickingmethode konnten auch mit 2 Kameras qualitativ hochwertige Messaufnahmen erzeugt werden, welche nur sehr geringe Artefakte durch das Sticking erkennen lassen (Abb. 5).

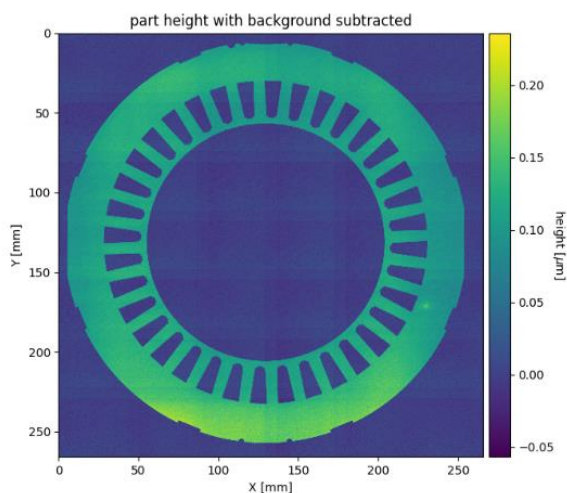


Abb. 5 Nach Kalibrierung zusammengeführtes Messbild aufgenommen mit zwei Kameras

Messtischaufbau

Hardware

Nachdem wir erste Erfahrungen mit Bildaufnahme, Stitching und Analyse an einem einfachen Laboraufbau sammeln konnten, wurde der erste Messtisch insbesondere nach folgenden Anforderungen geplant:

- Robuster, störungs-unanfälliger mechanischer Aufbau.
- Präzise, wiederholgenaue Linearachsen zur genauen Positionierung der Kameras.
- Ausreichend dimensionierter Messraum für Substratbreiten von 500mm.
- Möglichkeit zum Aufbau sowohl als Offline- als auch als Inlineanlage.



Abb. 6 Messtisch mit U-förmigem Granitbett zum Aufbau der Offline-/Inlineanlage

Der Messplatz (Abb. 6) wurde bei uns im Haus auf Basis eines Granittisches der Firma Lenz und Motorcontrollern der Firma Sieb & Meyer mit aufgebaut.

- Außenmaße: 850x900mm
- Gewicht: ca. 800 kg
- Durchlaufbreite: 550 mm
- X-Y-Auflösung der Linearachsen: 0.1 μm

Für den Offline-Labora Aufbau wurde ein Vakuumtisch zur Fixierung der Proben verbaut. Für einen potenziellen späteren Umbau zur Inlineanlage wurde ein Transportband vorgesehen, zunächst jedoch nicht verbaut.

Das Design dieses ersten Messtisches hatte sich in den Untersuchungen bei SIEMENS bewährt. Damit parallel eine Weiterentwicklung des Messprozesses zum einen und zum anderen eine Maschine zur Produktion des Demomotors zur Verfügung stand wurde von uns ein weiterer Messtisch aufgebaut. Aus verschiedenen Gründen wurde im Verlauf des Projektes deutlich, dass es nicht möglich sein wird die Bleche für den geplanten Demomotor auf einer vollständig integrierten Linie zu produzieren. Daher wurde der zweite Messplatz ebenfalls als Offline-Anlage ohne Transportband geplant.

Software

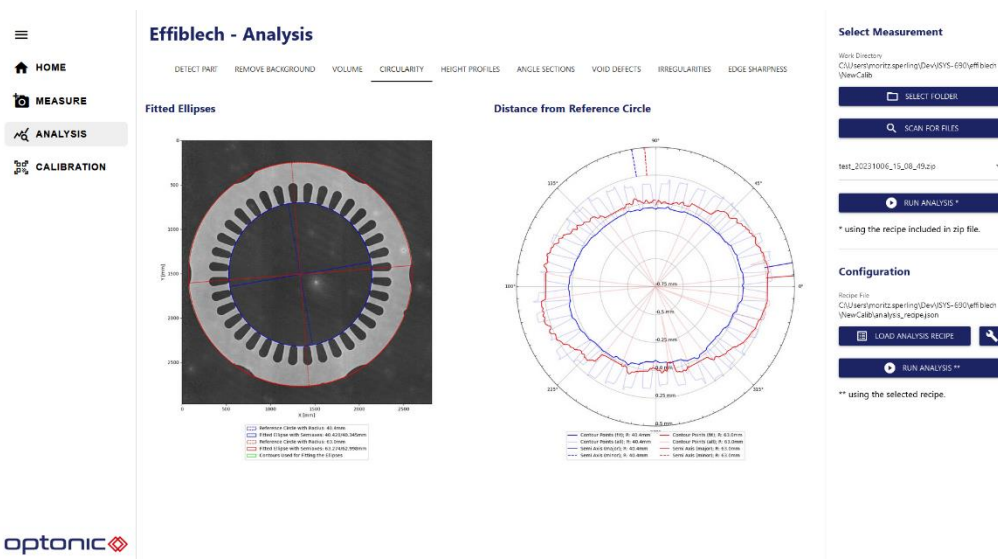


Abb. 7 5Benutzeroberfläche der Mess- und Analysesoftware

Die Software wurde von uns von Grund auf gezielt für das EffiBlech-Projekt entwickelt. Dabei musste einer Reihe von Funktionen zur Verfügung gestellt werden:

- Automatische und manuelle Motorsteuerung
- Hand-Auge- und Optikkalibrierung
- Durchführung von 3D-Messungen
- Analyse der gemessenen Rohdaten

Im Rahmen des EffiBlechs als Entwicklungsprojekt musste die genaue Funktions- und Arbeitsweise zunächst sukzessive erprobt werden – insbesondere gilt dies für den hier entwickelten Laboraufbau. Daher wurde bei der Entwicklung der Software auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Nutzerfreundlichkeit, Flexibilität und Anpassbarkeit geachtet.

Als Basis wurde unser hauseigenes Softwaresystem IVS verwendet. Durch den modularen Aufbau ermöglicht diese Plattform flexible Umbauten wie beispielsweise eine geänderte Kameraanzahl, Integration von Transportbändern oder Anpassung der Beleuchtung. Auch stehen zahlreiche Kommunikationsprotokolle zur Anbindung an andere Anlagenteile zur Verfügung.

Die grafische Benutzeroberfläche (GUI, Abb. 8) wurde von Grund auf speziell für diese Projekt entwickelt. Zum Einsatz kommt eine Webserver/Client-Kombination welche die Anzeige und Steuerung der Messapparatur auch von jedem nichtlokalen PCs mit einem handelsüblichen Webbrowser ermöglicht. Mit der durch den ersten Messplatz mit seiner provisorischen Benutzeroberfläche gewonnenen Erfahrung konnte die GUI sehr übersichtlicher und intuitiv gestaltet werden. Beispielsweise wird der Operator interaktiv durch den Kalibrierungsprozess geführt, wodurch kein Expertenwissen notwendig ist und der Vorgang nach einer kurzen Einweisung vom Anwender selbst durchgeführt werden kann.

Schließlich müssen die Daten auch zur Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt werden. Hierzu wurde in Zusammenarbeit mit Siemens ein Datenformat definiert welches Ihnen ermöglicht die Ergebnisse in bestehende Prozesse zu integrieren und mit weiteren Messungen zu erweitern und zu vergleichen. Alle zu einem Druck gehörenden Werte von den Rohdaten bis zu den extrahierten Messwerten

werden kompakt in einer einzigen ZIP-Datei abgelegt. Zur eindeutigen Zuordnung wurde ein Barcodescanner in Betrieb genommen. Durch Scan der Substart-ID lässt sich hiermit jede Messung eindeutig dem entsprechenden Vorgang im Druckprozess zuordnen.

Definition und Berechnung von Messgrößen

Da mit dem EffiBlech-Projekt in Hinsicht verschiedener Aspekte Neuland betreten wird war vorab nicht klar aus welchen Messgrößen am besten Rückschlüsse auf den Druckprozess gezogen werden können. Daher wurden mit Siemens eine Reihe von vielversprechenden Analysen definiert:

- **Kreisförmigkeit der Probe:** Die Verformung des Druckbilds könnte beispielsweise Informationen zur aktuellen Siebverzerrung liefern (Abb.
- **Druckhöhenverlauf:** Auf Grund des Siebabsprungs kann es zu periodischen Variationen in der Druckhöhe kommen. Diese können durch zirkulare Höhenprofile visualisiert und quantifiziert werden (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).
- **Fehlstellen:** Je nach Druckparameter kann es zu Fehlstellen im Druckbild kommen. Diese können als Vertiefungen in den 3D-Daten detektiert und bezüglich Anzahl und Größe quantifiziert werden.
- **Oberflächenrauigkeit:** Um Unebenheiten auf der Oberfläche der Probe zu erkennen werden die Rohdaten mit einem Mexican-Hat-Wavelet gefiltert. Durch die Verwendung verschiedener Filtergrößen ist es möglich Unebenheiten verschiedener Größenordnungen zu quantifizieren.
- **Rand-Unvollständigkeit:** Durch das Anheben bzw. Zusetzen des Drucksiebs kann es zu Fehlstellen am Rand des Druckteils kommen, insbesondere im Bereich der Zähne. Durch Vergleich der gemessenen Daten mit der CAD-Zeichnung können diese detektiert werden.
- **Kantensteilheit:** Für den Druckprozess ist die Steilheit der Kanten von Interesse. Da sich der Anstieg jedoch im Bereich der maximalen Auflösung der Kamera bewegt ist diese Messung besonders herausfordernd. Hier wurde zunächst ein experimenteller Ansatz implementiert, um die Machbarkeit der Analyse zu überprüfen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

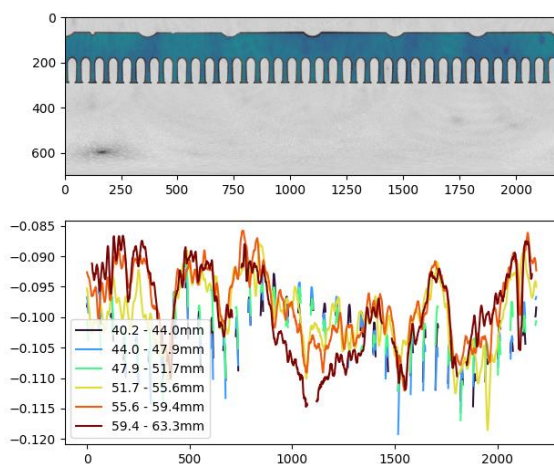


Abbildung 8: Höhenprofile

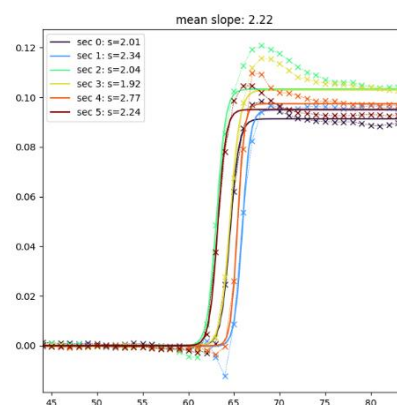


Abbildung 9: Kantensteilheit

Bevor die definierten Messgrößen bestimmt werden können, gilt es eine Reihe von vorverarbeitungs-schritten anzuwenden. Bereits diskutiert wurde das Stitching, das zusammenfügen der 3D-Einzelbilder zum gesamten Bauteil. Eine weitere Schwierigkeit entsteht durch den vorhandenen Verzug der Substratträger. Je nach verwendetem Material kann dieser bis zu 1-2mm liegen und damit deutlich größer als die zu vermessende Höhe des Druckteils mit ca. 100µm. Um die eigentliche Druckhöhe zu extrahieren, wird zunächst aus dem Rohbild (Abb. 10 oben links) das Druckteil mit Hilfe des CAD-Modell

ausgeschnitten (Abb. 10 *oben rechts*). Durch eine Splineberechnung wird dann der nicht messbare Untergrund unter dem Druckteil interpoliert (Abb. 10 *unten links*). Dieser kann schließlich von den gemessenen Rohhöhen abgezogen werden, um die Druckteilhöhe zu bestimmen (Abb. 10 *unten rechts*).

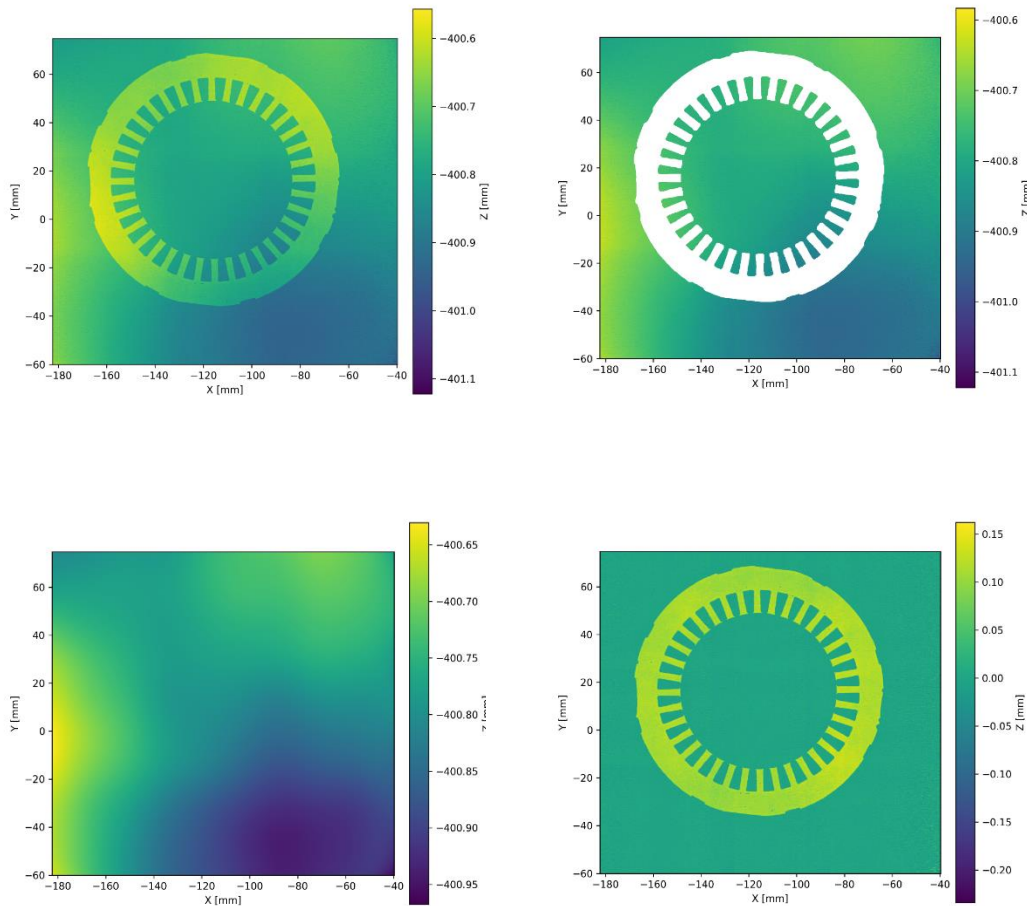


Abb. 10 Hintergrundabzug: Oben links - Rohdaten, oben rechts - extrahierter Untergrund, unten links - interpolierter Untergrund, unten rechts - abgeleitete Druckteilhöhe

Erfahrungen

Im Rahmen der Drucksessions zur Produktion der Demomotorbleche konnten bereits erste Erfahrungen im Zusammenspiel mit weiteren Komponenten der Anlage gesammelt werden, insbesondere mit dem von EKRA und Optonic gemeinsam entwickelten Zwei-Linien-Drucker XH4 sowie dem Durchlauf-Trockenofen. Hierbei hat sich bestätigt, dass auch im aktuellen Aufbau mit lediglich zwei Kameras und bei manueller Bestückung bereit jedes dritte Teil analysiert werden kann.

In diesen ersten Produktionsläufen konnten somit auch bereits erste interessante Zusammenhänge zwischen Druckparametern einerseits und Grünteilqualität andererseits identifiziert werden. Beispielsweise ist hier der Zusammenhang zwischen Abweichungen in Druckhöhe und derer Homogenität und Druckparametern wie Rakeldruck und Absprung zu nennen. Hervorzuheben ist, dass diese schon

während des Produktionslaufes beobachtet werden konnten. Es war also bereits möglich noch während des laufenden Batches Druckparameter zu kontrollieren und manuell nachzuregeln.

Design of Experiment (DoE) Software

Die Abbildungsgenauigkeit der Druckschablone auf das Substrat bestimmt in zentralem Maße die Maßhaltigkeit des gedruckten Produktes. Dies ist sowohl in der flächigen Ausdehnung als auch in der Höhenstruktur interessant. Mit den DoE-Messungen haben wir das Ziel verfolgt, den Einfluss von Veränderungen der Druckparameter auf die X-Y-Abbildung analytisch beschreibbar zu machen und dadurch optimale Parameter für den Druck zu bestimmen.

Zur Vermessung der Strukturen wurde eine Software entwickelt, die mit der Druckersoftware zusammenarbeitet und das Kamerasystem des Druckers für die Messung verwendet. Diese Arbeitsweise gestattete eine zeitnahe Vermessung des Druckergebnisses.

Im ersten Schritt wurde die Maßhaltigkeit des verwendeten Testsiebs vermessen. Dieser verfügte über einzelne, blockweise angeordnete Punkt (Abb. 11 *links*). Die Siebmessung zeigt Abweichungen gegenüber den CAD-Positionen im Bereich bis $25\mu\text{m}$ (Abb. 11 *rechts*).

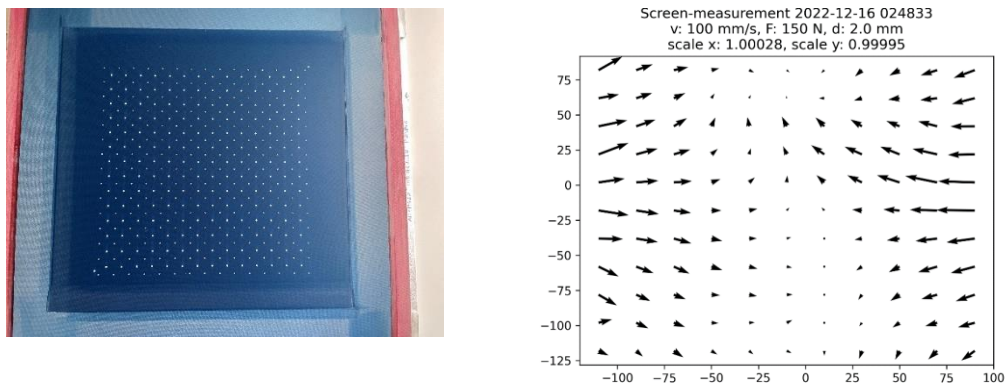


Abb. 11 Ergebnis der Siebvermessung

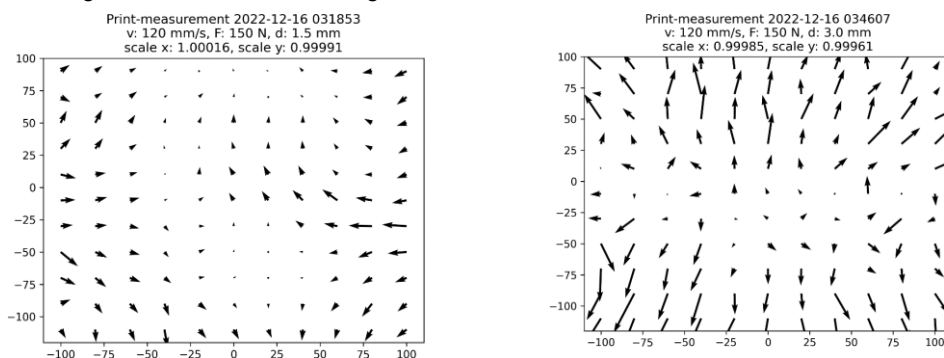


Abb. 12 Druckmessung Absprung (links: 1,5mm, rechts: 3,0mm)

Die Messung des Druckbildes bei kleinem Absprung bestätigt die Siebmessung (Abb. 12, *links*). Bei größeren Absprungwerten skaliert sich das Druckbild deutlich. Die Skalierung erzeugt auf einer Produktgröße von 200 mm eine Abweichung von $90\mu\text{m}$ (Abb. 12, *rechts*).

KI-gestützte Verbesserung der Kantengenauigkeit

Im Rahmen des Projekts wurde die Kantengenauigkeit bei der Disparitätsberechnung verbessert, um eine präzisere 3D-Rekonstruktion von Objekten – insbesondere von Statorblechkanten – zu ermöglichen. Grundlage ist der bislang eingesetzte „PatchMatch“-Algorithmus (PM), der Disparitäten über zufällig initialisierte Patch-Korrespondenzen und deren Propagation berechnet. Dabei zeigte sich, dass an Objektkanten mit geringer Textur oder bei Verschattungen häufig fehlerhafte oder verrauschte Kanten entstehen, da dort eine saubere Terminierung des Algorithmus nicht zuverlässig möglich ist (Abb. 13)



Abb. 13 6Unsaubere Kanten, entstanden aufgrund unzuverlässiger Terminierung der Propagation des PM-Algorithmus.

Zur Verbesserung wurde ein KI-basiertes Verfahren entwickelt, das präzise Kanten detektiert und diese Information zur gezielten Beendigung der PatchMatch-Propagation nutzt. Damit entfällt die Abhängigkeit von schwellenwertbasierten Abbruchkriterien oder einer festen Iterationsanzahl.

Für das Training des neuronalen Netzes wurde eine eigene Datenpipeline aufgebaut, die synthetische Szenen mit variierenden Kameraeinstellungen und Objektmaterialien erzeugt. Die Renderings erfolgen fotorealistisch direkt in der NxLib-Softwareumgebung. Aktuell ist die Pipeline funktional, produziert jedoch noch einen hohen Anteil ungültiger Daten, insbesondere aufgrund komplexer 3D-Geometrien und fehlerhafter Materialzuweisungen.

Als Modell wurde ein Fully Convolutional Network (FCN) mit 8-facher Faltung eingesetzt. Es verarbeitet Disparitätskarten, Texturbilder und Verschattungsinformationen als Eingang und liefert als Output ein präzises Kantenbild. Zusätzlich werden optionale Disparitätskorrekturen und NaN-Masken generiert. Während sich die verbesserte Disparity Map als wenig robust erwies (Skalierungsfehler durch Normalisierung), zeigte die Schätzung der NaN-Maske sowie der Kanten bereits sehr gute Ergebnisse (Abb. 14).

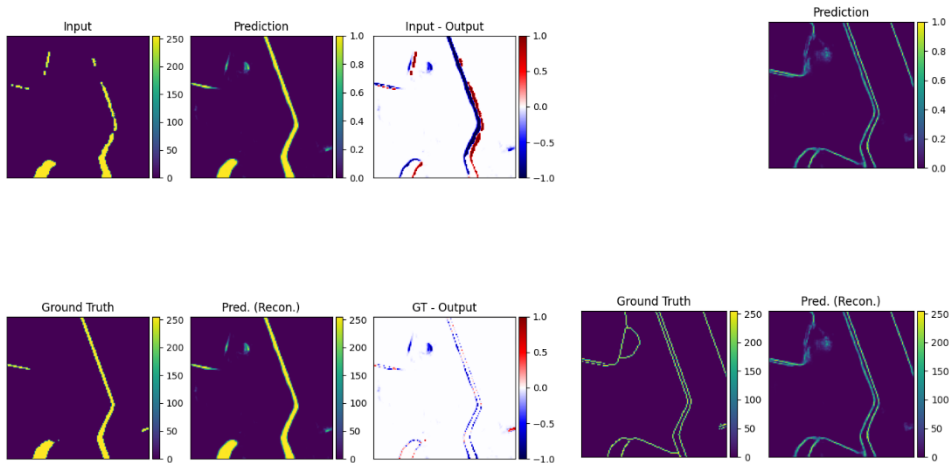


Abb. 14 Beispiel des Outputs des trainierten KI-Modells (NaN-Maske und Objektkanten)

Die Modelle wurden mit einem vorläufigen Datensatz trainiert. Besonders die Detektion der Kanten ist vielversprechend und lässt erwarten, dass nach weiterer Optimierung der Datenbasis eine signifikante Verbesserung der Kantengenauigkeit erzielt werden kann. Damit wurde ein wichtiger Beitrag zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Präzision der 3D-Datenverarbeitung im Gesamtsystem geleistet.

5.4 Anlagenentwicklung Sinterprozess

Anpassung und Optimierung Sinterofen

Innerhalb des Arbeitspaket 6 wurden die verschiedenen Aspekte der Wärmebehandlung untersucht und optimiert. Dabei wurden verschiedene Themen bearbeitet: „Sinterunterlagen & Chargiergestell“, „Prozessoptimierung“ sowie ein „Konzept und Nachweis für die Prozessskalierung“. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

Sinterunterlagen & Chargiergestell

Ziel war zunächst die Maximierung des Ofenauslastung. Das bedeutet, dass ein möglichst großer Teil des Nutzvolumens des Ofens mit Glühgut gefüllt ist und die Masse des Glühguts gegenüber der restlichen aufgeheizten Masse maximiert wird. In anderen Worten: der Auflockerungsgrad soll erhöht werden und die Totmasse verringert. Um diese Ziele zu erreichen, wurden zunächst verschiedene Sinterunterlagen getestet. Im Fokus stand dabei die Verträglichkeit der Sinterunterlage mit den Sinterblechen. Dies hatte neben der chemischen Verträglichkeit die Herausforderung der mechanischen Verträglichkeit. Das Problem an dieser Stelle war das Aufstellen der Bleche an den Sinterunterlagen während der Schrumpfung beim Sintern. Es wurden hierzu verschiedene keramische (siehe Abb. 1) und metallische Sinterunterlagen (siehe Abb. 2) getestet. Die Versuche hierzu fanden in der Laboranlage der MUT Advanced Heating GmbH statt.

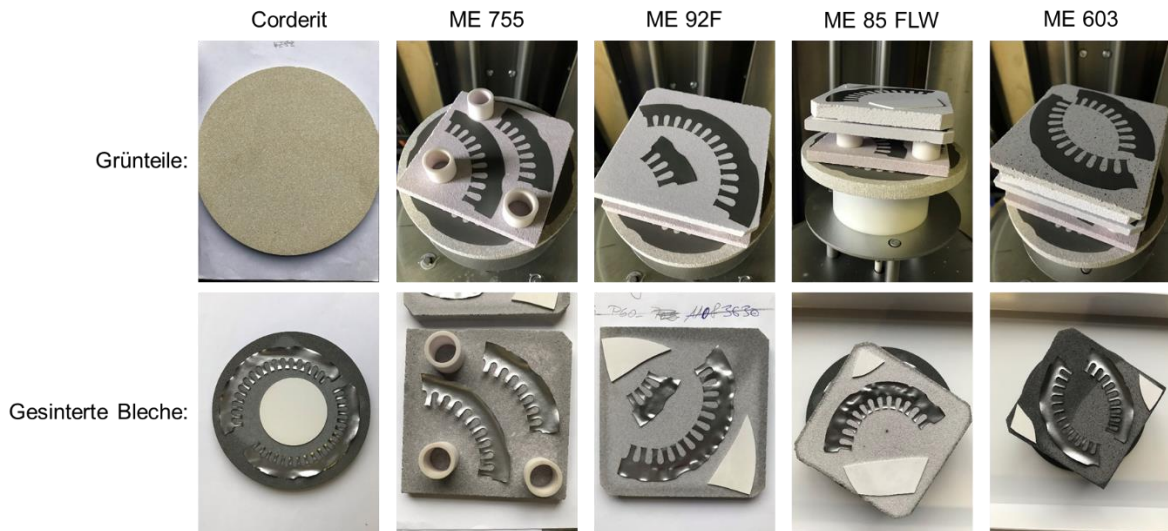


Abb. 1 Sinterbleche vor (oben) und nach (unten) der Wärmebehandlung auf verschiedenen Sinterunterlagen (v.l.n.r.: Corderit, ME 755, ME 92F, ME 85 FLW, ME603)

Der status quo zu Beginn des Projekts waren Al₂O₃ Sinterunterlagen von Kerafol. Nach ausführlichen Untersuchungen konnten sich keine der anderen getesteten Sinterunterlagen qualifizieren. Somit wurden für den Rest des Projekts die Sinterunterlagen von Kerafol genutzt.

DIN ISO 1997	CFC-Y2O3	Mo-Y2O3	Kerafol
Beschichtung	Y2O3 flammgespritzt	Y2O3 flammgespritzt	keine
Rauhheit Ra	5,1 µm	3,2 µm	0,4 µm
Rauhheit Rq	8,8 µm	4,0 µm	0,5 µm
Rauhtiefe Rz	55 µm	18 µm	2,9 µm
Sinterung Gewichtsverlust	-0,2g<0,25%	+0,01g<0,1%	nn
Sintereffekt	Zähne aufgestellt	Zähne meist flach, Rand leicht gewölbt	Zähne flach, Rand leicht gewölbt

Abb. 2 Sinterbleche vor (oben) und nach (unten) der Wärmebehandlung auf verschiedenen keramisch beschichteten metallischen Sinterunterlagen inkl. der Rauheitsmessungen der entsprechenden Materialien

Für die Optimierung des Chargieraufbaus und Chargiergestells wurde auf Basis der Ergebnisse zu den Sinterunterlagen verschiedene Chargierkonzepte entworfen. Dazu wurde zunächst der Chargieraufbau einer Bestandsanlage bei der Siemens AG in München optimiert. Es handelt sich um einen vertikalen Ofen der Firma MUT Advanced Heating GmbH. Dabei wurde ebenfalls berücksichtigt mehrere Sinterbleche unterschiedlicher Größe gleichzeitig zu entbindern und zu sintern, um die Raumausnutzung der Anlage zu optimieren. Im Ergebnis konnte ein Chargierkonzept entworfen werden bei dem in einem Ofen mit einem Nutzvolumen von 28 Liter insgesamt 800 Bleche pro Ofenlauf gesintert werden können.

Prozessoptimierung & Konzept und Nachweis für Prozessskalierung

Für den nächsten Skalierungsschritt in Richtung der Serienfertigung wurde als nächstes ein Chargierkonzept für einen horizontalen Ofen entworfen. Dazu wurden zwei Skalierungsschritte berücksichtigt. Im ersten Schritt wurde ein Ofen mit einem Nutzvolumen von 120 Liter gewählt, woraus sich ein Skalierungsfaktor von 4,3 ergibt. Für den zweiten Skalierungsschritt wurde ein Nutzvolumen von ca. 1000 Litern gewählt was wiederum einen Skalierungsfaktor von 8,5 ergibt. Für Wärmebehandlungen sind Skalierungsfaktoren von über 10 mit hohen Risiken verbunden, da die Herausforderungen dann deutlich zu nehmen. Somit wurden zwei Ofengrößen für die Skalierung des Prozesses gefunden.

Das Chargierkonzept hat sich aufgrund des Wechsels von vertikalen Öfen zu horizontalen Öfen aufgrund der unterschiedlichen Geometrie des Nutzvolumens ebenfalls geändert. Dabei wurde für die horizontalen Öfen eine Chargierung mittels Molybdän-Leiterrahmen und Kerafol Sinterunterlagen entworfen. Die Totmasse im Vergleich zur Masse des Glühguts konnte damit ebenfalls reduziert werden.

Für die Prozessoptimierung standen zwei Aufgabenfelder im Vordergrund: Einerseits sollten die Prozessparameter der Wärmebehandlung optimiert werden und andererseits sollte geprüft werden welche Möglichkeiten auf Seiten der Anlagentechnik bestehen, um sowohl die Qualität zu verbessern als auch die Prozesszeit zu verkürzen. Für ersteres wurde in Zusammenarbeit mit der Siemens AG und dem Fraunhofer IFAM in Dresden die Wärmebehandlung mittels FTIR-Messung im Ofenraum untersucht und die Prozessparameter der Entbinderung und des Sinterns daraufhin angepasst.

Bei der Optimierung der Anlagentechnik wurde einerseits die Zugasung in den Ofenraum betrachtet und optimiert als auch Möglichkeiten zur Prozesszeitverkürzung untersucht. Zur Optimierung der Zugasung wurden verschiedene Zugasdüsen in der Ofenanlage der Siemens AG in München untersucht. Ziel dabei war es das Prozessgas so gezielt wie möglich an das Glühgut, also den Ort der Reaktion zu bringen. Dies hatte die Absicht nicht nur die Qualität der Bleche zu verbessern, sondern auch den Gasverbrauch zu reduzieren, da das Gas gezielter an die Bleche gebracht werden kann.

Bei der Betrachtung der Anlagentechnik hinsichtlich Prozesszeit wurde ein Augenmerk auf die nächsten Skalierungsgrößen der Ofentechnologie geworfen. Da wurde zunächst die Anzahl der Strahlbleche mit Hinsicht auf Prozesszeit als auch auf Energiebedarf untersucht. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die Anzahl der Strahlbleche einen negativen Einfluss auf die Prozesszeit jedoch einen positiven auf den Energieverbrauch hat. Außerdem konnte festgestellt werden, dass der Großteil der Energie für die Erwärmung der keramischen Sinterunterlagen aufgewendet werden muss. Dies unterstreicht noch einmal die Notwendigkeit diese Masse gegenüber der Glühgutmasse zu minimieren. Um den Widerspruch zwischen Prozesszeit und Energieverbrauch entgegenzugehen wurde ein Konzept zur Schnellkühlung der Ofenanlage und des Glühguts entworfen. Dafür wird die Atmosphäre des Ofens zirkuliert und in einem Wärmetauscher abgekühlt. So können sowohl die Abkühlzeit erheblich reduziert werden als auch der Energieverbrauch während des Aufheizens möglichst geringgehalten. Im Zuge dessen wurde der Einfluss der Umwälzrate und der Kühlwassertemperatur untersucht. In Abb. 3 die Abkühlkurve des Glühguts für einen Ofen mit einem Nutzvolumen von 1000 Litern und entsprechender

Beladung gezeigt. Da das Glühgut oberhalb von 100 °C kein Kontakt zur Luft haben darf kann der Ofen erst geöffnet werden, wenn diese Temperatur erreicht ist. Mit Hilfe der Umwälzkühlung kann diese Temperatur beim Abkühlen von der Sintertemperatur bereits nach 7,5 h erreicht werden.

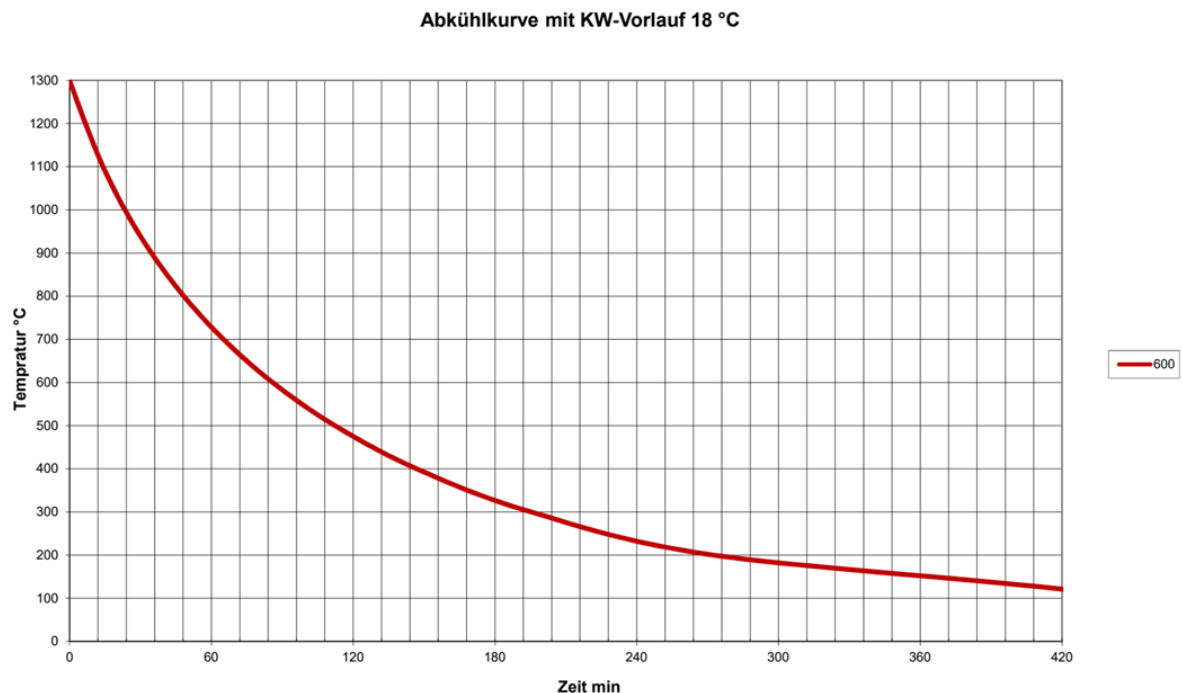


Abb. 3 Temperatur-Zeit-Verlauf beim Abkühlen des Glühguts mittels Umwälzkühlung

Auslegung und Aufbau von Demonstratormotoren

Seitens der MUT Advanced Heating GmbH wurde beim Aufbau eines Demonstratormotors bei der Herstellung der Motorbleche Unterstützung geleistet. Dies erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Siemens AG und dem Fraunhofer IFAM Dresden. Es wurde personelle und fachliche Unterstützung bei der Herstellung, insbesondere bei den Vor- und Nachbereitungen des Entbindern und Sinterns der Bleche geleistet. Hierbei flossen die Ergebnisse und Erfahrungen, die während der Arbeiten im Arbeitspaket 6 gesammelt wurden ein.

Entwicklung eines Konzeptes für die industriellen Einführung

Neben der Skalierung des aktuellen Wärmebehandlungsprozesses auf größeren Anlagen des gleichen Ofentyps wurde ein Konzept für einen kontinuierlichen Sinterprozess entworfen. Dafür wurden zunächst verschiedene Entwürfe erstellt, um die einzelnen Schritte des Wärmebehandlungsprozesses abzubilden. Die Herausforderung hierbei bestand darin die einzelnen Prozessschritte, die in einem Batch Ofen zeitlich hintereinander ablaufen nun in ein Ofendesign zu überführen, dass diese Schritte in einen räumlichen Ablauf überführt. Dabei wurde im Ergebnis ein Prototyp entworfen, der zunächst eine Art Mischung aus Batch Ofen und kontinuierlichen Ofen darstellt. Hierfür wurde ein „quasikontinuierlicher Ofen“ entworfen der zunächst noch die Möglichkeit hat die Verweilzeiten in den unterschiedlichen Zonen zu variieren. Das Konzept besteht aus einem Mehrkammersystem, welche mit Hilfe von

Schleusen voneinander getrennt sind und so neben unterschiedlichen Temperaturen auch unterschiedliche Atmosphären abgebildet werden können. In Abb. 4 ist ein möglicher Aufbau eines kontinuierlichen Ofens aus verschiedenen Modulen gezeigt. Vorteil dieses modularen Aufbaus besteht darin, dass der Ofen durch Wechsel der Module auch noch nachträglich anpassen lässt und so bei Änderung des Prozesses oder auch für gänzlich andere Prozesse modifiziert werden kann.

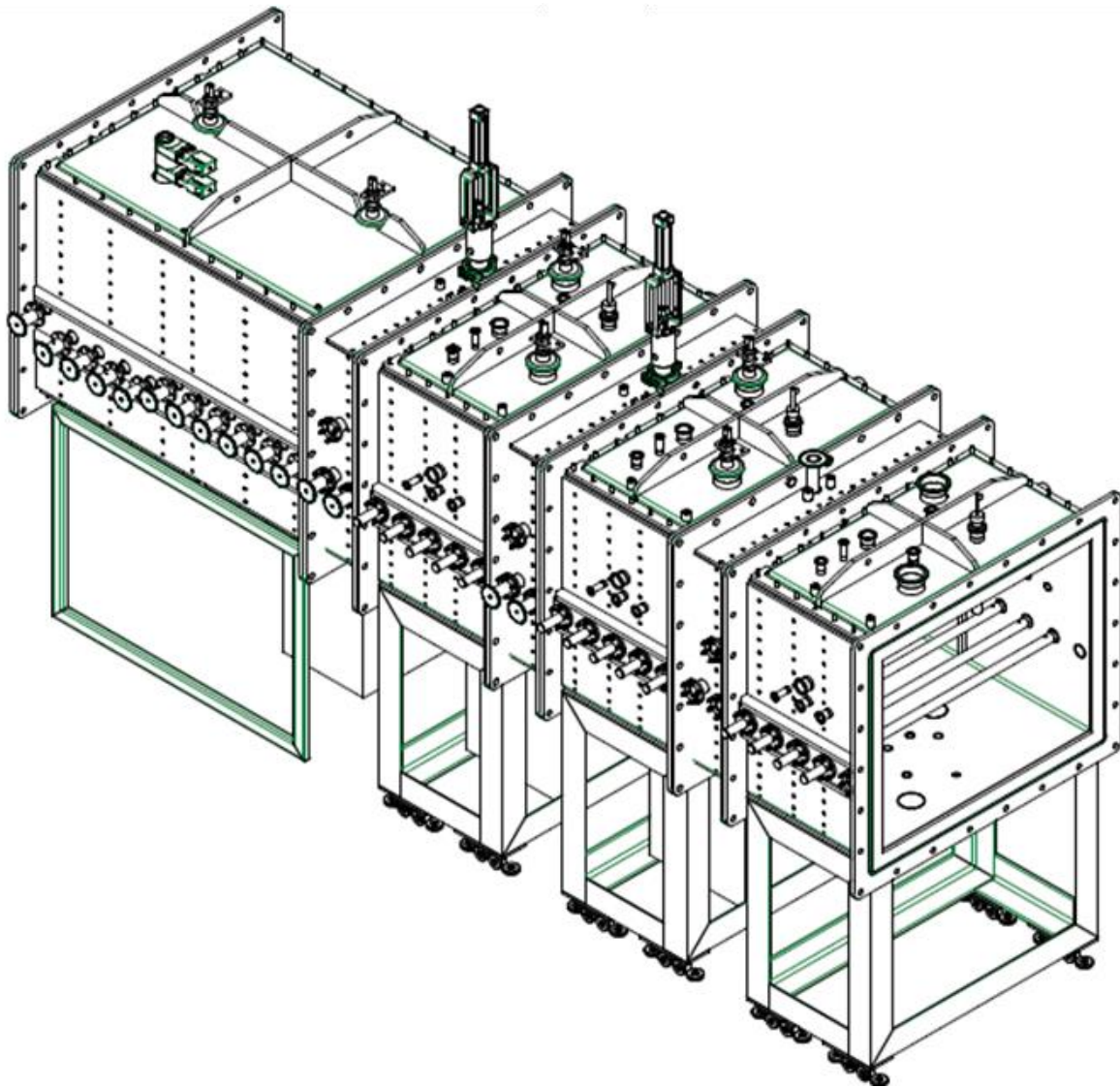


Abb. 4 Konstruktionszeichnungen des 9kontinuierlichen Ofens bestehend aus mehreren Elementen die voneinander mit Schleusen abgetrennt sind

Im Rahmen des Projekts wurde zunächst ein Heizmodul des kontinuierlichen Ofens gefertigt, in dem der jetzige Wärmebehandlungsprozess abgebildet werden kann und durch entsprechende Versuche die notwendigen einzelnen Module simuliert und ausgelegt werden können. Leider war es im Rahmen der Projektlaufzeit nicht möglich dieses Modul funktionsbereit abzuschließen und erste Tests durchzuführen. In Abb. 5 ist das gefertigte Heizmodul abgebildet.



Abb. 5 Heizmodul des entworfenen kontinuierlichen Ofens

Berechnung des CO2 Footprints

Zur Berechnung des CO2 Footprints wurden seitens MUT Advanced Heating GmbH in erster Linie Zuarbeiten durchgeführt. Dies beinhaltete einerseits die Ermittlung und Abschätzung der Verbrauchswerte von Strom, Wasser und Gasen. Die Abschätzungen wurden insbesondere für die ausgewählten Anlagen im Rahmen der Prozessskalierung durchgeführt. Das dazu erstellte Berechnungsmodell wurde ebenfalls auf die Ofenanlage der Siemens AG in München angewendet, um mit Vergleichsmessungen an dieser Anlage das Modell zu verifizieren. So konnte letzteres geprüft werden, um die Aussagekräftigkeit für größere Anlagen zu prüfen.

5.5 Thermische Prozesse - Entwicklung und Einsatz für Mustermotor

Ein weiterer wichtiger Prozessschritt bei der Weiterverarbeitung der gedruckten Bleche ist die Entbinderung und Sinterung. Hauptschwerpunkt der Arbeiten lag auf der Entwicklung eines geeigneten Wärmebehandlungsprofils für das wässrige Pastensystem. Ziel dabei ist es, die in der Paste enthaltenen Additive (Binder usw.) bei der Entbinderung restlos zu entfernen und anschließend das Material zu möglichst hoher Dichte zu verdichten. Um dies zu erreichen, wurden am Fraunhofer IFAM ein speziell instrumentierter Ofen eingesetzt. Dieser Ofen ist mit einer FTIR (Fourier Transformation Infrared Spectroscopy) Einheit ausgestattet. Mit dieser Messtechnik kann man die Spektren der entstehenden Gase während der Entbinderung im Ofen aufnehmen und darüber Rückschlüsse auf ein zeitlich optimiertes Temperaturprofil ziehen. Das Messprinzip ist nochmal schematisch in Abbildung 1 gezeigt.

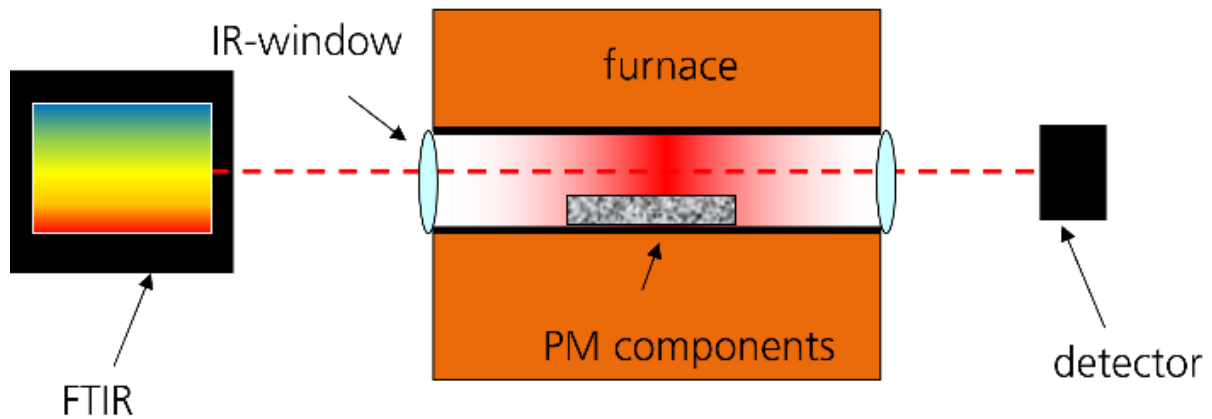


Abbildung 1: Schematische Darstellung des FTIR – Versuchsaufbau.

Insgesamt wurden drei verschiedene FTIR-Analysen mit Grünteilen (hergestellt aus dem wässrigen Pastensystem) durchgeführt und ausgewertet. Beispielhaft sind die ausgewerteten Spektren in Abbildung 2 zu sehen. In einer ersten Analyse wurde untersucht, welches Prozessgas für die Entbinderung vorteilhaft ist. Hier wurde verglichen zwischen rein inerte Entbinderung in 100% Stickstoff und einer Mischung aus Stickstoff (95%) und Wasserstoff (5%). Hier zeigten sich Vorteile des Stickstoff-Wasserstoff-Gemisches in Hinblick auf die stattfindende Entkohlung. Am Anschluss wurde das Entbinderungsprofil unter N_2/H_2 optimiert, indem Haltestufen bei den relevanten Zersetzungstemperaturen, während der Entbinderung eingeführt wurden. Nach Abschluss der Entbinderung wurden die entbinderten Bauteile in der Elementaranalyse auf verbliebenen Kohlenstoff und Sauerstoff untersucht. Hier zeigten sich schon niedrige Werte, so dass im Anschluss eine weitere FTIR-Fahrt durchgeführt, bei der die Proben bis zur Sintertemperatur von 1290 °C ausgewertet wurden. Hier zeigten sich in den ausgewerteten Profilen weitere charakteristische Temperaturen, bei denen es sinnvoll ist, den Temperaturgradienten gering zu halten, um eine weitere Entkohlung zu unterstützen. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurde ein einheitliches Entbinderungs- und Sinterprofil festgelegt, welches im Anschluss benutzt wird, um die gedruckten Bleche bei allen Projektpartnern zu sintern.

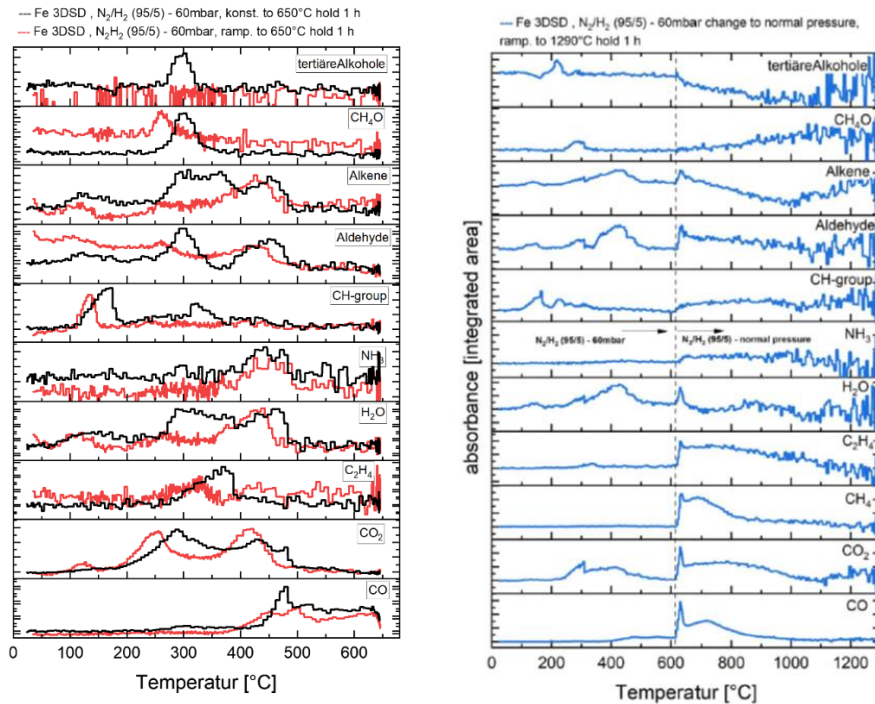
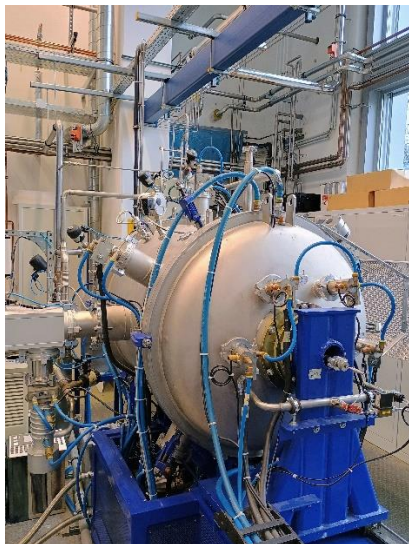


Abbildung 2: Auswertung der entstehenden Spezies bei der Entbinderung (links) bei 650°C und bei kombinierter Entbinderung und Sinterung bis 1290°C (rechts).

Eine wichtige Fragestellung bei der Herstellung des Demomotors war die Qualifizierung eines geeigneten Sinterofens, der die Zielgeometrie von Siemens verarbeiten kann. Am Fraunhofer IFAM steht ein horizontaler Entbinderungs- und Sinterofen des Projektpartners MUT zur Verfügung (siehe Abbildung 10 links), der die 230 mm großen Demobleche verdichten kann. Im inneren des Ofens stehen im Chargiergestell 5 Ebenen zur Verfügung, wo die Demobleche übereinandergestapelt werden können. Um die Gleichmäßigkeit der magnetischen Eigenschaften der gesinterten Bleche zu untersuchen, wurden gedruckte Testbleche von Siemens und IFAM im Ofenvolumen verteilt. Dies beinhaltete Einzelbleche als auch gestapelte Bleche, welche durch eine wenige Mikrometer dünne Aluminiumoxidschicht voneinander getrennt sind. Die Abbildung 3 (rechts) zeigt den Chargieraufbau inkl. der dazugehörigen Probennummern. Die Sinterung erfolgte bei einer Temperatur von 1290°C mit 3h Haltezeit.



1x 5erStapel (0329) 1x Einzelblech Siemens (SAG 34953) 1x Einzelblech IFAM (0324_03)
1x Einzelblech Siemens (SAG 34958) 1x Einzelblech IFAM (0325_03) 2x Substrate Tata
1x 10erStapel (0327) 1x 5erStapel (0326) 1x Einzelblech Siemens (SAG 34956) 1x Einzelblech IFAM (0324_08)
1x Einzelblech Siemens (SAG 34955) 1x Einzelblech IFAM (0324_07)
1x 5erStapel (0328) 1x Einzelblech Siemens (SAG 34954) 1x Einzelblech IFAM (0324_06)

Abbildung 3: Horizontaler Sinterofen der Fa. MUT am IFAM (links) und Chargieraufbau mit Probenzuordnung des 5-stöckigen Chargiergestells.

Die Abbildung 4 zeigt den Vergleich der gesinterten Demobleche als Einzelblech, 5er Stapel und 10er Stapel. Hinsichtlich Formtreue konnten vergleichbare Ergebnisse wie beim Projektpartner Siemens erzielt werden.



Abbildung 4: Abbildung von gesinterten Demoblechen als Einzelblech (links), 5er Stapel (Mitte) und 10er Stapel (rechts).

Die magnetischen Eigenschaften der gesinterten Bleche wurden bei Siemens bestimmt. Eine erste Auswertung hat ergeben, dass die Koerzitivfeldstärke unabhängig von der Position im Ofen im angestrebten Zielbereich von 35 bis 40 A/m liegen.

Motor demonstration

Prototypfertigung Bleche (s. auch 5.2)

Drucktechnische Herstellung der Bleche

Die Herstellung der Elektrobleche für den Demonstratormotor erfolgte beim Partner EKRA in Bönningheim auf dem dort entwickelten XH4-Drucksystem. Bei der Pastenauswahl wurde entschieden mit dem am IFAM etablierten Pastensystem zu arbeiten.

Die Gewebekombination erlaubte es, in Kombination mit einem neuen Flutprozess, die Zielschichtdicke von 120 µm zu erreichen, ohne die gleichmäßige Schichtdickenverteilung zu gefährden. Der neue Flutprozess wurde mit einer angewinkelten Druckrakelklinge auf Kontakt und unmittelbar nach dem

Abdrucken durchgeführt. Dadurch können die Gewebemaschen der Druckform höher befüllt werden als mit einer konventionellen, kontaktlosen 90 °C Flutrakelklinge. Die höher befüllten Maschen erlauben es, die Zielschichtdicken zu übertragen, ohne den Downstop in für die Prozessstabilität nachteilige Einstellungen bringen zu müssen. Dadurch kann die Gleichmäßigkeit der Schichtdicken über das Drucklayout deutlich verbessert werden. Die genauen Daten dazu sind in der Auswertung von Optonic aufgeführt.

Der erste Schritt der thermischen Weiterverarbeitung der gedruckten Bleche ist ein Sprühprozess zum Aufbringen einer dünnen Aluminiumoxidschicht. Diese Schicht ist notwendig, um eine Trennung der Einzelblech während und nach der Sinterung zu gewährleisten. Dieser Prozess wurde am IFAM Standort Dresden durchgeführt, um mögliche Beschädigungen der aufgesprühten Stapel beim Transport zu verhindern.

Durchgeführt wurde die Sprühbeschichtung der Grünlinge in der Sprühanlage des Labors A216 (siehe Abbildung 12). Unter Verwendung der von Siemens bereitgestellten Zutaten (Pulver: Al₂O₃, Bindemittel) und Rezeptur, wurde die Trennschicht-Slurry aufgebracht. Sprühpistolenaufsätze und -einstellungen folgten ebenfalls der bei Siemens ermittelten Best-Practice, wurde aber in Vorversuchen für den Einsatz im Labor A216 optimiert. Je zehn mit Trennschicht besprühte Grünlinge wurden auf einer Kerafol-Platte gestapelt. Pro Sinterprozess konnten 25 Stapel, also 250 Bleche gesintert werden.

Eine Illustration des Sprühpatterns befindet sich in Abb. 5 (Sprühstand links und Pattern rechts).

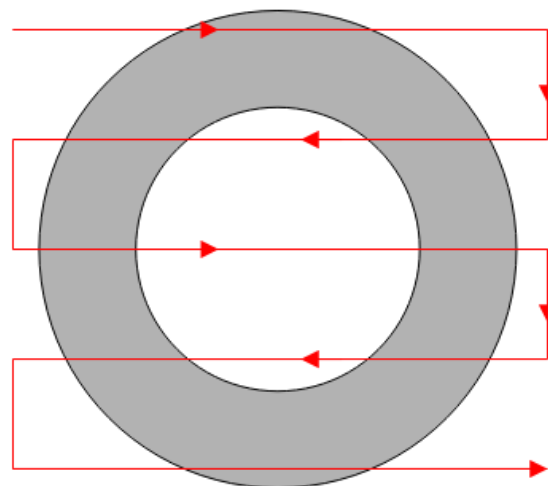


Abbildung 5: Sprühstand (links) und Sprühpattern (rechts) über Blech-Grünenteil (Symboldarstellung, grau)

In Vorversuche wurden Abstand und Geschwindigkeit des Sprühvorgangs variiert, um eine optimale Verteilung und Schichtdicke der Trennschicht zu gewährleisten. Zu dünne Trennschichten führen dazu, dass sich die Bleche nach dem Sintern nicht sauber voneinander trennen lassen. Zu dicke Trennschichten führen zu stärkerer Deformation entlang der Außenkanten der Bleche während des Sinterns.

Beste Ergebnisse wurden bei Sprühzykluszeiten von 3-4 Sekunden pro Blech bei einer Höhe von 8 – 10 cm über Substrat erzielt.

Nach dem ersten Run zeigte sich, dass die Grünlinge während des Sinterns im Stapel verrutschen können, wenn die tragende Kerafol-Platte nicht perfekt plan im Ofen positioniert liegt. Daraufhin wurde die Ausrichtung des Chargiergestells angepasst. Anschließend wurden 5 Wärmebehandlungen bei 1290°C/3h Haltezeit mit voller Ofenbeladung durchgeführt (ca. 250 Stück pro Run). Bei den Versuchen zeigte sich, dass die Menge und Verteilung des Trennmittels direkten Einfluss auf die Trennbarkeit und Verformung der oberste Blechlage hat (siehe Abbildung 6). Bei wenig Trennmittel ist die Verformung der Bleche sehr gering jedoch deren Vereinzelung sehr schwierig. Beim Aufsprühen mehrerer Lagen Trennmittel verwölbt sich die oberste Lage der Bleche aber deren Trennung kann problemlos erfolgen. Die hergestellten Blechstapel wurden anschließend zur Weiterverarbeitung an Siemens geschickt.



Abbildung 6: Aufnahmen von gesinterten 10er Stapeln mit viel (links) und wenig (rechts) aufgesprühtem Trennmittel.

In Abb. 7 ist nochmals die Übersicht zur thermischen Behandlung der Bleche in den MUT Öfen bei IFAM und Siemens dargestellt.

Stapel nach Sinterung: Gutteile



Schlechtteile



Ofenaufbau @IFAM



Ofenaufbau @ SAG



Abb. 7. Zustand der gesinterten Blechteile (rechts) nach Entnahme aus den beiden genutzten Öfen.

5.6 Konzept für die industrielle Einführung

Das übergeordnete Ziel bestand in der Entwicklung eines Konzepts zur industriellen Herstellung additiv gefertigter Magnetbleche. Zur Unterstützung dieses Ziels wurde eine ereignisdiskrete Materialflusssimulation eingesetzt, um zentrale Kennzahlen für die Auslegung und Bewertung potenzieller Produktionsanlagen zu ermitteln. Als Grundlage diente der bestehende Laborprozess bei Siemens. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden analysiert und auf ein skalierbares Industrialisierungskonzept übertragen.

Laborprozess

Analyse des Laborprozesses bei Siemens

Für die Entwicklung eines belastbaren Industrialisierungskonzepts war es erforderlich, zunächst die Materialwertströme des bestehenden Laborprozesses bei Siemens (Ist-Zustand) systematisch zu analysieren. Ziel dieser Analyse war es, eine fundierte Datenbasis zu schaffen, auf deren Grundlage Annahmen für das zukünftige industrielle Konzept getroffen werden können. Daher wurde der Materialfluss des aktuellen Laborprozesses modellhaft abgebildet und mithilfe von Plant Simulation als ereignisdiskrete Simulation umgesetzt. Die Ergebnisse dieser Simulation bilden die Grundlage für die weitere Konzeptentwicklung.

Prozessaufnahme: Analyse aktueller Laborprozess Siemens



Abb. 1: Laborprozess (Ist-Stand) bei Siemens

Obige Abbildung zeigt den Laborprozess bei Siemens. Für jeden Teilprozess wurden die notwendigen Prozessparameter wie Maschinenkapazitäten, Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten etc. ermittelt. Für die **Pastenaufbereitung und -herstellung** wird etwa 1 h benötigt. Im Kreisdissolvers können Pastenmengen von 2,5 kg, 5 kg oder 10 kg hergestellt werden, wobei das Mischen der Komponenten etwa 2h, gefolgt von einer Rüstzeit (Reinigung) von 1,5h dauert. Für einen **Siebdruckzyklus** werden zwei Kartuschen mit je 1,2kg Paste benötigt, wobei die Füllung der Kartuschen 5 min und die Rüstzeit der Siebdruckanlage zwischen zwei Druckzyklen etwa 20 min dauert. Der Drucktakt bzw. die Bearbeitungszeit für das Drucken eines Grünlings hängt u. a. vom verwendeten Blechdesign und der eingestellten Raketelgeschwindigkeit ab, liegt aber im Bereich von 6 bis 18 s. Nach dem Siebdruck durchlaufen die Grünlinge einen **Durchlauftrockner**, wobei sich bis zu zehn Bleche gleichzeitig in der Anlage befinden können. Ein Teil der Grünlinge wird aus dem Produktionsprozess entnommen und einer **optischen Qualitätskontrolle** unterzogen. Der **Sinterprozess** wird in einem Batch-Ofen durchgeführt, dessen Aufbau in Abbildung 2 dargestellt ist. Die beispielhafte Beladung des Batch-Ofens ergibt bei den 13 festen Etagen mit je vier Unterlagen zu je 5er-Stapel eine Kapazität von 260 Grünlingen. Der Aufbau des Ofengestells dauert 45 min und weitere 6 min werden für den Einbau in den Batch-Ofen benötigt. Die Sinterung der Grünlinge dauert einschließlich der Aufheiz-, Halte- Abkühlphase je nach Programm etwa 18-22h. Anschließend werden die Bleche entnommen und im Falle von Stapeln voneinander getrennt.

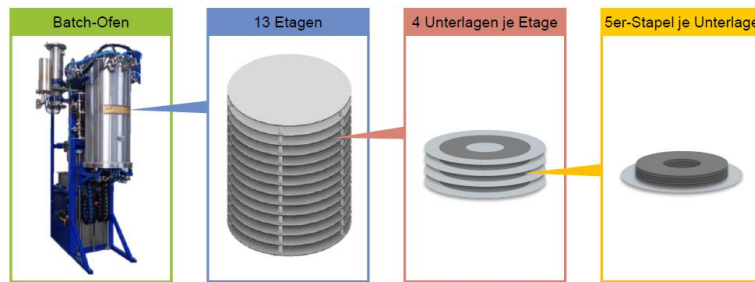


Abb. 2: Aufbau und daraus berechenbare Kapazität eines Batch-Ofens der MUT Advanced Heating GmbH
Die im Produktionsprozess beschriebenen Teilprozesse und die damit verbundenen Maschinen und Arbeitsplätze sind bei Siemens in München auf drei Laborräume und einen Nebenraum verteilt. Abbildung 3 zeigt die räumliche Anordnung.

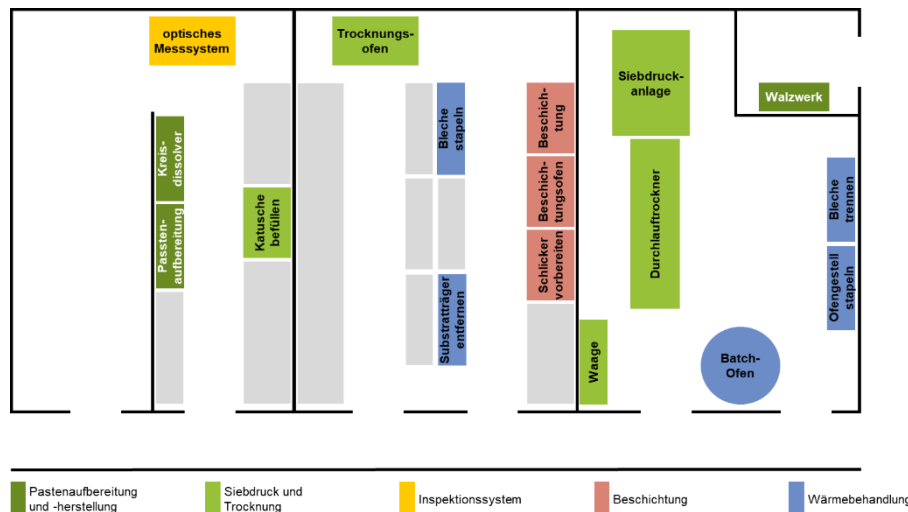


Abb. 3: Räumliche Anordnung der Maschinen und Arbeitsplätze im Labor

Modellierung in Plant Simulation

Anschließend wurde auf Basis der Anlagen ein Simulationsmodell in Plant Simulation für den Laborprozess entwickelt. Die Maschinenkapazitäten, Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten etc. wurden hierbei aus der Prozessaufnahme der realen Produktion übernommen. Eine visuelle Darstellung des entwickelten Simulationsmodells für die Herstellung additiv gefertigter Magnetbleche im aktuellen Laborprozess ist in Abbildung 4 dargestellt.

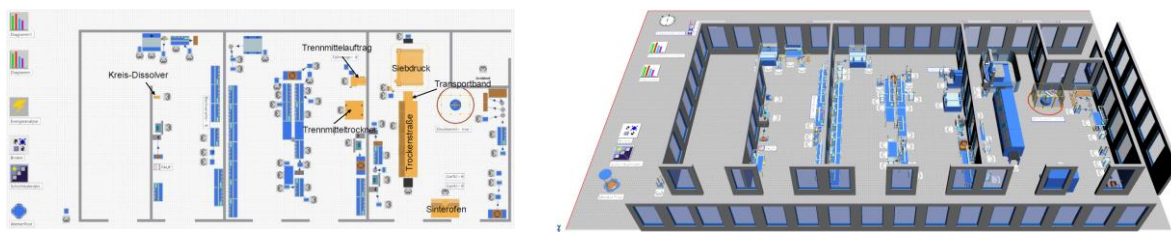


Abb. 4: Modellierung des Laborprozesses bei Siemens (Ist-Zustand) in Plant Simulation (2D- und 3D-Ansicht)

Verifikation und Validierung anhand realer Vorserienproduktion

Eine Verifikation und Validierung des Simulationsmodells geschieht durch den Vergleich des erstellten Modells mit einer im Laborprozess durchgeführten Vorserienproduktion, indem dieselben

Eingangsdaten aus der Realität auch für die Modellierung verwendet werden. Auf diese Weise können die aus der Simulation resultierenden Ergebnisse mit den Mengen auf den Druckprotokollen verglichen und somit das erstellte digitale Abbild validiert werden. Abbildung 5 zeigt die Produktionstage und -mengen im Vergleich zwischen den Druckprotokollen und der Simulation.

Druck-datum	Anzahl aus Protokoll [Stück]	Anzahl aus Simulation [Stück]	Druck-datum	Anzahl aus Protokoll [Stück]	Anzahl aus Simulation [Stück]
15.-16.5.23	142	133	10.7.23	199	200
23.5.23	138	133	17.7.23	216	200
25.5.23	133	133	24.7.23	216	200
6.6.23	140	133	26.7.23	111	133
14.6.23	140	133	16.8.23	217	200
19.6.23	121	133	22.8.23	195	200
21.6.23	196	200	24.8.23	126	133
26.6.23	192	200	30.8.23	104	133
28.6.23	194	200	4.9.23	215	200
3.7.23	196	200	6.9.23	216	200
5.7.23	198	200	11.9.23	217	200
			Gesamt	3.822	3.797

Abb. 5: Vergleich Druckprotokolle der Vorserienproduktion mit Simulation

Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell das Verhalten des Laborprozesses mit hinreichender Genauigkeit wiedergibt. Darüber hinaus kann eine visuelle Kontrolle des Ablaufs durch eine Animation des Simulationsmodells die Richtigkeit der modellierten Prozesse bestätigen.

Simulation des Labor-Ist-Zustands in Plant Simulation für 1 Jahr

Für das validierte Simulationsmodell des aktuellen Laborprozesses wird mit den ermittelten Daten eine **Ganzjahresproduktion** von Magnetblechen simuliert und Kennzahlen für eine spätere Bewertung der Weiterentwicklungen erhoben werden. Ziel ist, die dabei gewonnenen Erkenntnisse bei der Gestaltung des Industrialisierungsprozesses zu nutzen.

Es werden zwei Designs von Magnetblechen betrachtet, wobei „Variante A“ 12 g und „Variante B“ 7 g wiegt. Der Laborprozess wird von insgesamt vier Mitarbeitern simuliert, die jeweils unterschiedliche Aufgabenschwerpunkte haben. Aus Gründen der Modellabstraktion werden Urlaubstage und krankheitsbedingte Fehlzeiten zunächst nicht berücksichtigt. Weiterhin wird in den Simulationsmodellen eine Anlaufzeit von einer Woche berücksichtigt, damit sich in der Simulation ein stabiler Zustand einstellt. Anschließend wird der stabile Laborprozess zur Herstellung der Magnetbleche über einen Zeitraum von einem Jahr in der Simulation abgebildet und ausgewertet. Zur besseren Risikoabschätzung und Entscheidungsfindung werden sowohl Best-Case- als auch Worst-Case-Szenarien erstellt. Dabei geht das Best-Case-Szenario von idealen Bedingungen ohne statistische Störungen aus, während beim Worst-Case-Szenario statistische Störungen bei den Anlagen und somit eine reduzierte Anlagenverfügbarkeit berücksichtigt werden.

Simulationsergebnisse

Die Ausbringungsmengen und Personalauslastungen für eine ganzjährige Produktion mit zwei Designs von Magnetblechen im aktuellen Laborprozess sind für das Worst-Case-Szenario mit 1er-, 5er- und

10er-Stapeln in der Abbildung 6 dargestellt. Es ist erkennbar, dass mit 5er/10er Stapeln beim Sintern eine weitaus höhere Ausbringung in den Batchöfen erreicht werden kann. Abbildung 7 zeigt zudem die Maschinenauslastungen. Es zeigt sich, dass im aktuellen Laborprozess insbesondere der Batch-Ofen das Bottleneck darstellt. Abbildung 8 zeigt zudem die Personalauslastungen.

Stapelhöhe	Ausbringung [Stück / Jahr]	Personalauslastung [%]			
		Werker 1: Paste	Werker 2: Siebdruck & Inspizieren	Werker 3: Siebdruck, Sintern	Werker 4: Beschichten
1	18.069	20,21	39,48	61,95	-
5	44.654	31,17	83,29	83,68	76,79
10	46.616	31,40	83,88	83,83	78,05

Abb. 6: Ausbringung und Personalauslastung für das Worst-Case-Szenario in Abhängigkeit der Stapelhöhe für den Ist-Zustand des Laborprozesses

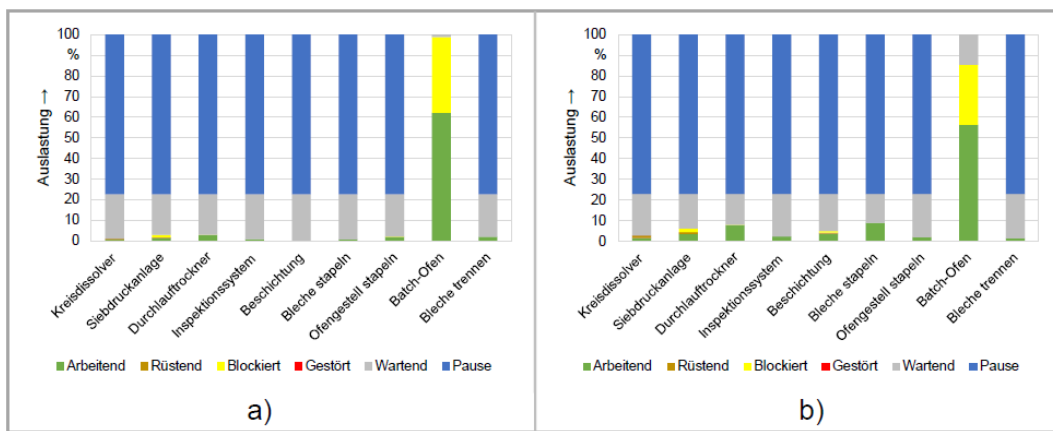


Abb. 7: Vergleich der Maschinenauslastungen für den Ist-Zustand bei einer Produktion mit (a) 1er- und (b) 10er-Stapel im Best-Case-Szenario

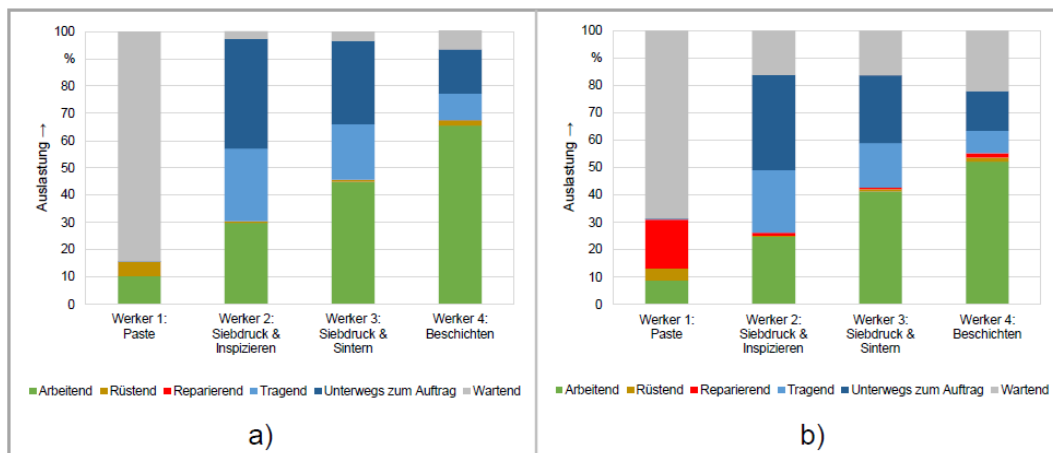


Abb. 8: Personalauslastung für den Ist-Zustand mit 10er-Stapel im (a) Best-Case- und (b) Worst-Case-Szenario

Insgesamt kann der **Batch-Ofen als Bottleneck** im Laborprozess identifiziert werden. Anhand der Personalauslastungsdaten ist hingegen zu erkennen, dass die beiden Mitarbeiter, die für den Siebdruck, die Inspektion und das Sintern zuständig sind, bei den 5er- und 10er-Stapeln voll ausgelastet sind und somit für den Engpass im Prozess sorgen. Es wird deutlich, dass der aktuelle Prozess durch eine

ineffiziente Anordnung der Arbeitsplätze und Maschinen für lange Fußwege, viele manuelle Transporte, einige Zwischenpuffer und daraus resultierende Wartezeiten gekennzeichnet ist.

Materialwertstrom

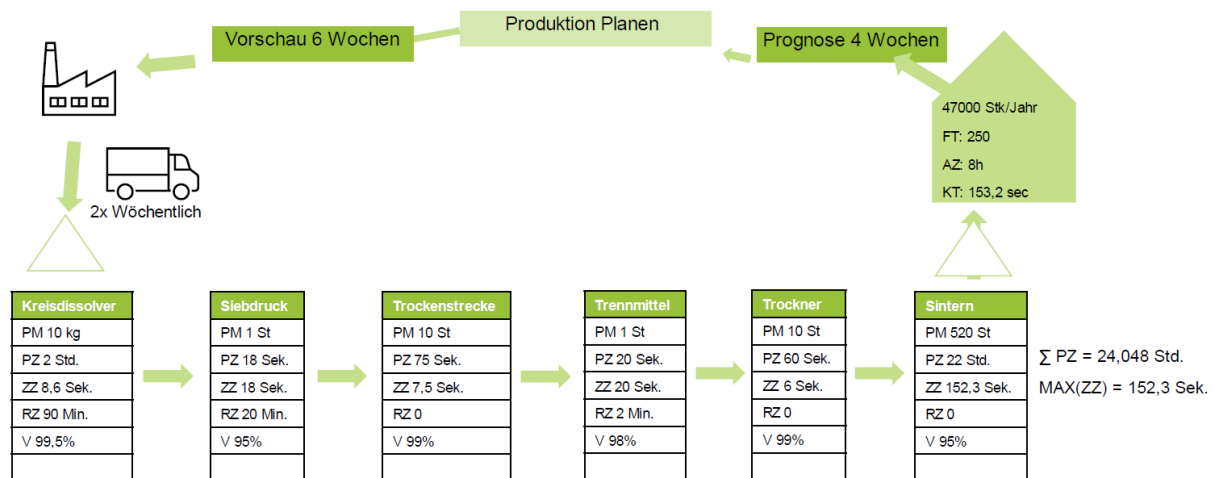


Abbildung 9: Übersicht Materialwertstrom Laborprozess

Abbildung 9 zeigt den Materialwertstrom des Laborprozesses. Der abgebildete Wertstrom enthält die Prozessmengen (PM), Prozesszeiten (PZ) und Zykluszeiten (ZZ) für jede Station. Für die Bestimmung der Zykluszeiten sind neben Prozessmengen und Prozesszeiten auch die Anzahl der Ressourcen relevant. Es werden nur die Stationen in den Wertstrom aufgenommen, die einen relevanten Energieverbrauch haben und Teil des Hauptprozessflusses sind. Die Mengen und Zeiten wurden mithilfe vorhandener Simulationsmodelle für den Materialfluss bestimmt. Aus dem Wertstrom des Laborprozesses lässt sich die Prozessmenge pro Fertigungsvorgang für jede Station entnehmen. Die Prozessmenge ist, außer beim Kreis-Dissolver, in Stück angegeben, wobei ein Stück einem gedruckten Magnetblech entspricht. Mit der Prozessmenge und Prozesszeit kann die Zykluszeit (ZZ) bestimmt werden, die angibt, wie lange es im Durchschnitt dauert, ein Fertigteil zu produzieren. Die Station mit der höchsten ZZ ist der Engpass des Fertigungsprozesses, im Laborprozess ist das der Sinterofen mit 152,3 Sekunden. Die simulierte Durchlaufzeit liegt im Durchschnitt bei ca. 5,5 Tagen. Insgesamt können im Labor-Ist-Zustand etwa **47.000 Bleche jährlich** produziert. Bei einem Einschichtbetrieb mit acht Stunden Arbeitszeit und 250 Arbeitstagen kann ein Kundentakt von ca. 153 Sekunden bedient werden.

Ausbaustufen eines möglichen Soll-Zustandes des Laborprozesses

Durch die Weiterentwicklung des Modells des Laborprozesses in Ausbaustufen kann das Automatisierungspotenzial erweitert werden. Im Folgenden werden drei Ausbaustufen vorgestellt, um die Produktivität eines möglichen Soll-Prozesses zu steigern. Als Rahmenbedingung für die Weiterentwicklung des derzeitigen Laborprozesses sind der Siebdruck und Batch-Ofen als gegeben anzusehen, die räumlichen Gegebenheiten sind zu vernachlässigen. In der **ersten Stufe** wird ein flussoptimiertes Modell vorgestellt. Die einzelnen Teilprozesse können bei Bedarf durch automatisierte Handhabungslösungen wie Förderbänder in die Linie integriert oder durch Industrieroboter miteinander verknüpft werden. In der **zweiten Stufe** werden die Prozesszeiten und Kapazitäten des aktuellen Laborprozesses an den gerichteten Materialfluss angepasst. In einer **dritten Stufe** wird schließlich aufgezeigt, welche

Ausbringung mit den verschiedenen Schichtmodellen erreicht werden kann. Damit soll herausgefunden werden, ob sich daraus ein für diesen spezifischen Produktionsprozess besser geeignetes Schichtmodell ableiten lässt.

Ausbaustufe 1 – Flussoptimierung

Prozessgestaltung

In der ersten Ausbaustufe werden Maschinen ohne räumliche Einschränkungen als gerichteter Materialfluss integriert, unterstützt durch Förderbänder oder Industrieroboter. Ziel ist es, die maximal möglichen Stückzahlen und den Energiebedarf der im Labor vorhandenen Maschinen zu ermitteln, wobei räumliche Restriktionen vernachlässigt werden. Der Hauptunterschied zum Laborprozess ist die Automatisierung vieler Transporttätigkeiten sowie der Stationen Wiegen und Trennmittelauftrag.

Modellierung

Durch eine flussoptimierte und teilautomatisierte Prozessgestaltung soll die Anzahl der Mitarbeiter flexibel an die Auslastung und Produktivität angepasst werden. Jeder Mitarbeiter kann alle Aufgaben ausführen. Abbildung 10 zeigt die erste Ausbaustufe des Laborprozesses, die sich auf die Flussoptimierung konzentriert.

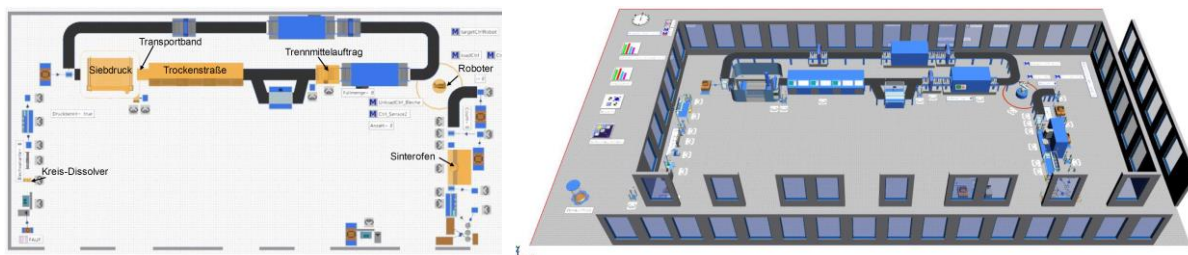


Abbildung 10: Modellierung und Simulationsmodell des Laborprozesses im Soll-Zustand als teilautomatisierte Linie

Simulationsergebnisse

Für eine Jahresproduktion mit zwei Designs von Magnetblechen und einem flussoptimierten Soll-Prozess sind die Ausbringungsmengen und der Personaleinsatz mit 1er-, 5er- und 10er-Stapeln in folgender Tabelle dargestellt. Im flussoptimierten Szenario reicht ein Mitarbeiter aus, um alle Maschinen zu bedienen und zu rüsten sowie alle manuellen Tätigkeiten auszuführen. In der flussoptimierten Ausbaustufe können ca. 50.000 Magnetbleche pro Jahr produziert werden.

Stapelhöhe	Ausbringung [Stück / Jahr]	Personalauslastung [%]
		Werker 1
1	17.377	53,60
5	49.647	67,06
10	49.647	65,59

Abbildung 11: Ausbringung und Personalauslastung in Abhängigkeit der Stapelhöhe für den flussoptimierten Soll-Zustand

Ausbaustufe 2 – Zeit- und Kapazitätsanpassungen

Prozessgestaltung

In der zweiten Ausbaustufe werden die Bearbeitungszeiten und Kapazitäten an den flussoptimierten Soll-Zustand angepasst. Basis für die Abstimmung aller Bearbeitungszeiten der teilautomatisierten Linie ist der Durchlauftrockner, sodass Grünlinge mit einer Taktzeit von ca. 8 Sekunden hergestellt werden können. Die optische Inspektion prüft nicht jedes Bauteil, sondern schließt nach einer erfolgreichen Inspektion, die idealerweise 2 Minuten dauert, ein neues Teil aus dem Produktionsprozess aus. Die Bearbeitungszeit wird von bisher 22 Stunden im Laborprozess auf 14 Stunden reduziert. Es ergibt sich bei 13 Etagen eine Ofenkapazität von 520 Grünlingen pro Ofenlauf.

Modellierung

Die Anzahl der Mitarbeiter soll variabel gehandhabt und entsprechend der Auslastung und Gesamtproduktivität angepasst werden. Es wird angenommen, dass jeder Mitarbeiter alle Tätigkeiten ausführen kann.

Simulationsergebnisse

Die verkürzten Bearbeitungszeiten und die erhöhte Ofenkapazität wirken sich durch die damit verbundene Produktivitätssteigerung auch auf den Personaleinsatz aus. In Abbildung 12 sind die Ausbringungsmengen und die hierfür zu erwartende Personalauslastung mit einem Werker für bei einer Jahresproduktion mit zwei verschiedenen Designs von Magnetblechen und einem hinsichtlich Materialfluss, Zeit und Kapazität ideal gestalteten Prozess aufgeführt. Es ist eine Ausbringungsmenge von ca. 93.000 Teilen erwartbar. Insgesamt lassen die Erkenntnisse darauf schließen, dass der Einschichtbetrieb für die stark variierenden Losgrößen und Bearbeitungszeiten der einzelnen Prozessschritte nicht das geeignetste Schichtmodell ist.

Stapelhöhe	Ausbringung [Stück / Jahr]	Personalauslastung [%]
		Werkler 1
10	92.359	90,02
20	92.891	86,69

Abbildung 12: Ausbringung und Personalauslastung in Abhängigkeit der Stapelhöhe für den nach Fluss, Zeit und Kapazität ideal gestalteten Soll-Zustand mit einem Mitarbeiter

Ausbaustufe 3 – Analyse verschiedener Schichtmodelle

Prozessgestaltung

Als letzte Ausbaustufe wird der Personalbedarf für verschiedene Schichtmodelle und die sich hieraus ergebenden Produktivitätszahlen ermittelt. Ziel ist es, einerseits eine möglichst hohe Auslastung des Batch-Ofens und damit die Gesamtausbringung zu erhöhen. Gleichzeitig soll der Personalbedarf so gering wie möglich gehalten werden. Daher ist ein für den spezifischen Produktionsprozess sinnvolles Schichtmodell zu ermitteln.

Modellierung

Da die Kapazität des Batch-Ofens insgesamt 520 Bleche beträgt, unabhängig von der Stapelhöhe, werden nur Stapel mit 20 Blechen berücksichtigt. Krankheitsbedingte Fehlzeiten und Urlaubstage werden aus Gründen der Modellabstraktion vernachlässigt.

Simulationsergebnisse

Schichtmodell	Ausbringung [Stück / Jahr]	Auslastung Batch-Ofen [%]
Einschichtbetrieb von Mo – Fr	103.246	33,49
Einschichtbetrieb von Mo – Sa	128.440	41,67
Einschichtbetrieb von Mo – So	154.128	50,00
Zweischichtbetrieb von Mo – Fr	169.898	54,87
Zweischichtbetrieb von Mo – Sa	206.492	66,82
Zweischichtbetrieb von Mo – So	243.960	79,03
Dreischichtbetrieb von Mo – Fr	198.588	64,23
Dreischichtbetrieb von Mo – Sa	242.041	78,17
Dreischichtbetrieb von Mo – So	277.628	89,97

Abbildung 13: Ausbringung und Auslastung des Batch-Ofens mit 20er-Stapel für den nach Fluss, Zeit und Kapazität ideal gestalteten Soll-Zustand bei verschiedenen Schichtmodellen

Der Zweischichtbetrieb von Montag bis Sonntag weist sowohl die zweithöchste Produktivität je Mitarbeiter als auch die dritthöchste Produktivität je Produktionsstunde auf. In diesem Szenario sorgen insgesamt vier Mitarbeiter für eine Ausbringung von ca. 244.000 Magnetblechen pro Jahr. Dabei kann der zweite Ofenlauf in der produktionsfreien Zeit weiterbetrieben und dann im Laufe des nächsten Arbeitstages entnommen werden. Somit erweist sich der Zweischichtbetrieb von Montag bis Sonntag als die geeignetste Variante für den Laborprozess zur additiven Fertigung von Magnetblechen.

Gegenüberstellung der Ausbaustufen

Ausbaustufe	Ausbringung [Stück / Jahr]	Personal- bedarf
Ist-Zustand: Einschichtbetrieb von Mo – Fr, 10er-Stapel, Worst-Case-Szenario	46.616	4
Flussoptimierung: Einschichtbetrieb von Mo – Fr, 10er-Stapel, Worst-Case-Szenario	49.647	1
Zeit- und Kapazitätsanpassung: Einschichtbetrieb von Mo – Fr, 20er-Stapel, Worst-Case-Szenario	103.246	2
Zusätzliche Schichten: Zweischichtbetrieb von Mo – So, 20er-Stapel, Worst-Case-Szenario	243.960	4

Abbildung 14: Gegenüberstellung der Ausbaustufen des Laborprozesses hinsichtlich Ausbringung und Personalbedarf

Wie aus Abb. 14 ersichtlich ist, kann durch den stufenweisen Ausbau des Laborprozesses die jährliche Ausbringung gesteigert und gleichzeitig der Personalbedarf gesenkt bzw. konstant gehalten werden. Allerdings kann selbst bei Ausbaustufe 3 mit einem Zweischichtbetrieb von Montag bis Sonntag mit 20er-Stapeln nur eine Ausbringung von ca. 244.000 Magnetblechen pro Jahr erreicht werden, was etwa 2,9 t/a entspricht. Daraus lassen sich, je nach Statorpaketabmessung, etwa 200 Statorpakete herstellen. Um den Zielwert von 60 t/a produzieren zu können, ist somit eine Steigerung um ca. den Faktor 20 notwendig. Aus diesem Grund ist ein Industrialisierungskonzept zur Produktion großer Stückzahlen Magnetbleche notwendig.

Industrialisierungskonzept

Der Übergang vom Laborprozess zur industriellen Produktion erfordert ein umfassendes Industrialisierungskonzept, das zentrale Faktoren wie Skalierbarkeit, Zuverlässigkeit, Kosteneffizienz, geeignete Fertigungstechnologien sowie Automatisierung berücksichtigt. Im Rahmen des Projekts wurden hierfür verschiedene Skalierungsstufen erarbeitet, die auf Konzepten für eine industrielle Siebdruckanlage mit Durchlauftrockner, ein Inline-Inspektionssystem, eine Inline-Beschichtungsanlage sowie industrielle Batch-Öfen zur Wärmebehandlung basieren.

Die entwickelten Anlagen- und Produktionskonzepte wurden in ein ereignisdiskretes Simulationsmodell überführt. Dieses Modell diente dazu, die potenzielle jährliche Ausbringungsmenge unter verschiedenen Auslegungsszenarien zu ermitteln. Ziel war es, eine optimale Gestaltung des industriellen Produktionsprozesses zu identifizieren und belastbare Aussagen zur Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit der geplanten Fertigungslinie zu treffen.

Datenbeschaffung und Annahmen für die Anlagen im Industrialisierungskonzept

Wareneingang

Das Ausgangsmaterial für das Industrialisierungskonzept ist eine vorgemischte Paste, die in 60-Liter-Stahlfässern mit einem Gewicht von 240 kg angeliefert wird. Die Fässer werden mithilfe von Saugmischern der Siebdruckanlage zugeführt, um eine nahezu kontinuierliche Pastenzufuhr zu gewährleisten.

Siebdruckanlage



Kennzahl	Siebdruckanlage
Prozessmenge (PM)	4 Bleche
Prozesszeit (PZ)	8 Sekunden
Zykluszeit (ZZ) (bei einer Anlage)	2 Sek / Blech
Verfügbarkeit	95%
Jahresproduktion*	ca. 12 Mio. Bleche/a → ca. 150 t/a

* Annahmen: 300 Arbeitstage, 3-Schichtbetrieb, 12g/Blech

Abbildung 15: Materialfluss-Kennzahlen der voll-automatisierten Siebdruckanlage als Zwei-Linien-Drucker

Die Siebdruckanlage ist als zweiseitiges Doppelkammersystem konzipiert. Wie in Abbildung 15 dargestellt, können durch Mehrfachdruck und die Vergrößerung der nutzbaren Siebfläche auf 600 x 600 mm in jeder Kammer jeweils zwei Bleche auf einen Substratträger gedruckt werden. Dadurch wird der Durchsatz der herstellbaren Grünlinge erheblich gesteigert. Die finale Siebdruckanlage verfügt über ein geschlossenes System für die Substratträger, die nach der Entnahme der Grünlinge über ein Förderband transportiert, gereinigt und beschichtet werden, bevor sie wieder in die Anlage gelangen. Der Drucktakt pro Substratträger beträgt 8 Sekunden, wodurch sich für die gesamte Siebdruckanlage eine

Taktzeit von 2 Sekunden pro Grünling ergibt. Bei einer Anlagenverfügbarkeit von 95% können somit etwa 150 t/a produziert werden. Die Ziel-Jahresproduktion von 60 t/a kann somit erreicht werden.

Durchlauftrockner

Im Anschluss an die Siebdruckanlage folgt die Trocknung der Grünlinge. Alle Annahmen für die Integration des Durchlauftrockners im Simulationsmodell sind in folgender Tabelle dargestellt.

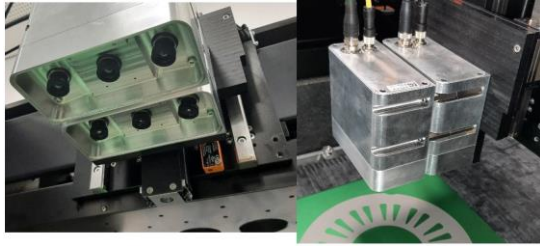
Angenommene Produktionskennzahlen		
Abmessung Ofenraum L x B x H	26,25 x 1,2 x 0,3	m
Abmessung Substratträger L x B x H	600 x 600 x 1,5	mm
Bearbeitungszeit	5	min
Kapazität je Substratträger	4	Stück
Max. Kapazität an Substratträgern im Durchlauftrockner	80	Stück
Max. Kapazität des nachgelagerten Leerlaufpuffers	200	Stück
Taktzeit pro Grünling	0,9375	s
Maximaler Durchsatz in 24 h	92.160	Stück
Maximaler Durchsatz pro Jahr	336,4	t/a

Abbildung 16: Auf Annahmen basierende Produktionskennzahlen für die Auslegung des industriellen Durchlauftrockners

Hierfür ist ein zweispuriger und 26,25 m langer Durchlauftrockner konzipiert, in dem auf jeder Spur bis zu 40 Substratträger hintereinander bei 180 °C für 5 min durchlaufen. Daraus ergibt sich eine theoretisch mögliche Taktzeit von 7,5 s pro Substratträger bzw. 0,94s pro Grünling. Im Anschluss an den Durchlauftrockner befindet sich hinter jeder Spur ein Leerlaufpuffer mit Platz für bis zu 200 Substratträger. Im Falle einer Störung eines nachgelagerten Prozessschrittes können die in dem Durchlauftrockner befindlichen Substratträger zwischengelagert und eine Fortführung des Siebdruckbetriebes ohne Blockade für mehr als 21 min gewährleistet werden. Für den Durchlauftrockner selbst werden zwei Arten von Störungen berücksichtigt. Diese sind zum einen ein defekter Sensor und zum anderen ein Motorsausfall, die beide durch eine Dreiecksverteilung im Modell abgebildet werden.

Inspektionssystem

Ein Inline-Messsystem zur optischen Qualitätskontrolle der Grünlinge soll integriert werden, um Druckfehler und Schichtdickenabweichungen zu erkennen. Bei Abweichungen erfolgt eine Rückmeldung an die Siebdruckanlage, um die Fehlerquote zu reduzieren. Es werden zwei parallellaufende 3D-Kameras eingesetzt. Der Scan dauert 20 Sekunden, jedoch wird nicht jedes Bauteil geprüft, da die Datenverarbeitung länger als der Drucktakt dauert. Eine Ziel-Inspektion von 3 Teilen/min ist realistisch.



Kennzahl	Optische Kontrolle
Prozessmenge (PM)	1 Bleche
Prozesszeit (PZ)	20 Sekunden
Zykluszeit (ZZ) (bei einer Anlage)	20 Sek / Blech
Verfügbarkeit	95%
Jahresproduktion*	ca. 1,2 Mio. Bleche/a → ca. 15 t/a

* Annahmen: 300 Arbeitstage, 3-Schichtbetrieb, 12g/Blech

Abbildung 17: Materialfluss-Kennzahlen der optischen Inspektion

Beschichtung

Die Isolierung zur Erhöhung des Stapelfaktors soll in die Prozesskette integriert werden, wobei das Sprühverfahren als Beschichtungstechnik gewählt wurde. Der Schlicker muss nach jeweils 10.000 Substratträgern nachgefüllt werden, wofür eine Rüstzeit von 20 Minuten angesetzt wird.

Wärmebehandlung mit Batch-Ofen



Kennzahl	Batch-Ofen
Prozessmenge (PM)	14.400 Bleche
Prozesszeit (PZ)	14h
Zykluszeit (ZZ) (bei einer Anlage)	3,5 Sek / Blech
Verfügbarkeit	95%
Jahresproduktion*	ca. 7,0 Mio. Bleche/a → ca. 84 t/a

* Annahmen: 300 Arbeitstage, 3-Schichtbetrieb, 12g/Blech

Abbildung 18: Materialfluss-Kennzahlen des industriellen Batch-Ofens

Zur Dimensionierung eines industriellen Batch-Ofens wird ein Ofenvolumen von ca. 0,5 m³ (Ofeninnenraum: H=1m, D=0,8m) angestrebt und ist somit ca. 20x größer als das des Laborofens. Beim Einsatz von Batch-Öfen werden die Grünlinge mit einem Industrieroboter von den Substratträgern abgenommen und auf Sinterunterlagen gestapelt. Ein zusätzlicher Industrieroboter platziert die erforderlichen Abstandhalter auf jeder Sinterunterlage, um mehrere Sinterunterlagen in einer Etage zu stapeln, wie in Abbildung 18 dargestellt. Die weitere Verarbeitung der beladenen Sinterunterlagen erfolgt jedoch manuell. Zunächst müssen zehn Sinterunterlagen händisch auf einer Etage abgelegt werden, wofür pro Sinterunterlage 3 s benötigt werden. Anschließend werden die beladenen Etagen zur Bodenplatte transportiert und dort aufeinander gestapelt. Die einzelnen Etagen sind ebenfalls durch Abstandhalter voneinander separiert. Für das Einbringen der Abstandhalter und das Einsetzen einer Etage werden jeweils 20 s benötigt. Für den Transport der fertigen Bodenplatte ist ein Gabelstapler oder ein ähnliches Handhabungssystem erforderlich, da das beladene Ofengestell mit bis zu 14.400 Grünlingen, 720 Sinterunterlagen, 72 Etagen, diversen Abstandhaltern und der Bodenplatte ein erhebliches Gewicht aufweist. Ein Ofenlauf mit dem konzipierten Batch-Ofen benötigt 14 h zum Sintern der Grünlinge. Bei 20er-Stapeln, einem Durchschnittsgewicht von 10 g je gesinterten Magnetblech und einer ganzjährigen

ununterbrochenen Produktion ergibt sich bei 95% Anlagenverfügbarkeit eine theoretische Produktionsleistung von ca. 84 t/a bei einer Taktzeit von 3,5s pro Magnetblech. Somit ist ein industrieller Batch-Ofen für die Ziel-Jahresproduktion von 60 t/a ausreichend.

Modellierung des Industrialisierungskonzepts in Plant Simulation

Die Anzahl der Arbeitstage im Szenario beträgt 300 Tage pro Jahr, berechnet aus 365 Kalendertagen abzüglich 53 Sonntagen für Wartungsarbeiten und zwölf gesetzlichen Feiertagen in Bayern, die nicht auf einen Sonntag fallen. Der Durchlauftrockner und die Wärmebehandlungskonzepte laufen sonntags weiter, sodass ein am Samstag begonnener Ofenlauf am Sonntag fortgesetzt wird und am nächstmöglichen Arbeitstag zur Abholung bereitsteht. Das Schichtmodell ist ein Dreischichtbetrieb von Montag bis Samstag. Eine Vorlaufzeit von einer Woche wird für die Simulationszeit berücksichtigt. In jeder Schicht steht ein Mitarbeiter für die Bedienung des Gabelstaplers zur Verfügung. Die Anzahl der eingesetzten Mitarbeiter wird flexibel angepasst, um sicherzustellen, dass sie nicht den Engpass in der Produktionslinie darstellen. Diese zusätzlichen Mitarbeiter führen Rüst- und Instandsetzungsarbeiten sowie Transport- und Handhabungsarbeiten durch, abhängig vom Sinterkonzept.



Abbildung 19: Simulationsmodell Industrialisierungskonzept Batchöfen (2D- und 3D-Ansicht)

Die Prozessreihenfolge unterscheidet sich im Serienprozess nur geringfügig vom Laborprozess, die Dimensionen der eingesetzten Stationen sind jedoch um ein Vielfaches größer. Im Serienprozess wird auf zwei parallelen Linien produziert, und die Metallpaste wird bereits fertig angeliefert, wodurch der Kreis-Dissolver entfällt. Der Serienprozess beginnt mit einem Saugmischer, der die Paste an die Druckmaschine übergibt. Anschließend folgen die Stationen Trockenstrecke, Inspektion und Trennmittelauftrag. Zwei Roboter heben die gedruckten Bleche von der Druckunterlage auf die Sinterunterlage. Anschließend werden die Bleche manuell gestapelt und schließlich entbindert und gesintert. Nach dem Sintern werden die Sinterunterlagen, Abstandhalter und Fertigteile getrennt. Aufgrund der weitgehenden Automatisierung sind im Serienprozess nur drei Mitarbeiter pro Schicht erforderlich.

Simulation des Industrialisierungskonzepts in Plant Simulation für 1 Jahr

Anzahl an Batch-Öfen	Drucktakt [s]	Durchsatz [t/a]
1	25,0	75,5
2	13,0	145,5
3	8,7	214,4
4	8,0	239,7

Abbildung 20: Steuerung des jährlichen Durchsatzes in Abhängigkeit vom Drucktakt und der Anzahl der eingesetzten Batch-Öfen mit 20er-Stapel

Die Tabelle zeigt, wie der Drucktakt verändert werden muss, um die jeweils eingesetzten Batch-Öfen maximal auszulasten, bis die Kapazitätsgrenze der Siebdruckanlage bei einem Drucktakt von 8 s erreicht ist. Daraus wird ersichtlich, ab welcher angestrebten Produktionsleistung wie viele Batch-Öfen eingesetzt werden müssen. Es zeigt sich, dass bei einem Durchsatz von 75,5 t/a und einem Drucktakt von 25,0 s die Produktionslinie für einen Batch-Ofen ausgetaktet ist. Der Durchsatz von ca 240 t/a wird bei vier Batch-Öfen und einem Drucktakt von 8 s erreicht. Neben dem Gabelstaplerfahrer werden für die Szenarien mit einem und zwei Batch-Öfen zwei weitere Mitarbeiter und für die Szenarien mit drei und vier Batch-Öfen drei weitere Mitarbeiter für Rüst-, Reparatur-, Transport- und Handhabungsarbeiten benötigt.

Stapelhöhe	Durchsatz [t/a]	Auslastung Siebdruckanlage [%]	Auslastung Batch-Öfen [%]	Benötigte Mitarbeiter
1	14,3	5,5	99,6	3
20	239,7	92,3	82,0	3

Abbildung 21: Vergleich von 1er- und 20er-Stapel bei einem Drucktakt von 8 s und beim Einsatz von vier Batch-Öfen

Bei 20er-Stapeln stellt die Siebdruckanlage den Engpass im Prozess dar. Diese ist zu 92,3 % ausgelastet, während die Batch-Öfen eine durchschnittliche Auslastung von 82,0 % aufweisen. Insgesamt ergeben sich die in Abbildung 22 dargestellten Maschinenauslastungen. Dieser Auslastungsgrad beinhaltet Arbeits-, Rüst- und Instandsetzungszeiten an Arbeitstagen von Montag bis Samstag, nicht jedoch Blockier- und Wartezeiten.

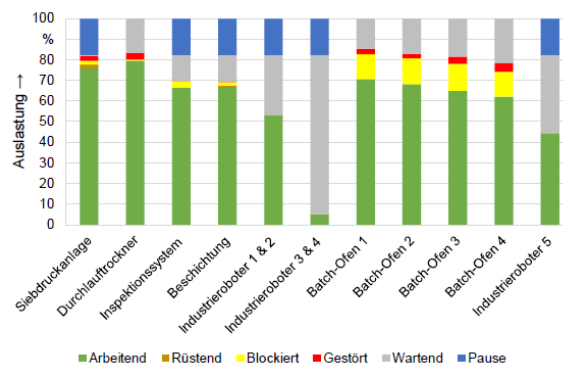


Abbildung 22: Maschinenauslastungen der industriellen Produktionslinie für 20er-Stapel bei einem 8 s Drucktakt und vier Batch-Öfen

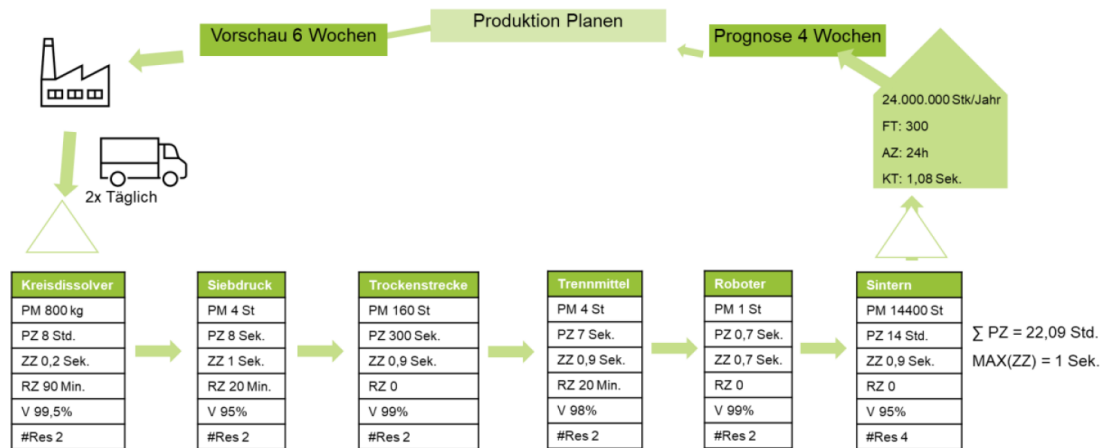


Abbildung 23: Wertstrom Industrialisierungskonzept

Der Wertstrom des Industrialisierungskonzepts mit vier Batchöfen ist in Abbildung 23 dargestellt. Bei einem Dreischichtbetrieb an sechs Tagen pro Woche können ca. 24 Millionen Bleche pro Jahr produziert werden, was einem Kundentakt von 1,08 Sekunden entspricht. Die Summe der Prozesszeiten der berücksichtigten Stationen beträgt 22,09 Stunden, während die simulierte Durchlaufzeit (DLZ) ca. 23,5 Stunden beträgt. Ab dem Einsatz von vier Batch-Öfen ist die Siebdruckstation die Station mit der höchsten ZZ und somit der Engpass im Produktionsprozess und begrenzt somit eine weitere Erhöhung der Stückzahl. Die Schwankungen der Zykluszeiten pro Station sind insgesamt gering, was eine gut abgestimmte Fertigung im Fluss ermöglicht. Insgesamt kann mit dem angestrebten Industrialisierungskonzept eine Ausbringungsmenge von ca. 240 t/a produziert werden.

Projektierung eines Industrialisierungskonzepts für Siebdruck/Handling/Trocknung

In Kooperation mit db-matik (Unterauftragnehmer Siemens) entstand ein Rolle-zu-Rolle (R2R) Konzept zur Automatisierung, Erhöhung der Stückzahlen und der Reduzierung von Hilfsmaterialien. Es umfasst sowohl Vorschläge für ein hoch-automatisiertes Drucken durch Endlosführung des Werkstoffträgers (WT), Entnahmekonzepte für die Grünteile (Bleche) als auch Varianten für einen optimierten Trocknungsprozess.

Bei den Druck-Anlagenkonzepten werden verschiedene Möglichkeiten als zielführend eingeschätzt:

- Drucken auf Werkstoffträger (WT) → optimiertes WT-Tray Handling
- R2R auf Drucken auf Trägerfolie
- Longsheet-Handling
- Direkter Druck auf Umlaufband aus Stahl

Da die nachfolgende Trocknung in einer linearen Anordnung einen hohen Platzbedarf aufweist, und zudem die Wärme einen nicht unerheblichen Anteil an dem Energiewertstrom einnimmt, wurden auch hier diverse Verbesserungen vorgeschlagen. Dazu gehören:

- Mäandernder-/Paternoster-Trockner
- Durchlauföfen, Durchlauföfen Stahlband
- Kombinierte Trocknung Konfektion und IR-Strahlung

- NIR-Trocknung; Diffusionsoptimierte Trocknung
- Photonische Trocknung (Nachtrocknung)

In Abb. 24 sind einige Beispiele für solche Trocknungskonzepte dargestellt.

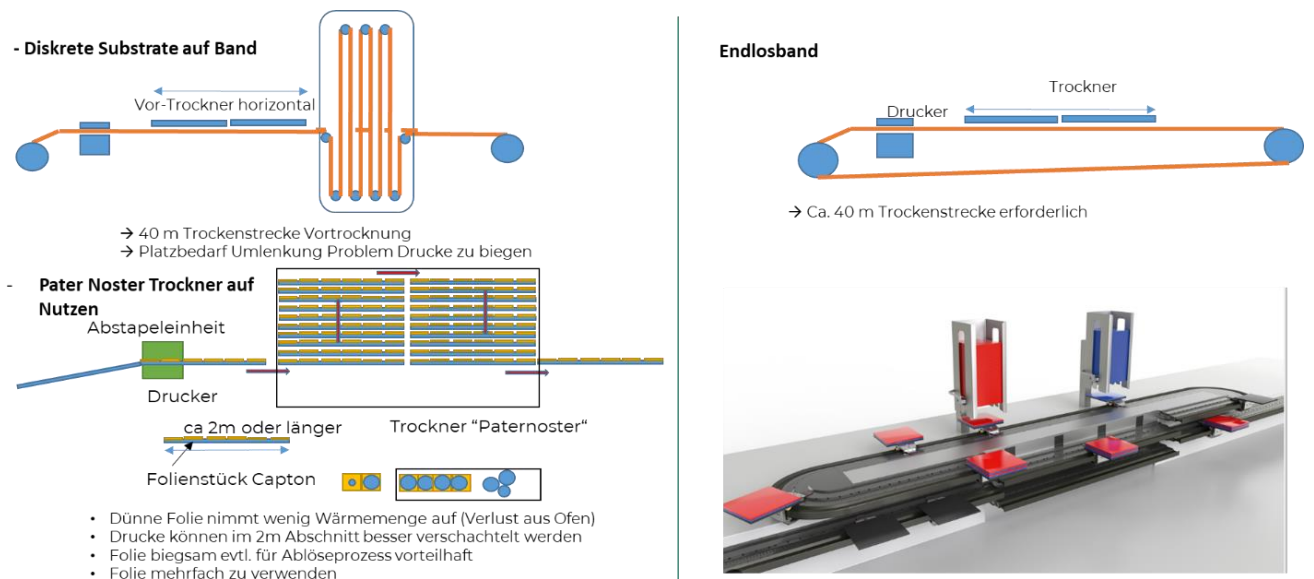


Abb. 24 Skizzen optimierter Trocknungsverfahren bzw. Verkürzung der Trocknungstrecke

Für die Entnahme und den Transport der biegeschlaffen Grünteile nach der Trocknung wurde ein Greifer für das automatisierte Abnahmemodul für große Statoren mit einem Durchmesser von 238 mm bzw. 290 mm entwickelt (Abb. 25). Zur Steigerung des Durchsatzes bzw. Vermeidung weiterer Standzeiten zur Abkühlung wurden die Greifer so ausgelegt, dass die Direktdrucke auf 3 mm starken Aluminium-Platten nach dem Trocknungsschritt noch warm abnehmbar sind.

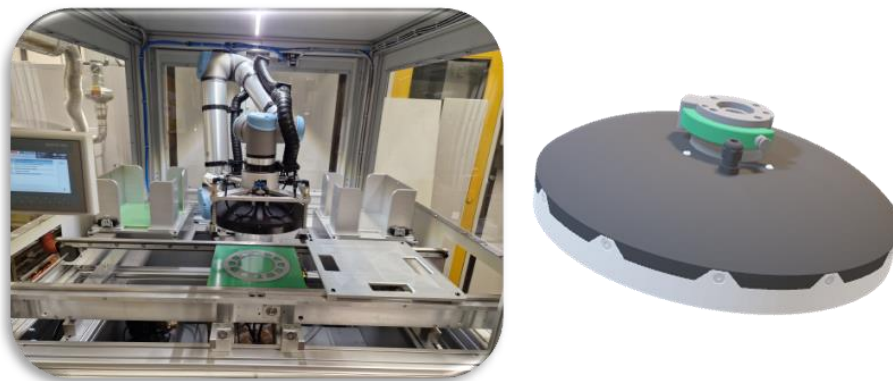


Abb. 25 Automatisiertes Abnahmemodul: Roboter mit Greifersystem

Ein Anlagenkonzept einer vollautomatisierten Druck-, Trocknungs- und Entnahme-Linie ist in Abb. 26 beispielhaft für ein Konzept dargestellt, das mit diskreten Substraten und einer Reinigungseinheit ausgestattet ist, wie sie für die Siemens Prototypelinie aufgebaut wurde. Die Trocknung ist ebenfalls klassisch mit UV-Vortrocknung und Ofeneinheit ausgestattet. Vor der Entnahme des Druckgutes ist die in-

line Qualitätsprüfung vorgesehen, wobei sich der „functional test“ zunächst rein auf das Druckbild bezieht.



Abb. 26. Projektierung einer Druck-/Handling Linie mit den im Text genannten Modulen

5.7 Weiterverarbeitung der gesinterten Bleche (Isolation, Handling) und Aufbau des Stators

Das Ziel im ersten Teil der Weiterverarbeitung zum Blechstapel beim Partner FAPS war der Vergleich diverser Klebe- und Isolationssysteme auf gedruckten Elektroblechen und somit die Auswahl eines geeigneten Systems. Dazu zählten umfassende Untersuchungen zur makro- und mikroskopischen Charakterisierung der Bleche sowie Versuche zur Applikation der Klebe- und Isolationsstoffe selbst.

Zur Validierung der Systemqualität wurden verschiedene Prüfverfahren, wie beispielsweise die Messung der Isolationswiderstände, Abzug- und Abscherprüfungen, Biegeversuche und magnetische Verlustmessungen durchgeführt.

Für die Analyse der Randbedingungen und zur Durchführung der Versuche wurden dem Lehrstuhl FAPS gedruckte Probekörper mit den Abmaßen 150 x 25 mm von Siemens zur Verfügung gestellt. Mit dieser vereinfachten Probengeometrie konnte ein Großteil der Untersuchungen durchgeführt werden und ermöglichte eine genormte magnetische Messung (Epsteinrahmen). Zusätzlich wurden in gleicher Geometrie Probenträger untersucht, die auf Grundlage einer wasserbasierten Paste gedruckt wurden. Dies diente zur Möglichkeit der Vergleichbarkeit innerhalb der Proben mit zwei Pastensystemen, die in Formiergas gesintert wurden. Des Weiteren wurden die Versuche um runde Proben in verschiedenen Durchmessern ergänzt, die primär zur Handhabung und Auslegung eines Applikationsprozesses herangezogen wurden.

Handhabung der gedruckten Einzelbleche

Für die Definition geeigneter Handhabungsoperationen in der Großserie, müssen die Ausgangswerte der Einzelbleche bekannt sein. Aus diesem Grund erfolgten eine umfangreiche Bewertung und

Charakterisierung der Bauteile. Zur Charakterisierung der Oberflächentopologien wurden dazu detailgenaue Aufnahmen der Ober- und Unterseiten mit dem Laserscanning erstellt und taktile Rauheitsmessungen durchgeführt. Um zudem einen Einfluss der Sinterumgebung auf die Oberfläche zu berücksichtigen, wurden die taktilen Rauheitsmessungen um gesinterte Proben in Wasserstoffatmosphäre erweitert. Die ermittelten Rauheitswerte Rz und Ra werden statistisch zusammengefasst und in Abhängigkeit der Ober- und Unterseite in einem Wechselwirkungsdiagramm (Abbildung 1) ausgewertet.

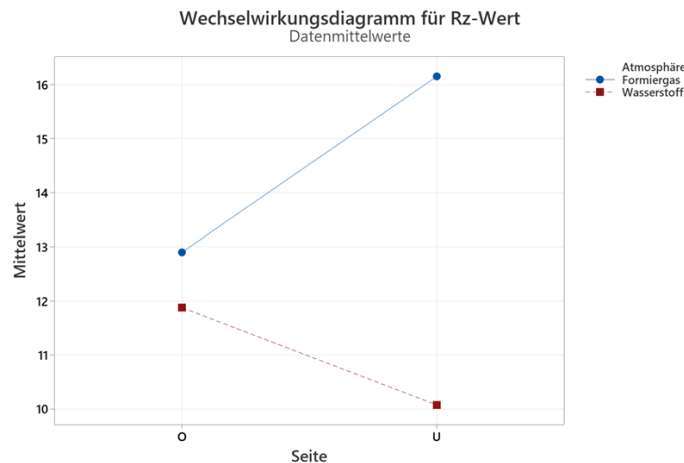


Abbildung 1: Wechselwirkungsdiagramm der Rauheitsmessung

Die Abweichung der Rauheitswerte werden deutlich, wenn die Auswertung, wie im Wechselwirkungsdiagramm sichtbar, nach Ober- und Unterseite differenziert wird. Die unter Wasserstoffatmosphäre gesinterten Proben weisen dabei deutlich geringere Rauheitswerte an den Unterseiten der Proben auf. Bei der großflächigen Betrachtung der Probenunterseite durch einen Scan mit dem Lasermikroskop wird deutlich, dass die Konzentration von Kratern, sogenannten Pinholes, an der Probenunterseite der mit Wasserstoff gesinterten Proben, sichtbar reduziert ist (Abbildung 2). Das Ausschlagen der Nadel beim taktilen Messverfahren durch die Pinholes, führt entsprechend zu den stark differenzierten Ergebnissen in der Rauheitsmessung. Die Oberseiten der Proben weisen dabei nur geringfügige Unterschiede auf.

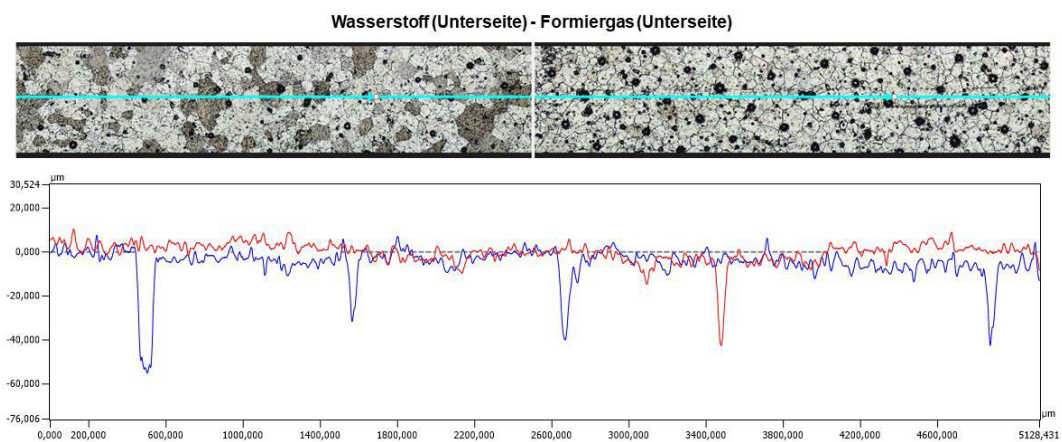


Abbildung 2: Vergleichsprofil der Oberflächenprofile an den Probenunterseiten

Eine nähere Untersuchung der Probenoberfläche mit dem 3D-Laserscanning- Mikroskopes. zeigte zudem, dass die Oberflächen Höhenunterschiede von bis zu ca. 20 μm aufweisen (Abbildung 3). Der Unterschied der Oberflächentopografie ist deshalb von Bedeutung, da ein Einfluss der Erhöhungen sowohl im Prozess der Klebstoff- bzw. Isolationsauftragung als auch im Paketierprozess selbst denkbar ist. Dabei sind Auswirkungen durch den Betrag des Höhenunterschiedes sowie durch die Form der Erhöhung möglich. Somit können durch Erhöhungen im Allgemeinen elektrische Kurzschlüsse an Kontaktstellen zwischen zwei Blechen, als Folge der Paketierung, entstehen. Aus den resultierenden Kurzschlüssen, zum Beispiel durch Durchdringung der Isolationschicht, entstehen Wirbelstromverluste, die eine negative Wirkung auf die Gesamteffizienz der elektrischen Maschine haben. Eine großflächige Erhebung kann während der Paketierung schwerer umzuformen sein, aufgrund der flachen Geometrie jedoch vollständig mit Isolationsmedium bedeckt werden. Während kleine Erhebungen an der Unterseite deutlich spitzer wirken, können diese bereits durch die Isolationschicht durchragen. Jedoch ist dabei auch eine stärkere Deformation während der Paketierung denkbar, wodurch die Stellen, an denen Kurzschlüsse entstehen können, wiederum reduziert wird.

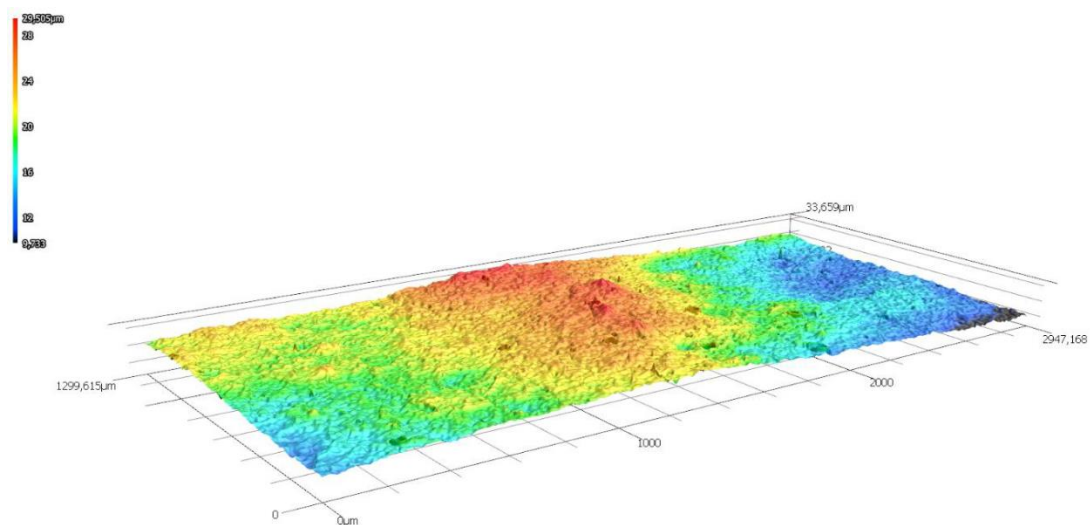


Abbildung 3: Oberflächenscan einer gedruckten Probe mit dem Laserscanningmikroskop

Die durch das 3D-Laserscanning Mikroskop sichtbar gemachten Pinholes, lassen sich aufgrund ihrer Anzahl und Form auf den Einfluss des Drucksiebes zurückführen. Durch einen großflächigen Laserscan der Probenunterseiten wurde ein dreidimensionales Bild erstellt, das die Pinholes und ihre Verteilung sichtbar macht. In Abbildung 4 ist die Kraterverteilung einer neuen Probe an der Oberfläche zu sehen, wobei Hilfslinien zur Veranschaulichung hinzugefügt wurden. Die Summe der Linien ergab eine Netzstruktur, die an der siebzugewandten Seite auftrat, und welche zur weiteren Stützung der These vermessen und mit der Maschenweite des Siebherstellers abgeglichen wurde. Die Auswertung ist ebenfalls in Abbildung 4 aufgezeigt. Es ergibt sich eine Übereinstimmung der Werte, wodurch

auf den Zeitpunkt der Kraterentstehung innerhalb des Druckvorganges geschlossen werden kann. Zudem ergeben sich immer dort Pinholes, wo der Draht des Siebes eine Überlappung mit dem benachbarten Draht, also einen Knotenpunkt, bildet.

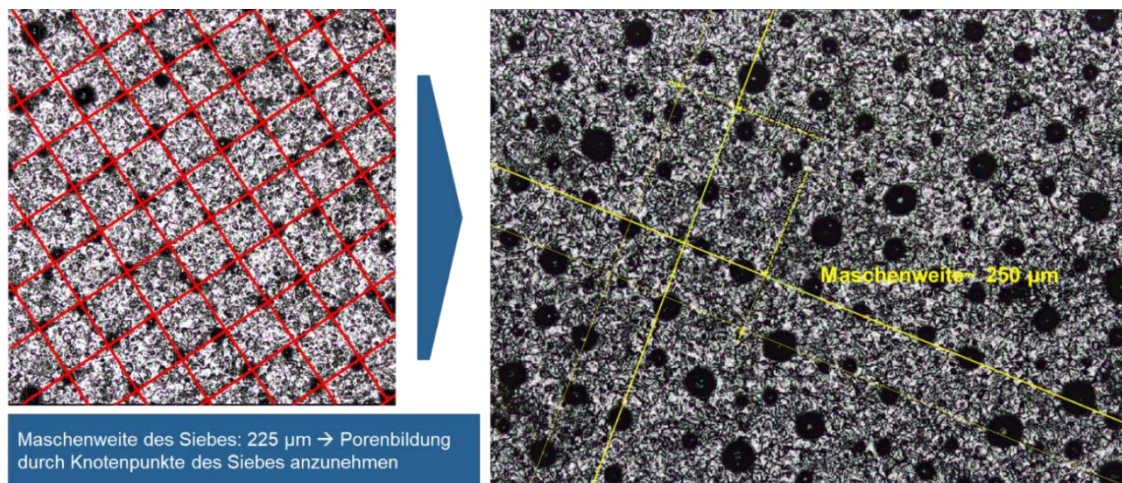


Abbildung 4: Pinholeverteilung und Vermessung

Aufgrund der aufgetretenen Pinholes und der Unsicherheit über deren exakten Geometrie, wurden zusätzlich REM-Aufnahmen angefertigt (siehe Abbildung 5).

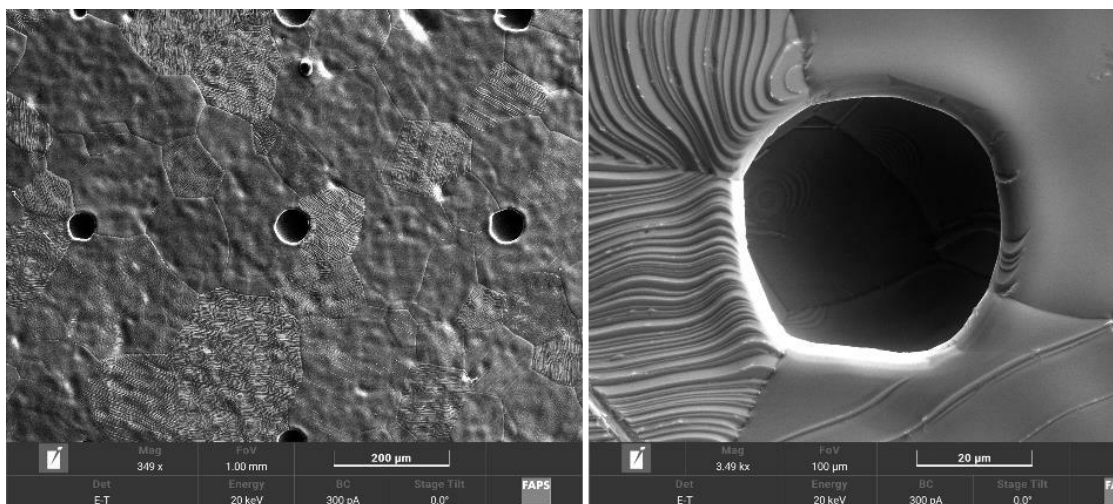


Abbildung 5: REM-Aufnahme der Pinholes einer Probe

Mit Hilfe eines Focussed Ion Beam-Schnittes (FIB) wurden anschließend Elektronen gezielt auf das Substrat geschossen und Material abgetragen. So konnten Schnitte in die zu untersuchende Probe eingebracht werden, die durch ein nachträgliches Schrägstellen der Probe, einen Blick in das Innere des Materials ermöglichten. In Abbildung 6 ist die Betrachtung eines Pinholes im Winkel, sowie eine Zwischenaufnahme während des FIB-Schnittes dargestellt. Zu erkennen ist hierbei die vermutete

Linsenform des Pinholes, welche bislang als kraterförmig mit steilen Kanten angesehen wurde. Dies ist auf das Messprinzip des Laserscanning-Mikroskops zurückzuführen, welche Hinterschneidungen aufgrund von Abschattungseffekten nicht darstellen kann. Die Auswertungssoftware füllt dabei die Flächen, die nicht eingesehen werden, auf. Damit entstand die vorherige Annahme der steilen Flanken aller Pinholes. Des Weiteren sind die verschiedenen Abtragsraten während des FIB- Schnittes (rechts) erkennbar. Dies ist auf die unterschiedliche Orientierung der Körner zurückzuführen.

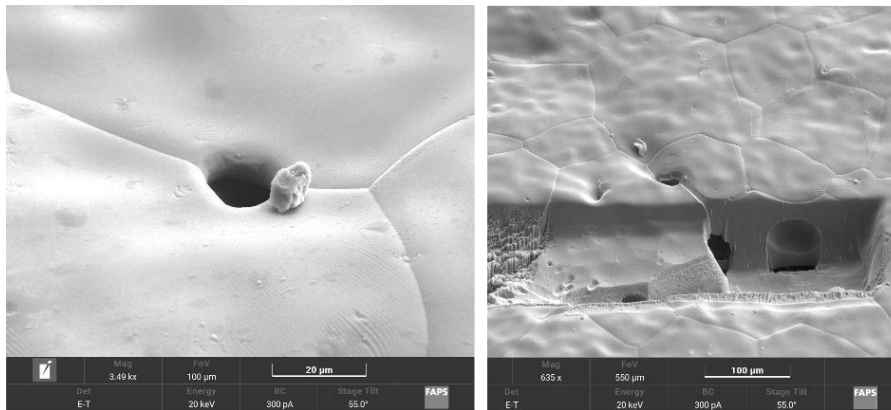


Abbildung 6: FIB-Schnitt zur Betrachtung der Pinholes

Die Betrachtung der Pinholes nach dem FIB-Schnitt zeigte bei allen Positionen eine runde bis linsenförmige Geometrie, die mit diesem Verfahren nachgewiesen werden konnte. Es wurden zudem Poren sichtbar, die im Substrat eingeschlossen und dadurch an der Oberfläche nicht sichtbar waren. Die Volumenabweichung der Poren spielt jedoch für den Beschichtungsprozess eine untergeordnete Rolle, da diese auch ohne vollständige Füllung mit Isolationsmaterial nicht zu Kurzschlüssen und daraus resultierenden Verlusten durch die Paketierung führen.

Für die Handhabung der Blechproben ist eine möglichst maßgenaue, geometrische Form der Proben erforderlich. Aufgrund der Umstellung auf die wasserbasierte Paste während des Projektes, konnte diese nicht immer zu 100% gewährleistet werden. Entsprechend erfolgte eine Nachbearbeitung in Form einer Probestanzung an einem gedruckten Elektroblech sowohl an der Außen- als auch an der Innenkontur. In diesem Zuge wurde eine Stanzkantenanalyse der Proben durchgeführt, aus der weitere Erkenntnisse über die allgemeine Stanzbarkeit, Verhalten und die Qualität von gedruckten Elektroblechen gewonnen wurden. Der Stanzgrad des Aluwerkzeuges betrug dabei ca. 90° . Eine Oberflächenuntersuchung inklusive Vermessung bestätigte den Stanzwinkel mit gemessenen $\sim 91^\circ$. Zudem erschien die Schnittkante der Probe primär glatt zu sein und wies keine direkt ersichtliche, für den Stanzprozess typische, Bruchkante auf. Der Kanteneinzug an der Oberseite und der entstandene Grat an der Unterseite im Bereich der Schnittkante, war ebenfalls sehr gering. Die Gratbildung liegt dabei unter dem Bereich der maximalen Erhöhungen der gedruckten Oberfläche und erfordert entsprechend keiner weiteren Nachbearbeitung. Eine Graterhöhung über das Oberflächenprofil hinaus, würde zu Kurzschlüssen innerhalb des Blechpaketes führen und neue Anforderungen an die Isolation stellen. In Abbildung 7 sind die gemessenen Ergebnisse einer Untersuchung des Stanzgrades aufgezeigt.

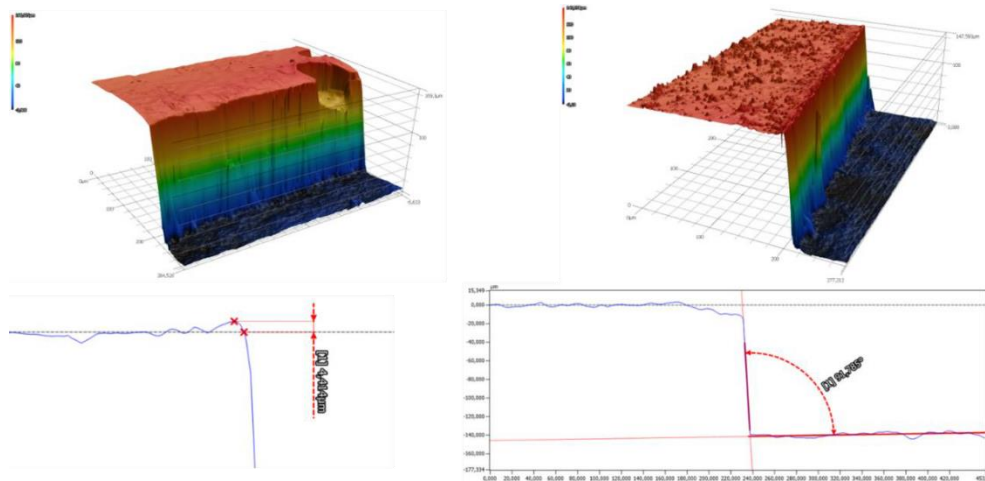


Abbildung 7: Untersuchung und Vermessung des Stanzgrades

Die Charakterisierung der Blechproben zeigt, dass automatisierte Handhabungsoperationen zum Greifen, Transportieren und Positionieren der bedruckten Bleche besondere Herausforderungen darstellen. Zum einen führt die geringe Schichtdicke, besonders bei größer werdenden Geometrien, generell zu Problemen in der Handhabung, da die Bleche keine ausreichende Formstabilität aufweisen. Zum anderen wurde bei der Charakterisierung deutlich, dass die Rauheiten und Dickenschwankungen der Bleche, sowie die Pinholes, zu Problemen bei Vakuumgreifsystemen führen kann. Entsprechend könnten magnetische Aufnahmen zur Handhabung der Bleche eine Lösung zur automatisierten Handhabung der Bleche darstellen. Weiterführende Versuche zum automatisierten, magnetischen Greifen der gedruckten Proben, wurden durch die Firma Siemens durchgeführt.

Applikation und Qualitätssicherung des Isolationssystems

Durch die Messung des spezifischen elektrischen Widerstands und durch erstellte Rasterelektrodenmikroskop-Aufnahmen am Grundmaterial (Abbildung 8) stellte sich heraus, dass an den Proben keine zusätzliche Isolationsschicht (zum Beispiel Oxidschichten durch das Sintern oder Lagern) vorhanden ist.

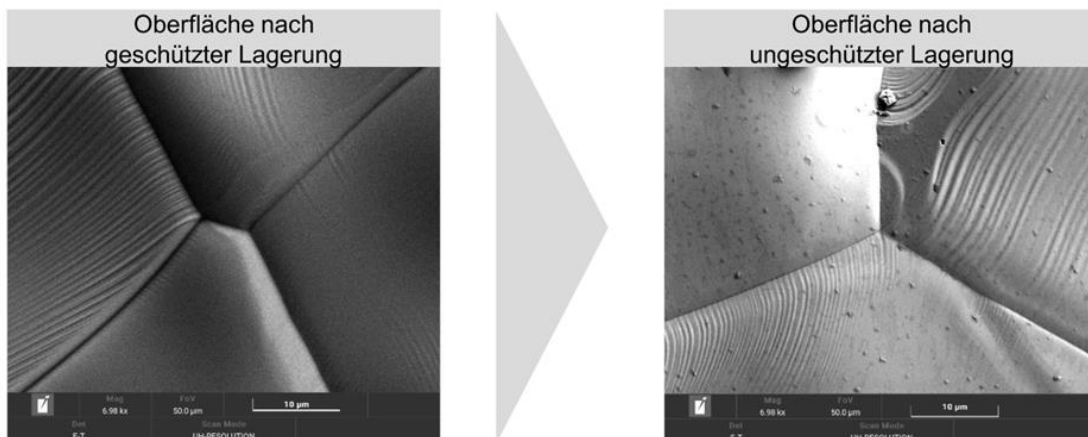


Abbildung 8: REM-Aufnahmen, auch nach Lagerung ohne Isolationsschicht

Aus diesem Grund wurden im zugeordneten Arbeitspaket Möglichkeiten zur Isolation und Klebung der Einzelbleche aufgezeigt, um die Wirbelstromverluste zu reduzieren. Grundsätzlich gibt es mehrere Möglichkeiten, die einzelnen Blechlagen mit einer dünnen Schicht zu isolieren. Zum einen lassen sich isolierende Beschichtungen in reaktiven Umgebungen chemisch ausbilden, zum anderen kann eine zusätzliche Isolationsschicht durch Beschichtungsverfahren nachträglich aufgebracht werden.

Eine recht einfach realisierbare Methode zur Bildung einer chemischen Isolationsschicht, ist das Aufbringen einer Oxidschicht durch thermische Auslagerung. Dabei werden die Proben für eine gewisse Zeit unter erhöhter Temperatur und Sauerstoffumgebung prozessiert. Zur Prüfung der Isolationseignung solch einer Oxidschicht, wurden Proben mit folgenden Versuchsparametern beaufschlagt:

Tabelle 1: Versuchsparameter zum Auslagern

Probe	Temperatur	Dauer
Gedrucktes Elektroblech	200 °C	16 h
Gedrucktes Elektroblech	500 °C	15 min
Gedrucktes Elektroblech	500 °C	5 h

Die Analyse der Oberflächen im Rasterelektrodenmikroskop (REM) zeigte dabei ein klares Wachstum der oxidierten Schichten bei höheren Temperaturen und Zeiten. Die Auslagerung bei 200 °C / 16 h führte noch zu keiner vollständigen Bildung einer Oxidschicht, da nur wenige Körner leicht bedeckt waren. Auch bei 500 °C / 15 min ist die Schicht noch nicht vollständig ausgebildet. Erst bei 500 °C / 5 h ist eine nahezu vollständige Bedeckung der Oberfläche erkennbar (vgl. Abbildung 9).

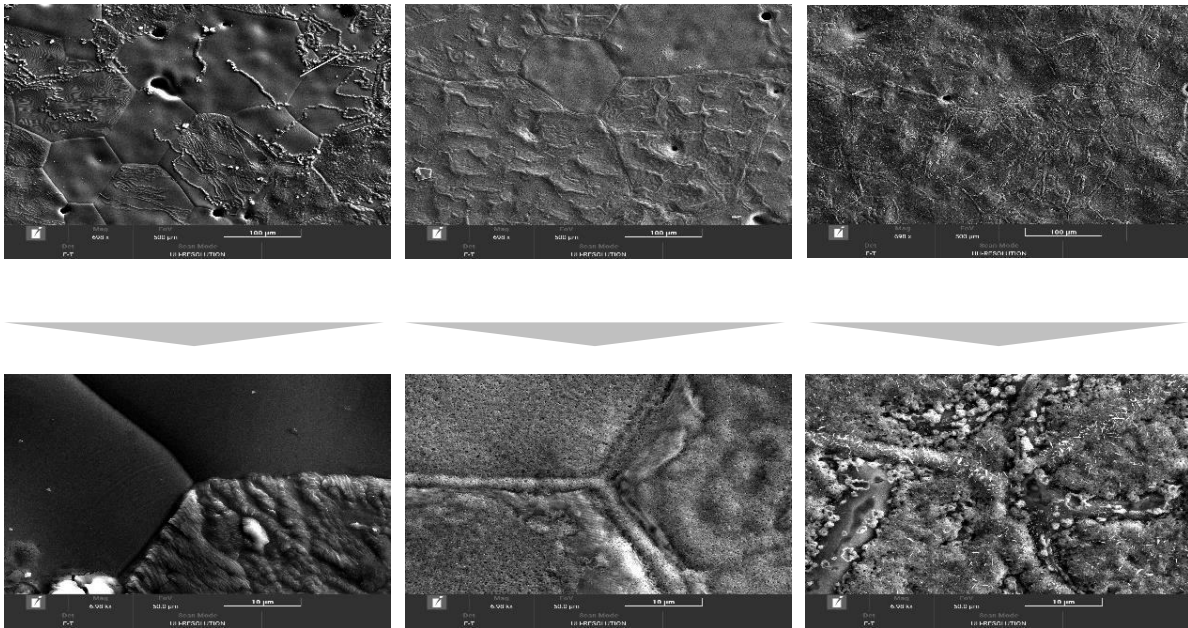


Abbildung 9: REM-Aufnahmen der Oxidschichten bei verschiedenen Auslagerbedingungen

Durch die orthogonale Untersuchungsrichtung der Probenoberflächen ließen sich erste Aussagen über die Schichtausbildung und Homogenität, jedoch nicht über die Schichtdicke und der ausgebildeten Phasenanzahl treffen. Um die genannten Punkte genauer untersuchen zu können, wurde ein FIB (Focused Ion Beam) -Schnitt jeweils bei einer Probe mit 200°C Auslagerungstemperatur und 16h Auslagerungszeit sowie bei einer Probe mit 500°C Auslagerungstemperatur und 5h Auslagerungszeit durchgeführt. Der entstandene Schnitt in der Probe wurde anschließend mit dem REM im Winkel betrachtet und somit minimale Schichtdicken und Phasenübergänge sichtbar. Abbildung 10 zeigt den Schnitt in die Probe mit 200°C Auslagerungstemperatur. In der linken Aufnahme (60 µm Sichtfeld und 5820-fache Vergrößerung) sind die partielle Bildung der Oxidschicht und der ins Material eingefügte FIB-Schnitt sichtbar. Durch die Vergrößerung auf das 34.900-fache reduziert sich das Sichtfeld auf 10 µm (rechte Aufnahme), wodurch die Oxidschicht näher betrachtet und die Schichtdicken vermessen wurden.

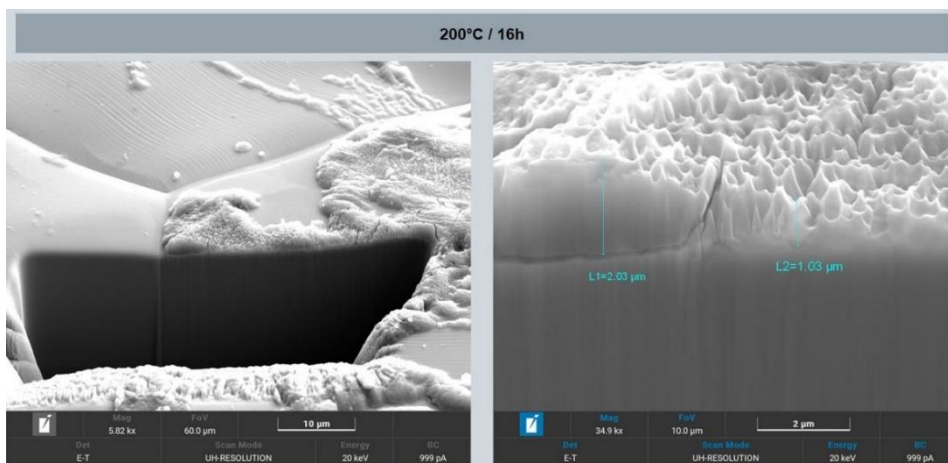


Abbildung 10: Vermessung der Oxidschicht am REM mit 200 °C und 16h Auslagerung

Aufgrund der klar ausgeprägten Linie zwischen den Phasen ist eine Vermessung präzise durchführbar und ergibt eine Dicke der Oxidschicht bis maximal 2 μm .

In Abbildung 11 sind die Aufnahmen des FIB-Schnittes an der Probe mit 500°C Auslagerungstemperatur bei 2 h dargestellt. Im linken Bild (50 μm Sichtfeld und 5820-fache Vergrößerung) ist dabei deutlich die geschlossene Oxidschicht zu erkennen.

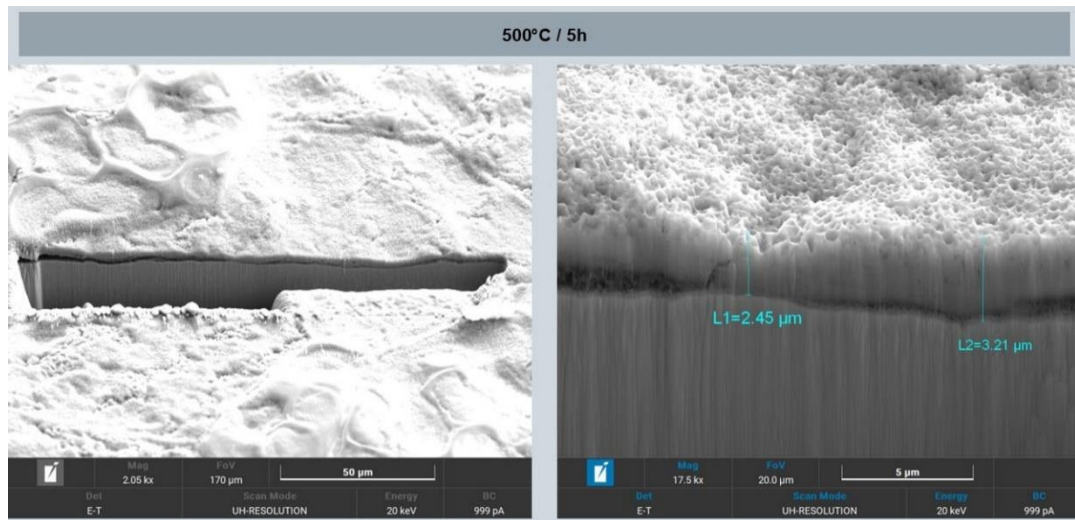


Abbildung 11: Vermessung der Oxidschicht am REM mit 500 °C und 2 h Auslagerung

Auch die Dickenschwankungen der Schicht zeigen sich bei den Proben mit 500°C Auslagerungstemperatur weitaus geringer ausgeprägt als bei den Proben mit 200°C. Die maximalen Schichtdicken innerhalb des FIB-Schnittes ergeben dabei einen Wert von 3,2 μm . Die Proben zeigen dabei zusätzlich einen dunkleren Bereich unterhalb der Oxidschicht, welche sich zum einen durch eine Ablösung der eher spröden Oxidschicht vom Eisenmaterial oder durch die Bildung einer Zwischenphase erklären lässt. Durch eine energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX-Analyse) wurden die Bildung einer Zwischenphase ausgeschlossen. Zudem werden Risse innerhalb der Oxidschicht sichtbar, welche ebenfalls auf eine hohe Versprödung der Schicht schließen lassen. Sollte sich die Haftung der Oxidschicht unzureichend sein, kann eine großflächige Schichtablösung, auch bei optimaler Verklebung, die Gesamtstabilität des Blechpaketes beeinflussen. Zur weiteren Prüfung der Oxidschicht wurden entsprechend Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) vor und nach dem mechanischen Belastungstest (Biegeversuch nach nach DIN 7799) erstellt, um auf die Haftfestigkeit der Oxidschicht schließen zu können. In Abbildung 12 sind REM- Aufnahmen vor dem Belastungstest und in Abbildung 13 nach der Beanspruchung dargestellt.

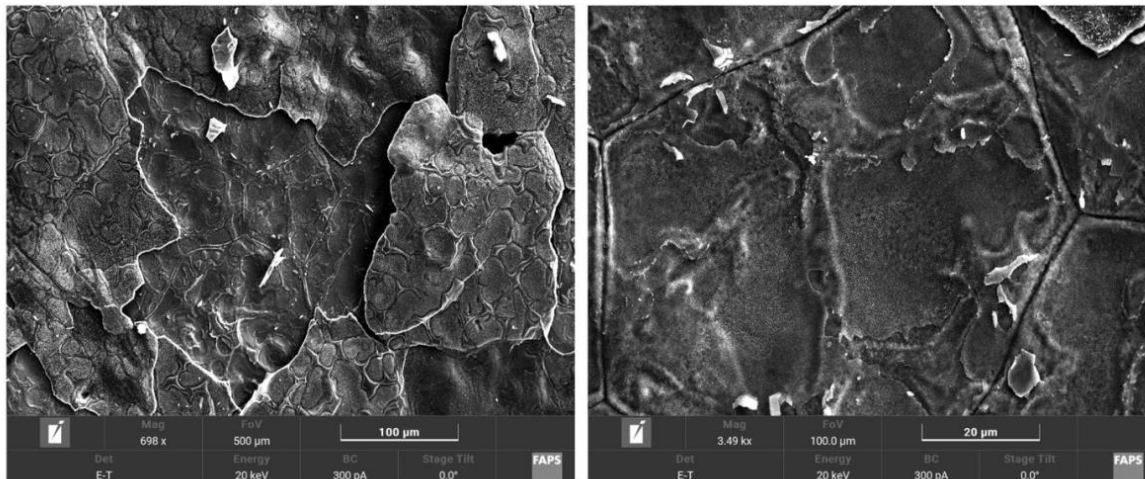


Abbildung 12: REM-Aufnahmen der Oxidschicht vor dem Biegeversuch

In Abbildung 12 sind bereits leichte Abplatzungen der Oxidschicht, jedoch keinerlei Risse erkennbar. Diese sind auf die übliche Handhabung der Probe zurückzuführen und befinden sich nur an der Oberfläche. Zudem reichen diese Abplatzungen nicht bis auf das reine Substrat, womit eine Isolationswirkung weiterhin gegeben ist.

Nach der Beanspruchung bildeten sich, neben großflächigen Abplatzungen, zudem tiefe Risse aus (vgl. Abbildung 13). Dies bestätigte erneut die spröden Eigenschaften der Oxidschicht, die aufgrund der fehlenden elastischen Eigenschaften zu einer übermäßigen Rissbildung führten.

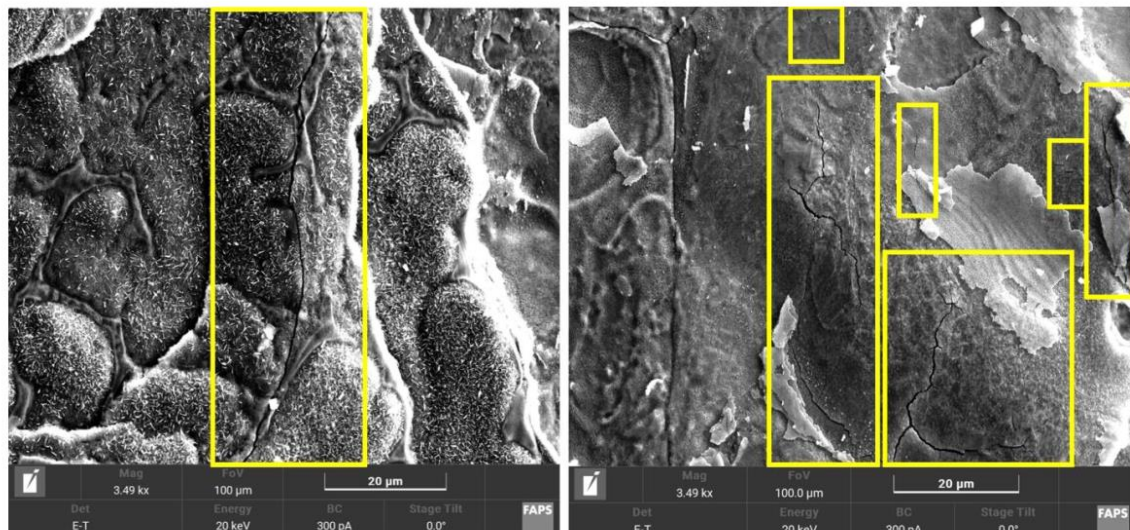


Abbildung 13: REM-Aufnahmen der Oxidschicht nach dem Biegeversuch

Um eine Aussage über die Auswirkungen der Risse und Abplatzungen auf die Isolations-eigenschaften treffen zu können, wurde anschließend erneut eine energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX-

Analyse) der beanspruchten Oberflächen zur Materialanalyse durchgeführt. Bei der EDX-Analyse wird die durch vorherige Anregung, charakteristische Röntgenemission der Atome ausgewertet, die eine Aussage über die chemischen Bestandteile der untersuchten Oberfläche erlaubt. Die Ergebnisse der EDX-Analyse aus Abbildung 14 zeigen deutlich die Flächen der Abplatzungen, wobei sich mit der Analyse nur reines Eisen sowohl in den abgeplatzten Flächen als auch an den Rissen feststellen lässt.

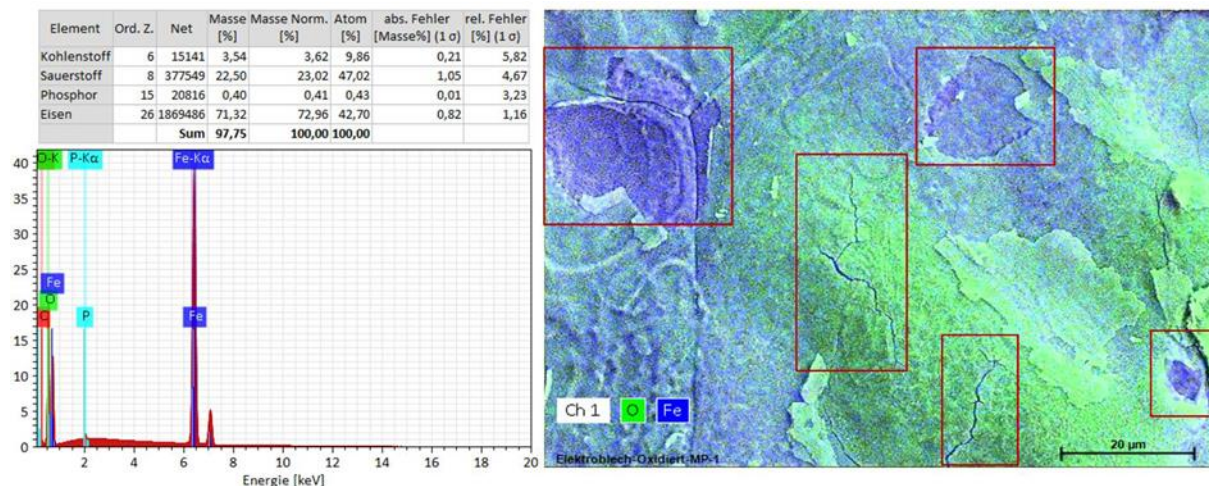


Abbildung 14: EDX-Analyse der beanspruchten Stelle

Es handelt es sich bei den flächigen Beschädigungen somit um ein Abplatzen der gesamten Oxidschicht, die zu einem Freilegen des unisolierten Substrates führten. Innerhalb der Risse und der freiliegenden Bereiche, kann es resultierend zu Kurzschlüssen beim Einsatz im Blechpaket kommen. Aufgrund der spröden Eigenschaften und der geringen Haftung zwischen Oxidschicht und Substrat, wurde die Oxidschicht als mögliche Isolationsschicht ausgeschlossen und im Projektverlauf nicht weiter betrachtet.

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Untersuchungen der Oxidschichten, erfolgten weitere Versuchsreihen mit Klebe- und Isolierstoffen. Ziel der Versuchsreihen war es, einen geeigneten Klebe- und/oder Isolierstoff für die Verklebung der Bleche im Stator zu finden, der eine ausreichende mechanische Festigkeit sowie die geforderten isolierenden Eigenschaften aufweist. Um den Prozess des Isolierens und Klebens in einem Schritt abbilden zu können, wurde dabei anfangs vorzugsweise auf Backlacke eingegangen, welche in konventionellen Elektroblechen bereits erfolgreich zur Verklebung des Blechpaketes zum Einsatz kommen. Konventionelle Backlacke weisen in der Regel drei Zustände auf, wobei der Zustand A der applizierte, nasse Zustand ist und der Zustand B dem getrockneten Lieferzustand nach thermischer Behandlung entspricht, mit dem die Elektrobleche dem Stanzprozess und dem anschließenden Paketierungsprozess zugeführt werden. Im paketierten Zustand wird unter erneuter und erhöhter thermischer Behandlung der Endzustand C erreicht, um das Blechpaket final miteinander zu verkleben. Der Einsatz von Backlack bei gedruckten Blechen ist denkbar, da er eine hohe mechanische Festigkeit aufweist, ausreichend isolierende Eigenschaften besitzt sowie mit Wasser ohne Reinigungszusätze im Zustand A entfernt werden kann. Dies würde bei Applikationsanlagen für eine

einfache Reinigung sprechen. Da der Zustand B für gewöhnlich durch Prozessierung bereits im Walzwerk integriert ist, könnte er als Zwischenschritt in der gedruckten Herstellroute vermieden werden. Somit würde sich sowohl die Prozesszeit als auch der Energieeinsatz deutlich verringern lassen. Um eine generelle Aussagekraft der Eignung eines Backlackes von Zustand A direkt zum Zustand C treffen zu können, wurden Applikationsversuche sowie anschließende mechanische Abziehversuche nach DIN EN 1465 durchgeführt. Dabei wurden Proben mit konventioneller Aushärtung über drei Zustände (A→B→C) mit vergleichbaren Proben und zwei Zuständen (A→C) ausgewertet. Die Auswertung des Zugprüfversuches ist in Abbildung 15 dargestellt.

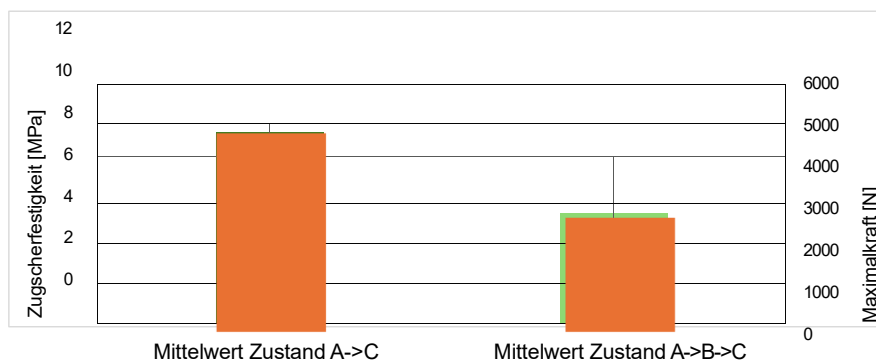


Abbildung 15: Ergebnisse des Zugversuches mit Backlack

Es zeichnet sich ein positiver Einfluss der Nassverklebung auf die mechanische Festigkeit der Proben ab, die Standardabweichung fällt im Vergleich zur konventionellen Applikation ebenfalls deutlich geringer aus. Aus mechanischer Sicht bringt die Backlackapplikation mit nur zwei Zuständen, keine Nachteile in der Festigkeit der Verklebung. Um eine eindeutige Aussage über die Verwendbarkeit von Backlack im Projekt treffen zu können, wurden im weiteren Projektverlauf ergänzende Versuche zur Schichtdickenanalyse und zum Oberflächenwiderstand gemacht. Während mittels Sprüh- und Rollverfahren gute Ergebnisse im Zusammenhang mit Backlack und dünnen Schichtdicken (<20µm, ohne Pressen) sowie ausreichende Isolationswiderstände erreicht wurden, führten die ersten Paketierversuche zu eher schlechten Ergebnissen bei der mechanischen Festigkeit. Als Grund könnte hier das gezielte Auslassen des Zustandes B vermutet werden, da im geschlossenen Blechpaket unter Druck, ein starkes Ausgasen der Backlacke festgestellt wurde. Dies ist im offenen Zustand unkritisch, führte im paketierten Zustand jedoch zu einem Austreiben sehr hoher Mengen des Backlackes mit resultierend niedrigen Festigkeitswerten der Blechpakete. Infolgedessen wurden noch weitere Isolations- und Klebesysteme betrachtet.

Um die Idee des Backlackes, dem Aufbringen einer Schicht zur gleichzeitigen Isolierung und Klebung, in Hinsicht auf die Zeit- und Kostenersparnis weiter zu verfolgen, wurden im Laufe des Projektes metallische Klebstoffe untersucht. Die Idee dabei war, den Klebstoff als einzige Schicht zu applizieren und die isolierenden Eigenschaften zu untersuchen. Im Falle einer ausreichenden Isolationswirkung, kann von hohen mechanischen Festigkeiten ausgegangen werden. Zudem bieten die Klebstoffe weiterhin die Möglichkeit zu einer einfachen Applikation über Sprüh- oder Rollverfahren. Nach einer Vorauswahl

wurde auf einen modifizierten Acrylatklebstoff zurückgegriffen, welcher anaerob (unter dem Ausschluss von Sauerstoff, mit Metallionen) aushärtet und ausreichend temperaturbeständig ist. Der Klebstoff weist sehr hohe Klebeeigenschaften mit dem Elektroblech auf, welche bei Zug- und Scherversuchen (DIN EN 1465, DIN EN 1464) zu einem Versagen der Bleche (Bruch) vor einem Lösen der Klebeschicht führte. Bei Messungen zum Oberflächenisolationswiderstand konnten keine validen Ergebnisse ermittelt werden, da die erreichten Schichtdicken von $> 20 \mu\text{m}$ bereits einen zu großen Widerstand aufweisen, dass keine Messung mehr am Franklin-Tester möglich war.

Zur abschließenden Bewertung und zum Vergleich der verschiedenen Isolations- und Klebeschichten, wurden Teilblechpakete mit fünf Einzelblechen und verschiedenen Kombinationen hergestellt. Die Presskräfte während der Auswertung wurden mit 2 MPa und 7 MPa variiert. Folgende Kombinationen wurden getestet:

Tabelle 2: Versuchskombinationen Paketerversuch

Material	Presskraft (MPa)	
Backlack 1	2	7
Backlack 2	2	7
Acrylatklebstoff	2	7
Acrylatklebstoff/Backlack	2	7
Luft	Ohne Druck	

Anschließend wurden die Blechpakete von der Firma Siemens in einem speziellen Epsteinrahmen vermessen und die Verluste ermittelt. Eine Messung ohne Druck, in dem die Luft zwischen den Blechen als optimaler Isolator wirkt, wurde als Referenzmessung hinzugefügt. Die ermittelten Verluste bei verschiedenen Frequenzen geben dabei auf Rückschluss auf die Isolationsqualität innerhalb des Blechpaketes. Dabei ist das Ziel, die Verluste so gering wie möglich zu halten. In Abbildung 16 und Abbildung 17 sind die Verlustmessungen der Versuchsreihen für gedruckte Bleche mit organischer und Blechpakete mit wässriger Paste dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der modifizierte Acrylatkleber bei allen Versuchen sehr gut abgeschnitten hatte. Das zeigte auch die Unempfindlichkeit gegenüber höherem Drücken, was in der Regel zu höheren Verlusten im Blechpaket führt. Dies könnte sich mit der harten Schicht erklären lassen, welche der Acrylatkleber ausbildet und somit ein Durchdringen verschiedener Spitzen an der Blechoberfläche zum benachbarten Blech verhindert.

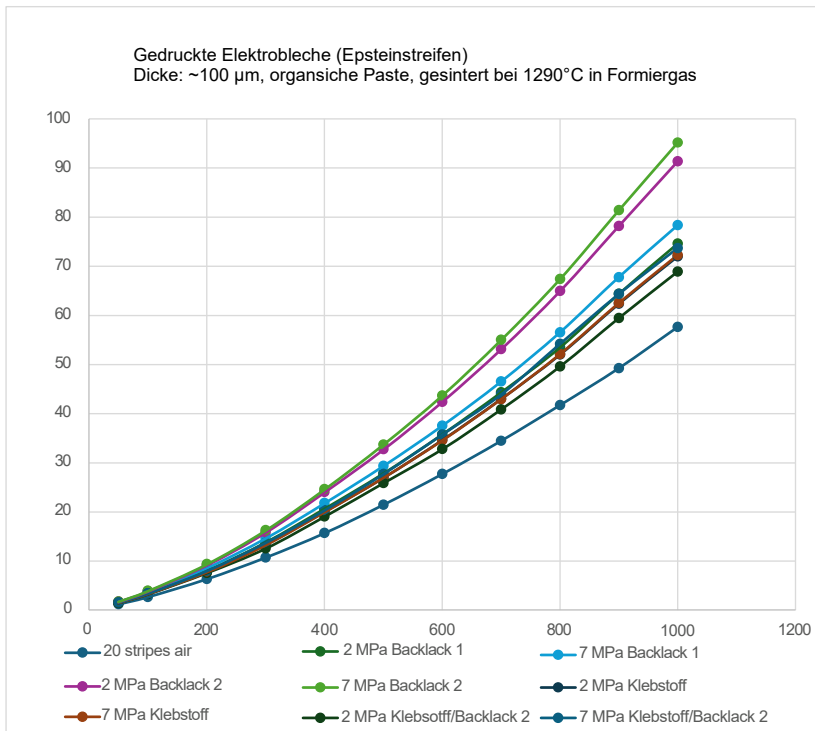


Abbildung 16: Verlustmessungen an Blechpaketen mit organischer Paste (y-Achse: W/kg, x-Achse: Frequenz Hz)

Durch die Erstellung und Vermessung von Schliffbildern der gemessenen Blechpakete ergeben sich deutliche Unterschiede in den gemessenen Schichtdicken. Dies könnte sich mit den verschiedenen Viskositäten der aufgetragenen Materialien erklären lassen. Während durch ein Verdünnen der Backlacke geringere Schichtdicken ($< 20 \mu\text{m}$) erreicht werden konnten, war dies beim Acrylat Klebstoff nicht möglich. Entsprechend höhere Schichtdicken wurden erreicht, was die Verluste, jedoch auch den Eisenanteil im gesamten Blechpaket verringerte. Abbildung 18 zeigt die Aufnahme eines Schliffbildes von einem mit reinem Klebstoff paketierte Blechpaket aus gedruckten Elektroblechen und konventionellem Elektroblech.

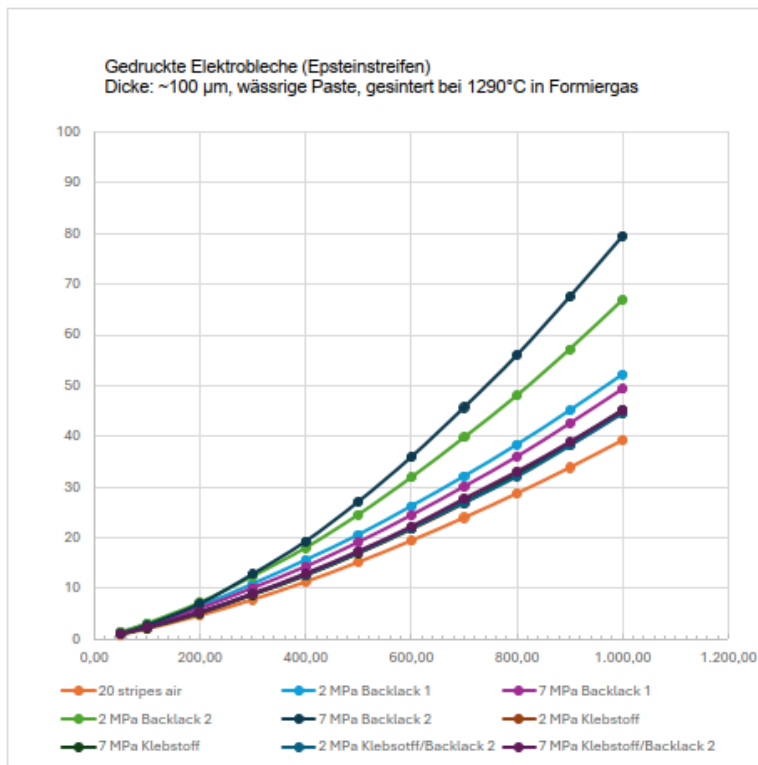


Abbildung 17: Verlustmessung an Blechpaketen mit wässriger Paste (y-Achse: W/kg, x-Achse: Frequenz Hz)

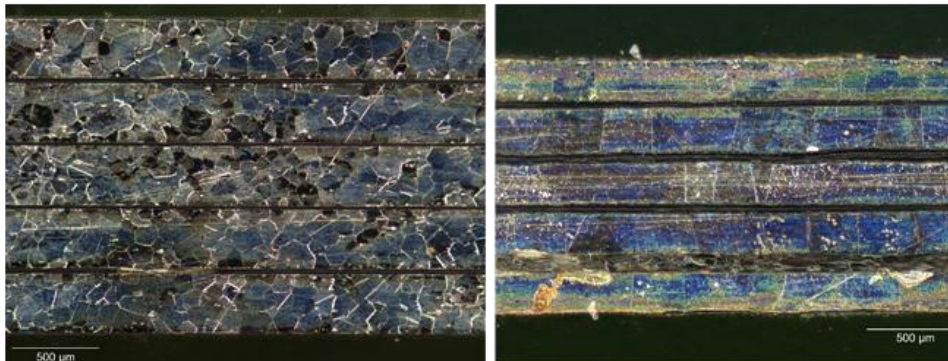


Abbildung 18: Schliffbilder eines Blechstapels aus konventionellem (links) und gedruckten (rechts) Elektroblechen

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass ein modifizierter Acrylatklebstoff generell für die Verklebung von gedruckten Blechen auch ohne separate Isolationsschicht denkbar wäre. Um den Eisenanteil weiter zu erhöhen, kann die Schichtdicke im Paket weiter verringert werden.

Verknüpfung mit den Nachfolgeprozessen

Im zugehörigen Arbeitspaket wurde der Zusammenhang der Oberflächenstruktur mit den möglichen Auswirkungen auf den Isolations-, Klebe- und Paketierprozess beschrieben. Um das Verhalten der Erhöhungen auf den Oberflächen im Paketierprozess näher zu untersuchen, wurden gedruckte Proben mit verschiedenem Drücken beaufschlagt und deren Auswirkung auf das Oberflächenprofil analysiert.

Als Probenkörper wird dabei auf eine gedruckte Ringprobe von Siemens mit einem Außendurchmesser von 156mm und einem Innendurchmesser von 64 mm zurückgegriffen.

Das Probenblech wurde dabei zwischen zwei polierten und gehärteten Stahlplatten (60 HRC) gelegt und unter festgelegten Druckprofilen gepresst. Abbildung 19 zeigt den Versuchsaufbau sowie die abgefahrenen Drücke in kN. Durch eine Justierung sowohl an der Presse als auch am Laserscanning-Mikroskop wurde sichergestellt, dass die gepresste und analysierte Fläche nach jeder Versuchswiederholung wiedergefunden wurde. Somit war ein exakter Vergleich der Oberflächenprofile möglich. Sollten die generellen Drücke zur Paketierung von Blechpaketen ausreichen, um die Blechoberfläche zu deformieren, könnte dies positive Einflüsse auf die Rauheit und somit auf die Isolationswirkung haben

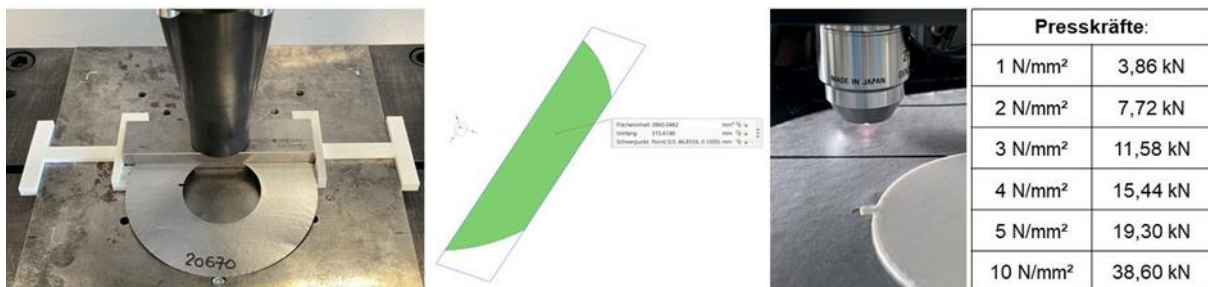


Abbildung 19: Aufbau, Messung und abgefahrte Drücke des Versuchs

Die Auswertung der Druckversuche zeigte, dass die Oberflächenstruktur unter gewöhnlichen Paketier-
spannungen keine signifikanten Änderungen erfährt. Zum Vergleich wurde eine deutlich höhere Press-
kraft von 38,60 kN auf das Probenblech aufgebracht, was einer Spannung von 10 N/mm² entspricht und
damit deutlich über den üblichen Paketdrücken liegt. Auch diese Spannung an der Blechoberseite zeigte
sich als nicht ausreichend, um die Erhöhungen an der Blechoberfläche zu deformieren. Zum direkten
Vergleich wurde das Höhenprofil der ungepressten Probe mit dem exakten Oberflächenprofil der mit
38,60 kN gepressten Probe aufeinandergelegt. Im Diagramm aus Abbildung 20 sind dabei beide Hö-
henverläufe der Proben sowie die gescannte Oberflächenstruktur mit den verwendeten Messlinien ab-
gebildet.

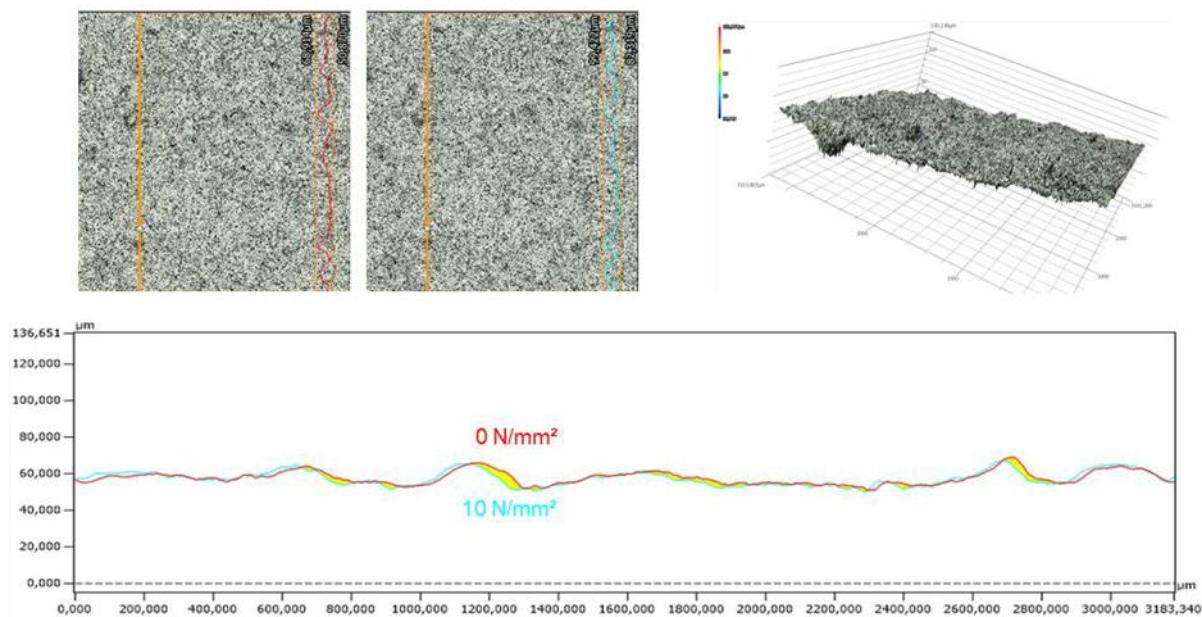


Abbildung 20: Auswertung des Druckversuches

Die Ergebnisse zeigen, dass mit keiner signifikanten Deformation innerhalb der Paketierung zu rechnen ist.

Während des Projektverlaufes wurden diverse Lösungsmöglichkeiten zur Applikation der Klebe- und Isolationsschicht auf die gedruckten Bleche konzipiert. Um die Gesamtprozesszeit zu verkürzen, entstand die Idee, das Stapeln, Auftragen und Pressen des Blechstapels in einem Prozess zu vereinen. Diesbezüglich wurde ein Konzept ausgearbeitet und erste Vorversuche zur Vereinzelung der Bleche gestartet. Um eine Applikation des Klebers auf die gedruckten Blechproben im gestapelten Zustand zu ermöglichen, müssen diese möglichst homogen voneinander getrennt werden. Dies sollte durch ein axiales Auffächern über ein von außen angelegtem, möglichst linear verlaufendem Magnetfeld realisiert werden. Im aufgefächerten Zustand kann der Klebe-/Isolationslack eingesprüht und der Stapel noch in der Vorrichtung verpresst werden. Vorteile des Konzeptes würden weiterhin der geringe Platzbedarf sowie die Applikation des Lackes und Entnahme ganzer Blechpaketsegmente sein. Das Auffächern durch ein Magnetfeld bildet dabei einen der kritischsten Teilprozesse, wobei die generelle Machbarkeit durch erste Versuche geprüft wurde. Zum Einsatz kamen dafür vier längspolarisierte Neodym-Magnete, die um einen Stapel aus runden, 0,2 mm starken, Elektroblech-Ringen positioniert wurden. Die wichtigsten Einflussfaktoren bildeten dabei die Anzahl der Magneten, der radiale Abstand zu den Proben sowie die Blechstärke. Abbildung 21 zeigt den Versuchsaufbau sowie das Haupteffektdiagramm mit einer qualitativen Bewertung der Einflussgrößen von eins bis fünf. Dabei steht der Wert fünf für eine sehr homogene und ausreichende Auffächerung der Bleche und der Wert eins für keine Auffächerung des Stapels.

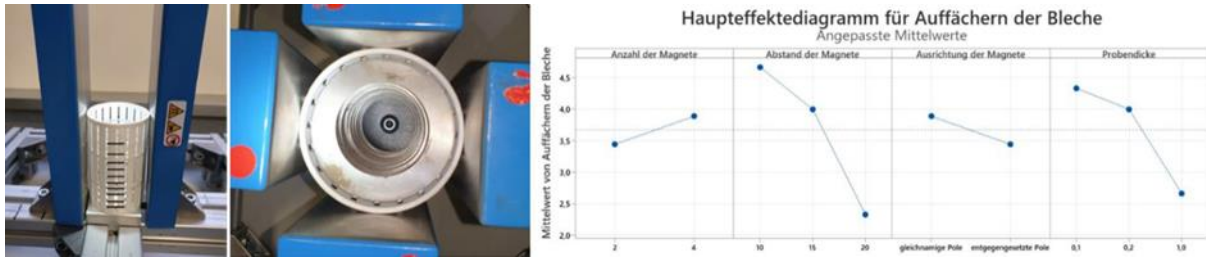


Abbildung 21: Versuche zum axialen Separieren der Einzelbleche

Die Versuchsreihen wurden im Laufe des Projektes erweitert und verbessert, bis schließlich saubere Auffächerungen mit bereits gedruckten runden Elektroblechen erreicht werden konnten. Versuche mit Druckluft zeigten zudem, dass die Bleche stabil im Magnetfeld stehen blieben und während des Lackierprozesses mit keiner großen Positionsänderung der Bleche zu rechnen war. Die Magnete wurden dafür mit Linearaktuatoren versehen, was ein möglichst stabiles und zeitlich abgestimmtes Heranfahren der Magnete an den Blechstapel ermöglichte. Zur weiteren Optimierung wurden zudem der Käfig zur Führung der Bleche angepasst und mit einer Dreheinheit versehen. Das Drehen des Käfigs im Magnetfeld zeigte dabei positive Effekte auf das axiale Ausrichten der Bleche. Abbildung 22 zeigt dabei die finale Version des Käfigs der Auffächerungseinheit.

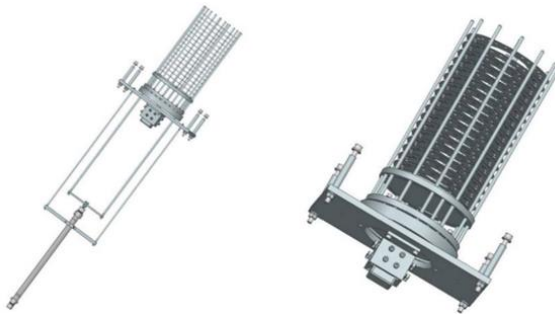


Abbildung 22: Käfig mit Dreheinheit

Das Konzept wurde im Projektverlauf in CAD auskonstruiert und anschließend physisch aufgebaut. Neben dem Subsystem der Auffächerung durch Magnete, dient eine Tellerfederdüse zur Beschichtung des Substapels mit Isolation- und/oder Klebematerial. Diese taucht in die Mitte des Stapels ein und führt anschließend eine Aufwärtsbewegung durch den Stapel aus. Während der Bewegung wird über die Tellerfeder ein Sprühbild von 360° erzeugt, welches die Bleche beschichtet. Anschließend fährt der Sprühkopf aus der Mitte und wird durch die Kompaktiereinheit ersetzt. Diese fährt auf die Bleche und führt mit einem synchron ablaufenden Auseinanderfahren der Spreizmagnete, zu einem Zusammenpressen der Bleche. Je nach Material wäre eine thermische Prozessierung in diesem Schritt denkbar. Abbildung 23 zeigt die technische Umsetzung der Applikationsvorrichtung im CAD inklusive der verwendeten Pneumatikaktuatoren.

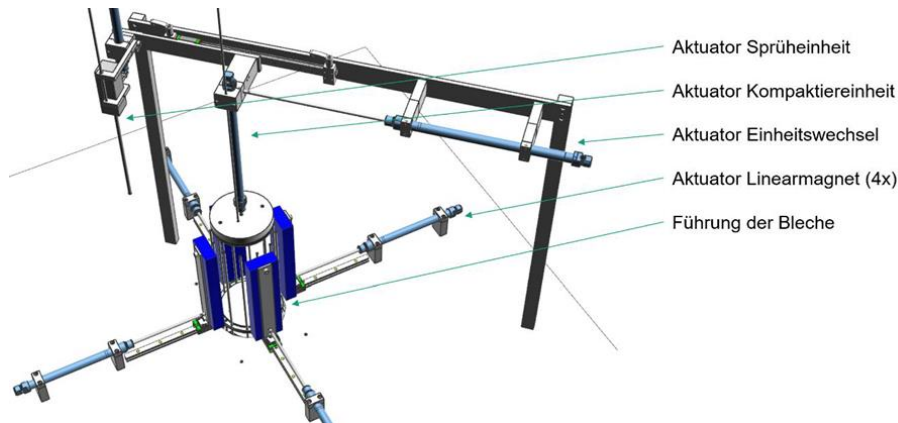


Abbildung 23: Aufbau der Applikationsanlage

Nach dem Aufbau erfolgte die Inbetriebnahme der Einzelkomponenten und Verknüpfung aller Operationen über eine Steuerung. Zum Ende des Projektes konnten Testläufe der Einzelsysteme mit positiven Ergebnissen erreicht werden, indem Substapel aus 10 Einzelblechen hergestellt werden konnten. Die größten Stellhebel zur Steigerung der Qualität sind dabei die Prozessparameter der Sprüheinheit (Druck, Luftdurchsatz, Viskosität Material) sowie die Geschwindigkeit des Sprühkopfes. Der aufgebaute Versuchs demonstrator mit allen Subsystemen und Steuerung ist in Abbildung 24 dargestellt.

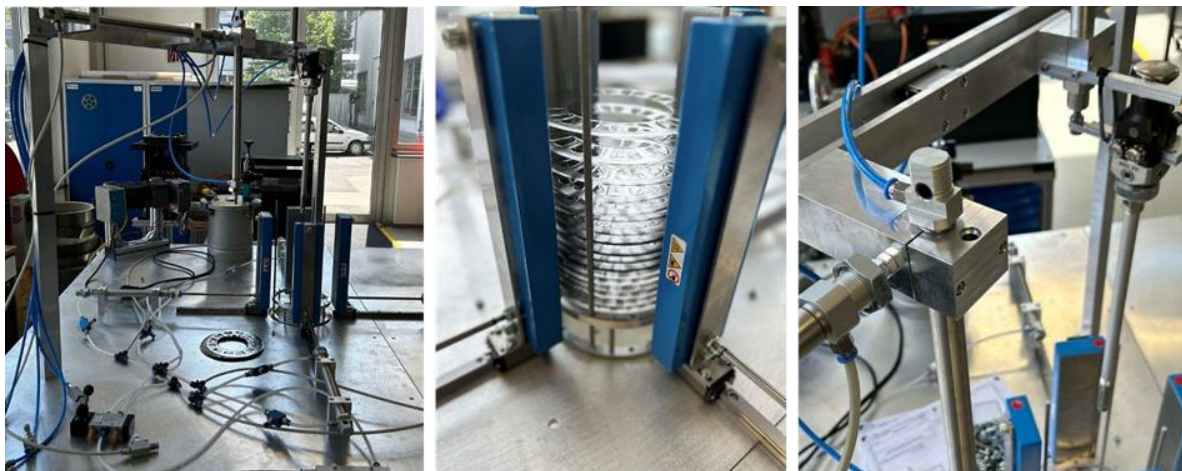


Abbildung 24: Versuchs demonstrator zur Beschichtung und Herstellung von Blechpaketsegmenten

Aufbau und Test des Stators

Das gesamte Handling der sehr dünnen gedruckten Bleche stellt für die Einspeisung in den konventionellen Aufbau des Blechpakets eine große Herausforderung dar, die durch das neue Handling unterstützt wurde aber auch weiterhin manuelle Prozesse umfasste.

Die Applikation von Isolationsschichten erfolgte nach Laser-Trimmen der Geometrie für die Bewicklung, z.B. durch Laserschneiden bzw. Stanzen. Nach dem Paketieren/Verkleben folgt die Kupferbewicklung, Imprägnierung und Montage mit einem PM-Rotor zur Motorendprüfung. Die Tests im Motortestlabor

umfassten Hochspannungs- und Isolationstests sowie Widerstands-, Kapazitäts- und Geräuschmessungen sowie die Aufnahme der Drehzahl - Drehmoment- Kennlinien.

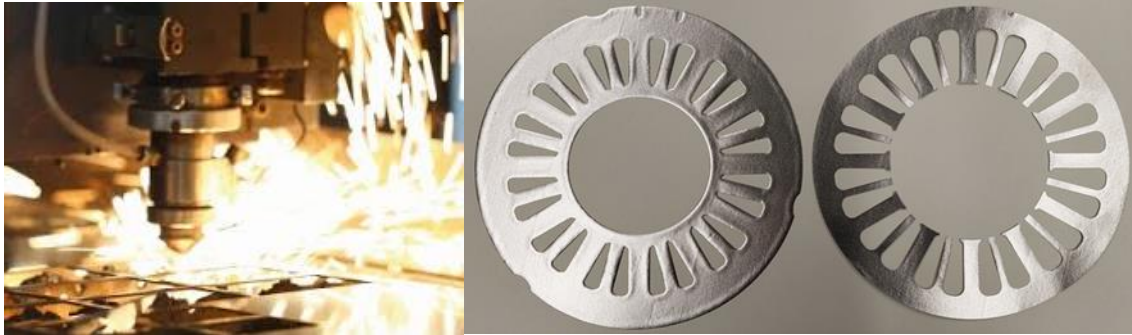


Abb. 25 Laser-Trimmen der Blechschnitte



Abb. 26 Aufbau, Bewicklung und Montage zum vollständigen Stator
(Industrialisierungskonzept)

5.8 Berechnung des Primärenergieverbrauchs und des CO₂-Footprints

Ein Ziel einer neuen Magnetblechherstellung ist die Absenkung des Primärenergieverbrauchs – mit besonderem Fokus auf den Stromverbrauch – für die Herstellung additiv gefertigter Magnetbleche im Rahmen des Industrialisierungskonzepts. Zur Ermittlung werden die bestehenden Materialwertströme sowohl des Laborprozesses als auch des Industrialisierungskonzepts um Energiewertströme ergänzt. Auf Basis dieser Energiewertströme werden anschließend der Primärenergiebedarf sowie der daraus resultierende CO₂-Footprint berechnet.

Laborprozess Primärenergieverbrauch

Der Laborprozess dient hierbei insbesondere zur Identifikation der energieintensivsten Prozessschritte, um diese im Hinblick auf das Industrialisierungskonzept gezielt analysieren und bewerten zu können. Ziel ist es, auf Basis dieser Erkenntnisse den Gesamtenergieverbrauch der geplanten Produktionslinie fundiert abschätzen zu können. Um das bestehende Simulationsmodell um Energiedaten zu erweitern,

ist es erforderlich, zunächst den Energieverbrauch der einzelnen im Prozess eingesetzten Anlagen zu erfassen und zu quantifizieren. Diese Daten bilden die Grundlage für die Integration der Energiewertströme in die Simulation und ermöglichen eine umfassende Analyse des Primärenergiebedarfs.

Energiedatenbeschaffung und -aufbereitung

Eine zentrale Herausforderung bei der Erstellung von Energiesimulationen besteht in der Verfügbarkeit geeigneter Energiedaten mit ausreichender Qualität und Granularität. Das Vorgehen zur Ermittlung von Lastprofilen kann dabei grob in drei Kategorien unterteilt werden: praktische Erhebungen, direkte Messungen am Produktionssystem sowie theoretische Erhebungen auf Basis von Simulationen und Schätzungen.

In der Regel bietet die praktische Profilermittlung eine höhere Datenqualität, da reale Verbrauchswerte berücksichtigt werden. Die theoretische Profilermittlung hat jedoch den Vorteil, dass sie ohne existierenden Prozess auskommt – ein entscheidender Vorteil bei der Planung neuer Fertigungslinien. Um eine erste energetische Bewertung der geplanten Anlagen zu ermöglichen, wurden zunächst theoretisch fundierte Energiedaten auf Basis von Literaturquellen und Datenblättern erhoben. Die Energie-Inputdaten für die Simulation stammen aus unterschiedlichen Quellen, die in die drei Hauptkategorien Literatur und Datenblätter, Messwerte und berechnete Werte eingeteilt werden können, wie Abbildung 1 darstellt.

Szenario Einheit [kW]	Datenquelle	Kreis-Dissolvier	Siebdruck	Transportmodul	Trockenstraße	Trennmittelauftrag	Trockner	Roboter	Batch-ofen
Labor	Datenblatt	2,2	2,3	0,2	18,6	0,75	1,64		43
	berechnet								0,24
	gemessen		1,77	0,1	12,9				10,5

Abb. 1: Aktueller Übersicht der ermittelten Stromverbräuche der Anlagen aus diversen Quellen

Der Batch-Ofen im Labor verfügt über mehrere Heizer, deren Leistungen sich zur Gesamtleistungsaufnahme des Ofens summieren. Zur detaillierten Analyse des Energiebedarfs wurden mehrere Laborofenläufe ausgewertet, bei denen der Stromverbrauch je Heizer separat erfasst wurde. Abbildung 2 zeigt den Verbrauchsverlauf der einzelnen Heizelemente während eines typischen Ofenlaufs.

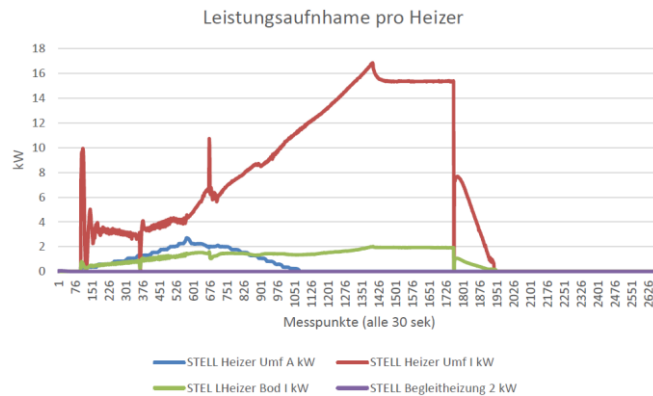


Abb. 2: Stromverbrauch je Heizer Laborofenlauf „1290 HO174d 3h 5050“

Die Aufzeichnungsdauer beim betrachteten Ofenlauf beträgt 22h. Es ist zu sehen, dass der Umfangheizer außen den größten Anteil am Gesamtstromverbrauch ausmacht. Der Verlauf der Kurve zeigt, wie der Strombedarf mit steigender Temperatur stetig ansteigt, während der Haltephase auf hohem Niveau stagniert und dann relativ abrupt abfällt, wenn mit der Kühlung des Innenraums begonnen wird. Der Gesamtverbrauch aller aktiven Heizer beträgt für diesen Ofenlauf 168,61 kWh. Der Maximalverbrauch aller Heizer zusammen tritt dabei zu Beginn der Haltezeit auf und beträgt 18,85 kW. Dies entspricht einem Leistungsabruf von 31% der möglichen Gesamtleistung aller zum Einsatz kommenden Heizer. Im Mittel beträgt der Stromverbrauch über die gesamte Messreihe bei diesem Ofenlauf 7,56 kW.

Insgesamt wurden fünf Ofenläufe mit unterschiedlichem Ofenprogramm analysiert. Die Ofenprogramme unterscheiden sich dabei in der Temperatur, der Haltezeit, der Ofenatmosphäre und dem eingestellten Gasbedarf. Die Unterschiede in den Ofenprogrammen führen zu einem individuellen Stromverbrauch und Gasverbrauch. Abbildung 3 fasst die Messergebnisse der jeweiligen Ofenprogramme zusammen. Die über den gesamten Ofenlauf gemittelte Leistung aller Ofenläufe ergibt einen durchschnittlichen Stromverbrauch von 10,5 kW. Der Mittlere Stickstoffverbrauch beträgt 7.306 l und der Wasserstoffverbrauch 1.545 l für einen gesamten Ofenlauf.

Ofenlauf	Temperatur [°C]	Haltezeit [h]	Strom [kWh]	Atmosphäre	N2 [NJ]	H2 [NJ]	Programmdauer [Minuten]
1290 HO174d 3h 5050	1290	3	168,6	5050	8473	726	1289
1290 HO76 10l entb	1290	3	171,1		8133	1191	1266
1380 HO84 3h Al ent	1380	3	210,3		9906	407	1350
1350 HO177 1h H2	1350	1	256,9	H2	1840	4415	1160
1290 HO174c 3h 5050	1290	3	272,5	5050	8178	986	1219

Abb. 3: Auswertung der gesamten Ofenläufe

Energieverbräuche bei Simulation Laborprozess für 1 Jahr

Analog zum Vorgehen in AP8 wurden auch in AP10 die Energiewertströme des Laborprozesses auf Jahresbasis simuliert. Grundlage hierfür bildeten die zuvor ermittelten Energiedaten der einzelnen Anlagen. Die Simulation ermöglicht eine erste energetische Gesamtbewertung des Prozesses und dient als Referenz für das spätere Industrialisierungskonzept. Die Abbildungen 4 und 5 stellen die entsprechenden Energieverbräuche für die drei Szenarien (Worst-Case, Most Likely, Best.-Case) übersichtlich dar.

Szenario Labor	Stromverbrauch gesamt [kWh]	Stromverbrauch je Blech [kWh]	Stromverbrauch je Kilo Blech [kWh]	Anteil Sinterofen am Gesamt- verbrauch [%]	Anteil Trockenstraße am Gesamtverbrauch [%]
Worst	266.186	5,67	641,57	82	15
Most likely	87.253	1,86	210,3	61	32
Best	65.437	1,39	157,72	60	34

Abb. 4: Simulationsergebnisse Laborprozess

Szenario	Stromverbrauch gesamt [kWh]	Stromverbrauch je Blech [kWh]	Stromverbrauch je Kilo Blech [kWh]	Anteil Sinterofen am Gesamt- verbrauch [%]	Anteil Trockenstraße am Gesamtverbrauch [%]
Worst	234569	2,27	257	79	17
Most likely	107210	1,04	117,46	66	26
Best	80499	0,78	88,2	66	26

Abb. 5: Simulationsergebnisse Laborprozess optimiert

Wie in AP8 beschrieben, wurde im Rahmen der Ganzjahressimulation des Laborprozesses (Ist-Zustand) eine Produktionsmenge von rund 47.000 Gutteilen angenommen. Im optimierten Szenario des Industrialisierungskonzepts liegt die Jahresproduktion bei ca. 240.000 Teilen. Für den Szenarienvergleich wurde ein identischer Materialfluss zugrunde gelegt, sodass in allen Szenarien die gleiche Stückzahl produziert wird.

Die Ergebnisse der Energiesimulation zeigen deutliche Unterschiede im Stromverbrauch zwischen den betrachteten Szenarien. Im Best-Case-Szenario liegt der Stromverbrauch um rund 75 % unter dem des Worst-Case-Szenarios. Der spezifische Stromverbrauch des „Most Likely“-Szenarios beträgt im Laborprozess etwa 210 MWh pro Tonne Magnetblech, während er im optimierten Industrialisierungsprozess bei rund 120 MWh/t liegt. Diese Ergebnisse verdeutlichen das erhebliche Einsparpotenzial durch Prozessoptimierungen und eine angepasste Anlagenauslegung.

Abbildung 5 zeigt die Aufschlüsselung des Stromverbrauchs auf die einzelnen Anlagen im betrachteten Prozess. Dabei lassen sich insbesondere die Trocknungsstraße mit einem Anteil von ca. 33 % und die Sinteröfen mit ca. 61 % als Hauptverbraucher identifizieren. Gemeinsam verursachen diese beiden Anlagentypen über 90 % des gesamten Energieverbrauchs. Diese Erkenntnis ist entscheidend für die gezielte Ableitung von Maßnahmen zur Energieeinsparung und zur Verbesserung der Energieeffizienz im weiteren Industrialisierungskonzept.

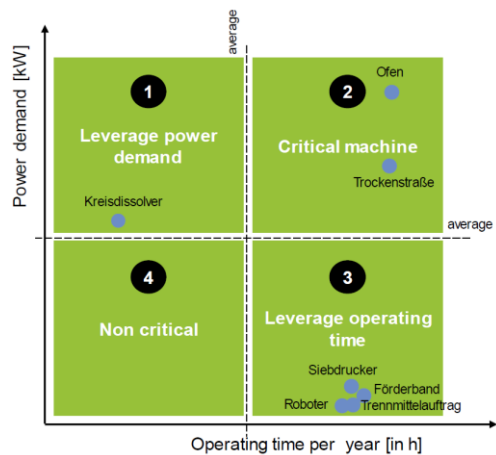
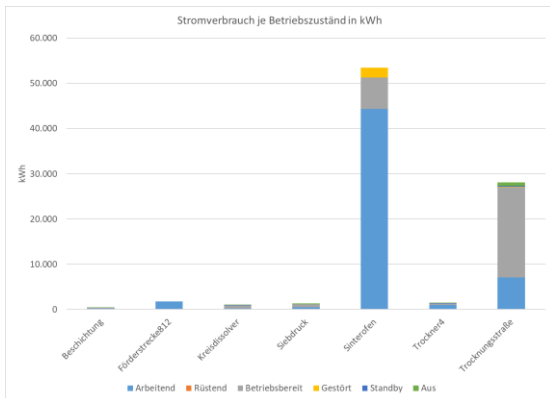


Abb. 6: Stromverbrauch nach Anlage im Laborprozess

Zur vollständigen Bestimmung des Product Carbon Footprint (PCF) wurden neben dem Stromverbrauch auch der jährliche Verbrauch von Stickstoff und Wasserstoff berücksichtigt. Die Verbräuche dieser Prozessgase wurden für alle drei Szenarien als konstant angenommen.

Der jährliche Stickstoffverbrauch beträgt 1.402.560 Liter (entspricht ca. 1.400 m³/a bzw. 2.800 m³/t Magnetblech), der Wasserstoffverbrauch liegt bei 296.640 Litern (ca. 300 m³/a bzw. 600 m³/t Magnetblech).

Für die Berechnung der CO₂-Äquivalente wurden die folgenden Emissionsfaktoren herangezogen:

- Strommix: 0,43 tCO₂e/MWh
- Stickstoff: 0,22 tCO₂e/t
- Nicht-grüner Wasserstoff: 12,82 tCO₂e/t

Basierend auf diesen Faktoren ergibt sich im Laborprozess folgender spezifischer CO₂-Footprint pro produzierter Tonne Magnetblech¹:

- Strom: ca. 90 tCO₂e/t
- Stickstoff: ca. 0,72 tCO₂e/t
- Wasserstoff: ca. 0,65 tCO₂e/t
- **Gesamt:** ca. 92 tCO₂e/t

Die CO₂-Äquivalente der weiteren Szenarien sind in Tabelle 7 dargestellt.

	Worst	Most Likely	Best
PCF [tCO ₂ äquiv]	51,79	38,55	29,08
PCF [kgCO ₂ äquiv] 1 kg Blech	124,82	92,91	70,09
PCF [gCO ₂ äquiv] 1 Blech	1103,48	821,43	619,68

Abb. 7: PCF Laborprozess

¹ Umrechnungen: Stickstoff: 0,22 tCO₂e/t bei 1,17 kg/m³ → 0,00026 tCO₂e/m³
Wasserstoff: 12,82 tCO₂e/t bei 0,084 kg/m³ → 0,0011 tCO₂e/m³

Die Ermittlung des Product Carbon Footprint (PCF) für den Laborprozess verdeutlicht, dass der Stromverbrauch den mit Abstand größten Anteil an den CO₂-Emissionen verursacht. Rund 98 % des gesamten PCF entfallen auf den Stromverbrauch. Der Beitrag von Stickstoff und Wasserstoff liegt jeweils bei etwa 1 %.

Die Auswertung der Szenarien zeigt eine hohe Varianz sowohl beim Energieverbrauch als auch beim resultierenden Product Carbon Footprint (PCF), abhängig von den zugrunde liegenden Datenquellen und Annahmen. Trotz dieser Schwankungen lässt sich eindeutig feststellen, dass die Prozesse Trocknung und Sintern gemeinsam rund 90–95 % des Gesamtenergieverbrauchs verursachen.

Insbesondere beim Einsatz von Batch-Öfen entfällt der größte Anteil des PCF auf den Stromverbrauch, was die zentrale Rolle der elektrischen Energie in der Klimabilanz der Produktion unterstreicht. Vor diesem Hintergrund wird für die weitere Erhebung und Detaillierung der Energiedaten im Industrialisierungsprozess der Fokus gezielt auf die Stromverbrauchserfassung der Trocknungsstraße und des Sinterprozesses gelegt, um die wichtigsten Einflussfaktoren fundiert bewerten und Optimierungspotenziale ableiten zu können.

Industrialisierungsprozess Primärenergieverbrauch

Aus den vorherigen Analysen geht klar hervor, dass die Trocknungsstraße und der Sinterofen gemeinsam über 90 % des gesamten Stromverbrauchs im Industrialisierungsprozess verursachen. Vor diesem Hintergrund wurden gezielt die Energieverbräuche dieser beiden Hauptverbraucher detaillierter ermittelt. Auf Basis dieser Daten kann der Primärenergiebedarf des geplanten industriellen Herstellungsprozesses erstmals abgeschätzt werden.

Energiebedarf Trocknungsprozess der Grünlinge anhand Testdruck bei EKRA

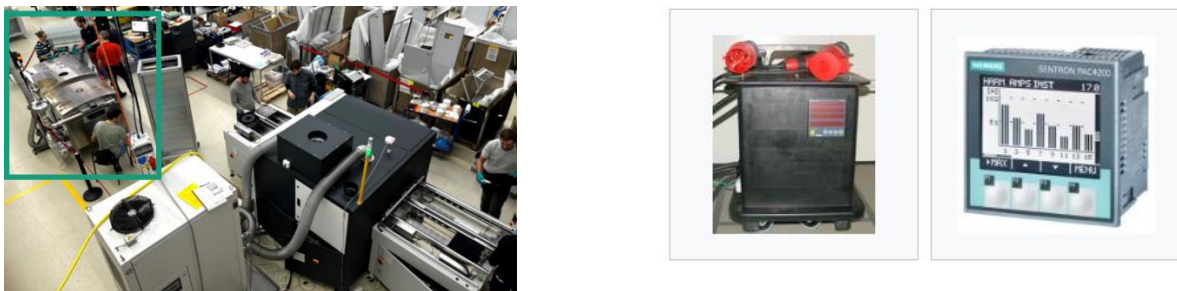
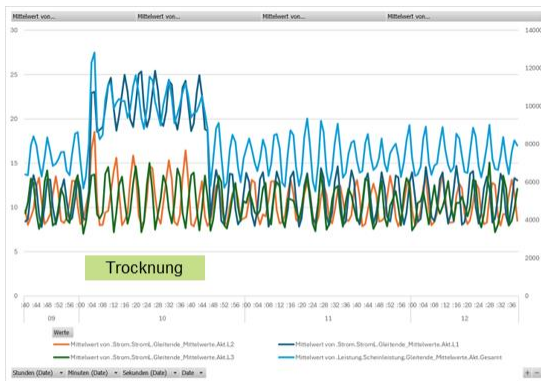
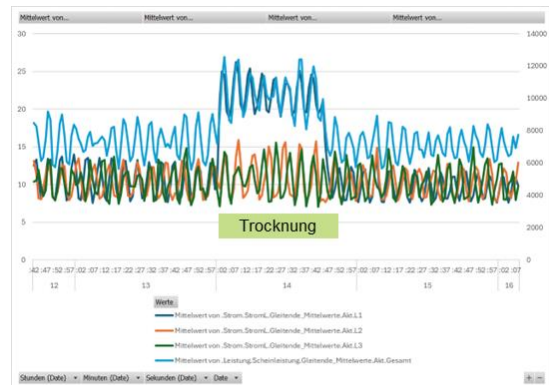


Abbildung 8: Energiemesskoffer zur Aufnahme des Stromverbrauchs des Trocknungsprozesses

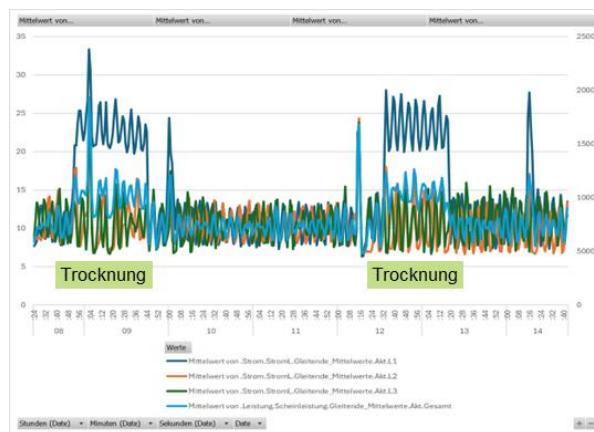
Die Energiewerte der Trockenstraße wurden bei einem Testdruck für den Demomotor bei EKRA erfasst. Hierzu kam ein Energiemesskoffer vom FAPS zum Einsatz, der die Daten aufzeichnete. Im Rahmen der Messungen wurden mehrere Batches analysiert, um ein realistisches und belastbares Verbrauchsprofil zu erhalten. Die aufgezeichneten Energieverläufe werden in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt und dienen als Grundlage für die Abschätzung des Energiebedarfs dieses Prozessschritts im Industrialisierungskonzept.



Batch 1



Batch 2



Batch 3 & Batch 4

Trocknung	Batch 1	Batch 2	Batch 3	Batch 4	Durchschnitt
Leistung \varnothing	10,2 kW	10,3 kW	10,5 kW	10,4 kW	10,4 kW
Dauer	42 min	44 min	53 min	47 min	47 min
Energiebedarf gesamt	7,2 kWh	7,6 kWh	9,3 kWh	8,2 kWh	8,0 kWh
Anzahl Bleche	250	250	250	250	250
Energiebedarf je Blech	0,029 kWh	0,030 kWh	0,037 kWh	0,033 kWh	0,032 kWh

Abbildung 9: Energieverbräuche zum Trocknen bei Testdruck

Der eingesetzte Messkoffer zeichnete die Energiewerte sowohl vor als auch während und nach dem eigentlichen Druckprozess auf. Die im Diagramm sichtbare Grundlinie stellt den Strombedarf zur Aufrechterhaltung der Prozesstemperatur dar, selbst wenn keine aktiven Trocknungsvorgänge stattfinden. Erhöhte Ausschläge im Diagramm deuten auf zusätzliche Energieeinträge hin, die direkt mit dem Trocknen der Bleche zusammenhängen.

Dabei zeigte sich, dass Unterschiede in der Durchlaufgeschwindigkeit zwischen den einzelnen Batches den Energieeintrag pro Blech sowie die Trocknungsdauer beeinflussen. Im Mittel ergab sich eine durchschnittliche Leistungsaufnahme der Trocknungsstraße von 10,4 kW. Daraus lässt sich ein spezifischer Energiebedarf von etwa 0,03 kWh pro Blech ableiten. Bei einem Gewicht von 12 g pro Blech entspricht

dies einem hochgerechneten Energiebedarf von rund 2,5 MWh pro Tonne Magnetblech für den Trocknungsprozess.

Energiebedarf Sinterprozess im Batch-Ofen im Industrialisierungskonzept

Die Stromverbrauchsdaten beim Sintern der Bleche wurden im Rahmen des Produktionslaufs für den Demomotor am IFAM aufgezeichnet. Da die aufgezeichneten Daten jedoch fehlerhaft waren, musste zur Abschätzung des Energiebedarfs auf eine alternative Methodik zurückgegriffen werden. Diese basiert auf Messwerten eines Siemens-Laborofens sowie einer Hochrechnung auf den geplanten Serienofen.

Der Stromverbrauch des Laborofens wurde mit 10,5 kW bei einem Ofenvolumen von 0,028 m³ ermittelt, was einem spezifischen Strombedarf von 370 kW/m³ Innenraumvolumen entspricht. Für den im Serienprozess vorgesehenen Batchofen wird ein Innenvolumen von etwa 0,5 m³ angenommen – rund das 18-Fache des Laborofens.

Eine Analyse unterschiedlicher Ofensysteme, u. a. von Salzbadern, zeigt, dass der Stromverbrauch nicht proportional mit dem Ofenvolumen steigt. So beträgt beispielsweise die Leistungsdichte bei einem 20-Liter-Ofen etwa 1,05 kW/L, während sie bei einem 360-Liter-Ofen auf 0,28 kW/L sinkt – dies entspricht einer Leistungssteigerung von lediglich 25 %.

Unter Berücksichtigung dieses Skalierungseffekts ergibt sich für den Serienofen eine geschätzte durchschnittliche Leistungsaufnahme von 50,8 kW. Da im Serienprozess die Prozessdauer von 22 auf 14 Stunden verkürzt wird, wird angenommen, dass die gesamte Energiemenge in kürzerer Zeit eingebracht werden muss, wodurch sich der gemittelte Strombedarf auf ca. 80 kW erhöht. Diese Abschätzung bildet die Grundlage für die energetische Bewertung des Sinterprozesses im Rahmen des Industrialisierungskonzepts.

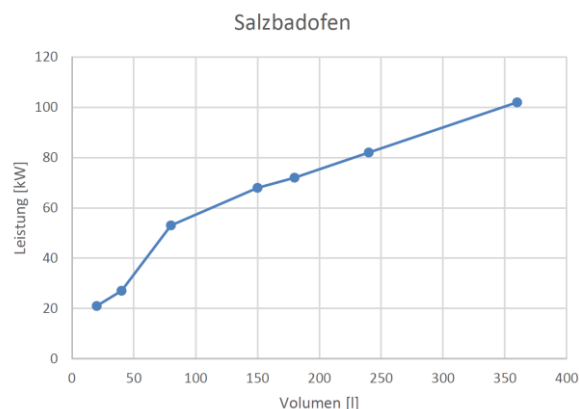


Abbildung 10: Leistung und Ofenvolumen eines Salzbadofens

Gasverbrauch Batch-Ofen Serie

Most Likely	1 Ofen	2 Öfen	3 Öfen	4 Öfen
H2 [m³]	11.814	22.924	33.572	37.224
N2 [m³]	55.848	108.368	158.704	175.968

Abbildung 11: Gasverbrauch Ganzjahresproduktion Industrialisierung (240 t/a)

Zur Ermittlung des Gasverbrauchs eines Ofenlaufs im Batchofen der Serie wurde der gemessene Gasverbrauch des Laborofens herangezogen und entsprechend skaliert. Der Prozessraum des Serienofens ist etwa 18-mal größer als jener des Laborofens. Gleichzeitig wird unterstellt, dass ein größerer, auf Serienproduktion ausgelegter Ofen eine höhere Energieeffizienz aufweist. Diese Effizienzsteigerung wurde konservativ mit einem Faktor von 0,8 berücksichtigt.

Auf dieser Grundlage ergibt sich für den Serienprozess ein jährlicher Stickstoffverbrauch von ca. 175.000 m³, was einem spezifischen Verbrauch von 730 m³/t Magnetblech entspricht. Der jährliche Wasserstoffverbrauch wurde mit rund 37.000 m³ abgeschätzt, entsprechend einem spezifischen Verbrauch von 150 m³/t Magnetblech. Diese Werte fließen in die Berechnung des Product Carbon Footprint (PCF) für den Serienprozess ein und dienen als Basis für die ökologische Bewertung der geplanten Produktion.

Gesamtenergiebedarf und PCF

Basierend auf den zuvor ermittelten Energie-Inputdaten wurde der Energiebedarf für den Sinterprozess im Serienbetrieb mithilfe der Simulation berechnet. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Stromverbräuche der einzelnen Anlagen im Rahmen der Ganzjahresproduktion.

Insgesamt ergibt sich für den betrachteten Produktionsmaßstab ein jährlicher Energiebedarf von ca. 4 GWh. Bezogen auf die produzierte Menge Magnetblech entspricht dies einem spezifischen Stromverbrauch von etwa 15 MWh/t.

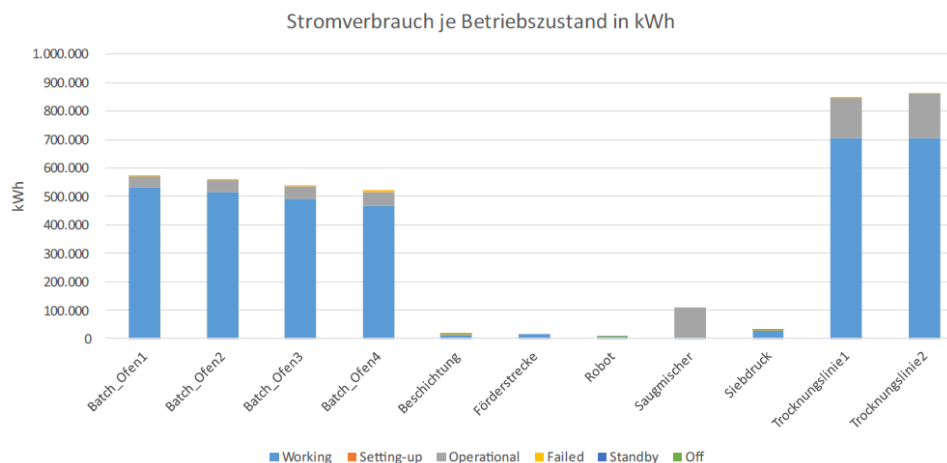


Abbildung 12: Energiebedarf Ganzjahresproduktion Industrialisierung (Produktionsmenge: 240 t/a)

Auf Grundlage der zuvor abgeschätzten spezifischen Verbräuche und der zugrunde gelegten Emissionsfaktoren ergeben sich für die Blechherstellung im Rahmen des Industrialisierungskonzepts folgende CO₂-Äquivalente pro Tonne Magnetblech:

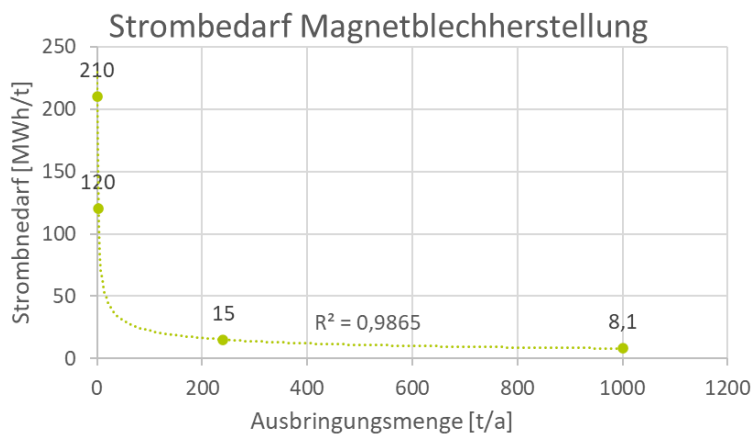
- Strom: ca. 6,5 tCO₂e/t
- Stickstoff: ca. 0,2 tCO₂e/t
- Wasserstoff: ca. 0,2 tCO₂e/t
- **Gesamt:** ca. 7 tCO₂e/t

Im Vergleich zum Laborprozess, der einen PCF von rund 92 tCO₂e/t aufweist, zeigt sich damit eine signifikante Reduktion des Product Carbon Footprint um den Faktor 13. Diese deutliche Verbesserung unterstreicht das Potenzial des optimierten Industrialisierungsprozesses hinsichtlich Energieeffizienz und Nachhaltigkeit.

6. Nutzungspotentiale der gedruckten Bleche

Energieeinsparung in der Herstellungs- und Nutzungsphase von el. Maschinen

Die Skalierung vom Laborprozess zur Herstellung gedruckter Bleche hin zur industriellen Fertigung führt zu einer exponentiellen Reduzierung des Energiebedarfs und des CO₂-Footprints. Dennoch liegt der spezifische Energieverbrauch derzeit noch etwa doppelt so hoch wie bei der konventionellen Herstellung von Magnetblechen. Um den Energiebedarf konventionell gefertigter Bleche zu erreichen oder zu unterschreiten, ist eine weitere Skalierung der Prozesse sowie eine konsequente Optimierung der energieintensiven Verfahrensschritte erforderlich.



	Laborprozess	Laborprozess optimiert	Industrialisierung (Batch-Ofen)	Industrialisierung (Kontin-Ofen)	Konventionell
Ausbringung Bleche [t/a]	0,5	2,9	240	1.000+	
Strombedarf [MWh / t Blech]	210	120	15	8,2*	8,1
tCO ₂ e / t Blech	92	52	7	3,8*	3,7

Abb. 1: Strombedarf Magnetblechherstellung

Dabei ist zu beachten, dass in der Gesamtenergiebetrachtung auch die Systemvorteile additiv gefertigter Bleche berücksichtigt werden müssen, insbesondere das Einsparpotenzial durch den höheren Wirkungsgrad der daraus hergestellten Elektromotoren. Diese Effekte werden in nachfolgend näher erläutert und quantifiziert.

Zur Bewertung der langfristigen Energieeffizienz wird ein exemplarischer Betriebspunkt des Elektromotors herangezogen:

- Drehmoment (M): 20 Nm
- Drehzahl (n): 2.500 1/min
- Leistung (P): 5,23 kW

Die durchgeführten Simulationen zeigen eine gesteigerte Motorperformance durch den Einsatz gesinteter Magnetbleche. Der Wirkungsgrad des Motors erhöht sich von $\eta_c = 92\%$ (konventionell) auf $\eta_{https} = 94\%$ (gesintert). Dadurch sinkt die Verlustleistung von $P_{v,c} = 0,42\text{ kW}$ auf $P_{v,https} = 0,31\text{ kW}$, welches einer Reduktion um ca. 100 W entspricht. Bei einer angenommenen jährlichen Betriebsdauer von 1.000 h ergibt sich eine **Energieeinsparung** von 0,1 MWh pro Motor und Jahr. Im Vergleich dazu beträgt der Energieaufwand für die Herstellung der Bleche pro Motor für das avisierte Anfangsvolumen:

- Konventionelle Bleche (15 kg Blechpaket, 8,1 MWh/t): ca. 0,12 MWh
- Gesinterte Bleche (15 kg Blechpaket, 15 MWh/t): ca. 0,22 MWh

Der Mehraufwand von 0,1 MWh bei der Produktion der gesinterten Bleche wird somit nach etwa einem Jahr Betriebszeit durch die höhere Effizienz kompensiert. Ab diesem Zeitpunkt führen die gesinterten Bleche zu einem netto niedrigeren Energieverbrauch über die Lebensdauer des Motors und leisten einen positiven Beitrag zur Energie- und CO₂-Bilanz des Gesamtsystems.

Abbildung 2 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen dem erhöhten Motorwirkungsgrad durch den Einsatz gesinteter Magnetbleche und der dadurch erzielten Energieeinsparung über die Betriebsdauer. Sie zeigt, dass der zusätzliche Energieaufwand bei der Herstellung der Bleche im Vergleich zum konventionellen Verfahren bereits nach etwa einem Jahr ausgeglichen wird.

Ab diesem Zeitpunkt führt der Einsatz gesinteter Bleche zu einem kumulativen energetischen Vorteil, der sich mit jeder weiteren Betriebsstunde verstärkt. Die Betrachtung macht deutlich, dass eine rein produktionsbezogene Bewertung nicht ausreicht – vielmehr ist der Systemnutzen über den Lebenszyklus des Motors entscheidend für die energetische und ökologische Gesamtbilanz.

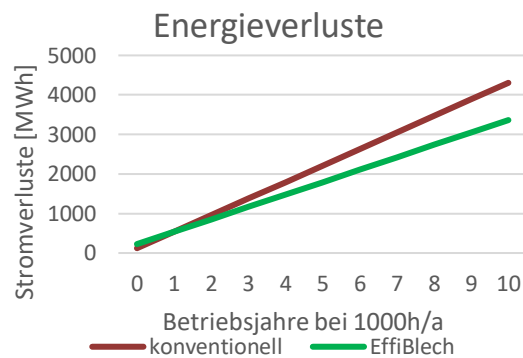


Abb. 2: Energiebilanzbetrachtung über die Lebensdauer

Mithilfe der Materialfluss- und Energieflusssimulation konnte das geplante Industrialisierungskonzept für die Herstellung additiv gefertigter Magnetbleche umfassend abgebildet und bewertet werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei einer Ausbringungsmenge von 240 t/a der spezifische Stromverbrauch in der Produktion etwa doppelt so hoch ist wie bei der konventionellen Herstellung. Dieser energetische Mehraufwand wird jedoch bereits nach rund einem Jahr Betriebszeit des Elektromotors durch den gesteigerten Wirkungsgrad vollständig kompensiert.

Darüber hinaus kann bei einer weiteren Skalierung auf Ausbringungsmengen >1.000 t/a eine weitere Reduktion des Primärenergiebedarfs in der Produktion erwartet werden. Diese Ergebnisse unterstreichen das große Potenzial additiv gefertigter Magnetbleche – sowohl im Hinblick auf Energieeffizienz in der Anwendung als auch auf zukünftige Nachhaltigkeit in der Produktion.

In Abb. 3 sind die Nutzungspotentiale der entwickelten Prozesskette hinsichtlich erwartbarer Effizienz des Motors in der Herstellungs- als auch Nutzungsphase.

Ziel	Ausgang Labor	Erreichung / Wert	Bemerkung
✓ 1. Reduktion der Kern-Verluste um 10 %	Effizienz 92% @2000rpm	Effizienz 93,8% @2000 rpm → Verluste - 24%	Verlustmessungen an Epseinstreifen Erwartete Effizienz am Motor
✓ 2. Reduktion der Materialkosten bei der Herstellung um 20 %	60 €/kg Pulver 6 €/kg Verpastung	8 €/kg Pulver 1,5 €/kg Verpastung	Wässrige statt organischer Paste, Industrielle Carbonyleisenmengen/Qualität
✓ 3. Reduktion des CO ₂ -Footprint bei der Herstellung von (Asynchron)Motoren um ca. 20 % (im Blechpaket um ca. 40 %)	Fokus: konv. Blechpaket 3,7 kgCO ₂ /kg Blech (Dicke??)	Im Pilotprozess keine Ersparnis 240t/a: 7+x kgCO ₂ /kg 1000 t/a: ~4 kgCO ₂ /kg	erst beim Übergang zu verdünnten Pulvern und hohen Volumina zu bewerten Abfrage bei Herstellern teils erfolglos
✓ 4. Erhöhung der Produktivität durch: <ul style="list-style-type: none"> • Vollautomatisierung des Drucks • Vergrößerung der Siebfläche • Integration von Durchlauf Trockner und Inspektionseinheit • Optimierte Beladung und reduzierte Prozessdauer bei der Sinterung • Optimierte Produktionsplanung 	Kapazität <1 t/a	Skalierung auf 240 t/a	

Abb. 3: Zusammenfassung der Nutzungspotentiale durch erhöhte Effizienz und Energie- und Materialkosteneinsparung in der Herstellungsphase gedruckter und gesinterter Statorbleche.

7. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Publikationen FAPS/Siemens/IFAM:

1. A. Schmidt, M. Ziegler, J. Franke und A. Kuehl, „Development of magnetic sheets for CO₂ efficient electric drives using an additive manufacturing approach,“ in Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM), Berlin, Germany, 2023.
2. A. Schmidt, J. Schalling, N. Wieprecht, L. Janisch, J. Franke and A. Kuehl, „Investigation of Layer Thickness Distribution and Surface Defects on Screen-printed Magnetic Sheets,“ in Electric Drive Production Conference, Regensburg, Germany, 2024.
3. A. Schmidt, N. Wieprecht, J. Schlichting, S. Denneler, A. Kühl and J. Franke, „Process Development of Screen-Printed Magnetic Sheets for Electric Machines via Statistical Design of Experiments,“ Metals, Bd. 13, Nr. 1814, 2023.
4. A. Schmidt, N. Wieprecht, J. Thamm, F. Jörg and K. Alexander, „Continuous Improvement of the Screen-Printing Process of Magnetic Sheets for Electric Machines by Statistical Design of Experiment“, in Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM), Porto, PT, 2023.
5. A. Schmidt, N. Wieprecht, A. Cosack, L. Janisch, J. Franke and A. Kuehl, „Systematic Qualification of Layer Thickness, Roundness and Defects of Screen-printed Magnetic Sheets,“ in 13th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Regensburg, Germany, 2023.
6. A. Schmidt, N. Wieprecht, T. Weinrich, J. Franke und A. Kuehl, „Multi-objective parameter optimization for stacking and sintering of screen-printed magnetic sheets,“ Production Engineering, p. 9, 2023.
7. K. Reuter, T. Simon, I. Lindemann-Geipel, T. Mix, Th. Studnitzky, Ch. Zhong and Th. Weissgärber, „Additive Manufacturing of High-efficient Monolithic Fe_{6.5}Si Electric Sheet Stacks“ in JJSPM (vol. 72)