

Projektskizze

zur Vorlage im Gemeinschaftsausschuss Klebtechnik,
Sitzung am 18.06.2024

GK.24.4-2

1. Thema

„Laservorbehandlung für alterungsstabile Klebungen von Magneten“ (LaMa)

2. Wissenschaftlich / technische Problemstellung und wirtschaftliche Problemstellung

Nicht nur im Automobilbereich nehmen Elektromotoren einen zunehmend größeren Stellenwert ein. Anwendungsfelder wie die Medizintechnik, Klimatisierung und der Maschinenbau profitieren ebenfalls von den zunehmend kompakter und gleichzeitig leistungsstärker sowie kostengünstiger werdenden Motoren. Die Hersteller derartiger Motoren sind häufig KMUs, wie die Zusammensetzung des PA zeigt. Im Mobilitätssektor werden dabei vor allem drei Typen von Elektromotoren verwendet: permanenterregte Synchronmotoren, Asynchronmotoren und fremderregte Synchronmotoren¹. Bevorzugt werden dabei permanenterregte Motoren eingesetzt, da diese den höchsten Wirkungsgrad aufweisen und daher weniger Platz für dieselbe Leistung benötigen und am besten zu kühlen sind. Für den Aufbau eines solchen Motors werden typischerweise Permanentmagnete auf dem Rotor fixiert. Dabei kann es sich um Ferrit-, häufig jedoch um Seltenerd-Magnete handeln. Letztere sind aufgrund der Marktverfügbarkeit und dem großen Bedarf der Industrie teuer. Aufgrund der Sprödigkeit von magnetischen Werkstoffen sind diese mit mechanischen Ansätzen wie z.B. Verschraubungen nicht zu fügen. Dagegen hat sich die Klebtechnik als geeignete Fügemethode etabliert, welche zusätzlich in der Lage ist, thermisch bedingte Verspannungen zu kompensieren und dadurch eine hohe Standzeit zu gewährleisten. Häufig werden die Klebungen noch mit geometrischen Haltepunkten oder einer Umwicklung der Magnete unterstützt, um eine bessere mechanische Stabilität zu bewerkstelligen. Hintergrund ist unter anderem, dass im Bereich der Magnetklebungen, trotz etablierter Klebprozesse, immer wieder Schäden in Form von Enthaltungen auftreten. Häufig machen sich diese Schäden in Form einer Ablösung des Klebstoffs von der Magnetoberfläche bemerkbar. Die Ursache hierfür liegt meist in der schwankenden Qualität der Magnetoberflächen. So werden die Klebprozesse für unterschiedliche Magnetzulieferer und für qualitativ stark schwankende Materialchargen typischerweise mit den gleichen Fertigungsparametern durchgeführt. Ein Verständnis der für die Adhäsionsverluste verantwortlichen Oberflächeneffekte sowie ein darauf aufbauendes anwenderspezifisches Konzept zur Oberflächenvorbehandlung, welches solche Qualitätsschwankungen der Magnetoberfläche ausgleichen könnte, existiert bisher nicht.

3. Forschungsziel / Ergebnisse / Lösungsweg

Forschungsziel

Das vorliegende Projekt beschäftigt sich mit der Aufklärung der Adhäsionseigenschaften von Magnetoberflächen und wie diese durch eine Vorbehandlung mittels eines lokalen Laserablationsverfahrens reproduzierbar eingestellt werden können. Der Laserprozess wurde als Vorbehandlungstechnik ausgewählt, da er ohne mechanische oder chemische Beizmittel auskommt, was zu einem nachhaltigen Vorbehandlungsprozess führt. Zudem stellen die vergleichsweise kleinen Magnetgeometrien und die lokale Klebflächenvorbehandlung eine für den Laser sowohl wirtschaftlich als auch technisch gut geeignete Aufgabenstellung dar.

Hierfür werden die folgenden technischen Teilziele verfolgt:

¹ <https://www.nzz.ch/mobilitaet/auto-mobil/elektromotoren-permanenterregt-fremderregt-oder-asynchron-id.1599507>

- Charakterisierung der an einer nativen Oberfläche eines Magneten auftretenden chemischen Zustände und der Gefügestruktur
- Analyse potenziell adhäsionsmindernder Verbindungen
- Entwicklung eines Laserprozesses zur reproduzierbaren Konditionierung der Magnetoberflächen bei einem gleichzeitig möglichst geringen thermischen Eintrag
- Prüfung der Adhäsionseigenschaften der Magnete vor und nach einer Laservorbereitung

Aus den Projekterkenntnissen soll ein Merkblatt für die klebtechnische Vorbereitung von aufgesetzten Magneten, im speziellen mittels einer Laservorbereitung, entwickelt werden. Dieses wird Unternehmen aus den Bereichen der Elektromotor-Entwicklung und -Fertigung zur Verfügung gestellt.

Ergebnisse

Die Laser-Oberflächentechnik hat sich in einer Vielzahl von Anwendungsfeldern als flexibles Vorbehandlungsverfahren etabliert. Die Technik ist in der Lage, je nach Parameterwahl Kontaminationen abzutragen, eine Benetzungs- und Adhäsions-fördernde Topographie einzubringen, Element-An- bzw. Abreicherungen zu ermöglichen und / oder die Gefügestruktur im oberflächennahen Bereich anzupassen. Die Verwendung von kurzen Pulslängen im Femto-(fs) bis Nanosekunden (ns)-Bereich führt zu einem geringen thermischen Einfluss auf das Grundmaterial. Hinzu kommt eine sich fortführende technologische Verbesserung der Laserquellen, was zunehmend zu kleineren Dimensionen und geringeren Kosten in der Anschaffung führt. Laserprozesse zielen häufig nicht darauf ab, einen nasschemischen (Beizen, Passivieren) oder mechanischen (Schleifen, Strahlen) Prozess gänzlich zu ersetzen, sondern nutzen die präzise Ortsansteuerung für lokale Prozesse aus. Besonders hervorzuheben sind fasergeführte und damit am Roboter oder mittels einer Handoptik nutzbare Systeme, welche typischerweise im Nah-IR-Bereich (z.B. 1064 nm) emittieren. Ein komplexes Bauteilhandling oder die Maskierung nicht zu bearbeitender Bereiche kann so entfallen, was zu deutlichen Zeit- und Kosteneinsparungen führt.

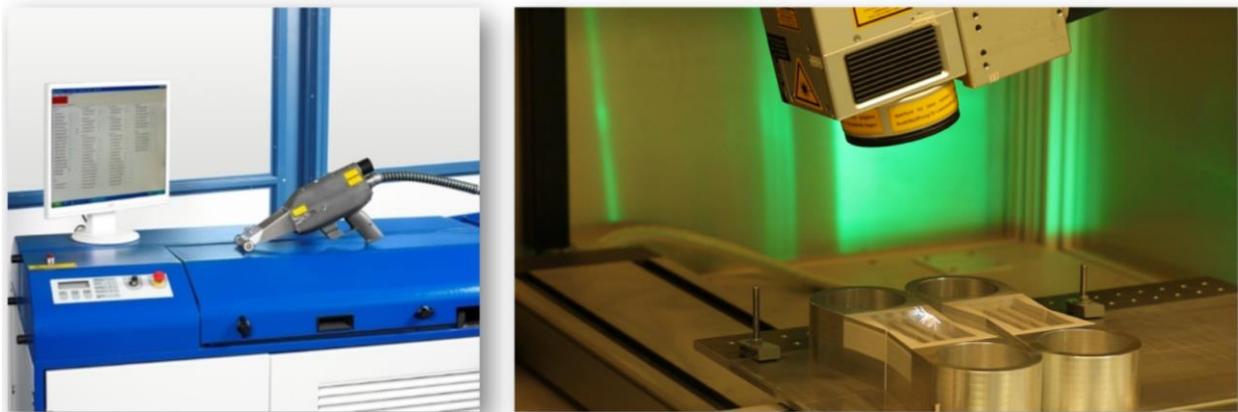


Abbildung 1: Links: Fasergeführter Nah-IR-Laser mit Handoptik / Rechts: starre 2D-Scanoptik bei der Bearbeitung von Halterungen an einem Portalsystem.

Da verschiedene Laserparameter zu nichtlinearen Behandlungseffekten auf der Probenoberfläche führen können, erfolgt die Parameterentwicklung oftmals über möglichst anwendungsnahe und damit kostenintensive Tests. Ein Verständnis der Bearbeitungseffekte wird dadurch nicht entwickelt, was bei geringen Prozess- oder Materialänderungen zu Ausfällen führen kann. Gerade letzteres kann aufgrund der Schwankungen in der Qualität von Magnetoberflächen zu Schadensfällen in der Anwendung führen. Bei einer Unterbehandlung können adhäsionsmindernde Bestandteile auf der Oberfläche verbleiben. Dagegen kann eine Überbehandlung den chemischen Oberflächenzustand (z.B. durch Oxidbildung) und die Gefügestruktur unnötig stark thermisch beeinflussen, was bei spröden Magnetmaterialien zu einer Verringerung der mechanischen Beständigkeit führen kann.

Um ein Verständnis der Zusammenhänge zwischen dem Zustand der Magnetoberfläche und den Klebeigenschaften zu entwickeln, kommen im Projekt hochauflösende Analyseverfahren wie die Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie (XPS) und die Flugzeit-Sekundärionenmassen-Spektrometrie (ToF-SIMS) zum Einsatz, die detaillierten Informationen über die chemischen Zusammensetzungen der äußersten Magnetoberfläche liefern. kommenden Methoden und liefert

Informationen sowohl über Elemente als auch Moleküle. Ergänzend dazu werden die topographischen Eigenschaften und die Gefügestruktur der Magnete mit elektronenmikroskopischen Methoden untersucht.

Lösungsweg

Das Forschungsvorhaben zielt auf die Erstellung eines Merkblattes für die reproduzierbare und langzeitstabile Verklebung von Magnetoberflächen ab, insbesondere in Zusammenhang mit einer Laservorbehandlung. Weiterhin liefern die Untersuchungsergebnisse ein genaueres Verständnis der adhäsionsmindernden Faktoren auf einer Magnetoberfläche im Ausgangszustand und der Oberflächengüte für eine möglichst haftfeste Klebung. Ausgehend von einer genauen Charakterisierung von zwei ausgewählten Magnetoberflächen (Neodym-Eisen-Bor, Ferrit; genaue Abstimmung mit projektbegleitendem Ausschuss) werden Laserparameter erarbeitet und getestet sowie durch Oberflächen- und Grenzflächenanalysen ein Zusammenhang mit den Bearbeitungseffekten hergestellt. Das methodische Gesamtkonzept des Vorhabens ist in Abbildung 2 dargestellt.

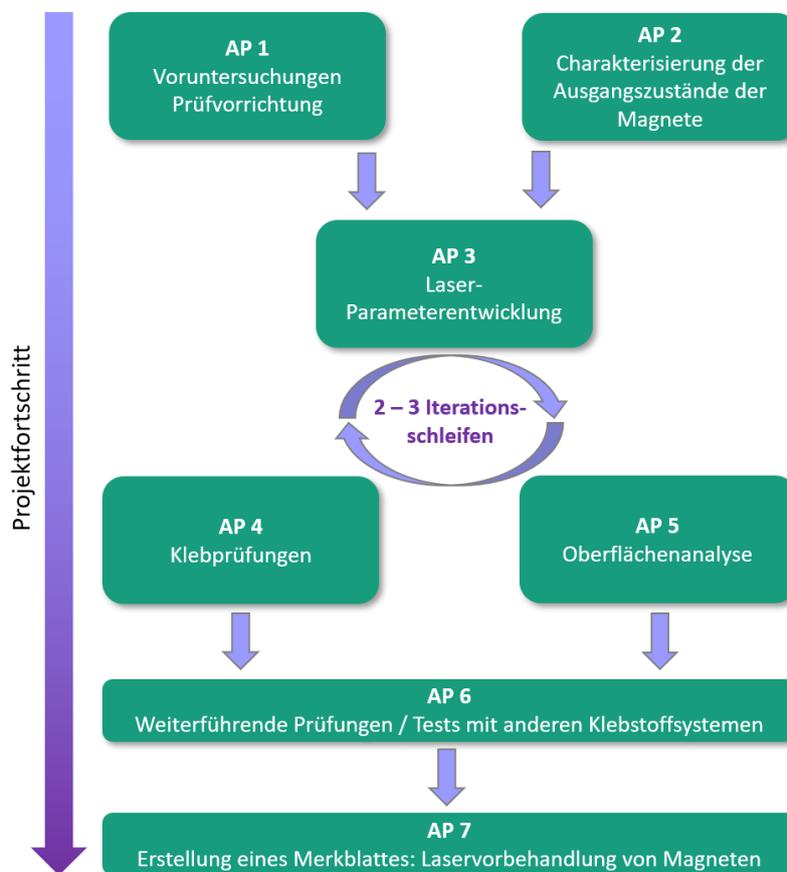


Abbildung 2: Methodisches Gesamtkonzept.

Da sich die Prüfung der Haftfestigkeit von Magneten aufgrund der hohen Sprödigkeit des Materials als herausfordernd darstellt, wird zu Projektbeginn ein Prüfaufbau auf Basis einer Schälbelastung konstruiert und getestet (AP 1). Dabei wird der Magnet auf ein Rohr geklebt und mit Hilfe einer Zugprüfmaschine und einer als Haken geformten Zugeinheit abgeschält. Die Zugeinheit wird derart konstruiert, dass eine flächige Krafteinleitung erfolgt und es dadurch nicht zu einem Bruch des Magneten durch punktuelle Krafteinwirkungen kommt. Die Tests erfolgen mit einem zusammen mit dem PA ausgewählten Klebstoffsystem. Parallel werden im AP 2 die ausgewählten Magnettypen im Ausgangszustand chemisch, topographisch und im Hinblick auf die oberflächennahe Gefügestruktur eingehend analysiert. Die Erkenntnisse aus diesen Analysen und die daraus abgeleiteten Anforderungen an den Vorbehandlungsprozess dienen der Laserparameterentwicklung in AP 3. Zum Einsatz kommen kommerziell verfügbare Nah-IR-Laserquellen im ns- und fs-Bereich. Während ns-Pulse zu einem merklichen thermischen Eintrag führen können, kann ein fs-Laser für eine

nahezu temperaturlose Bearbeitung genutzt werden. Die Unterschiede in der Auswirkung auf eine zu verklebende Magnetoberfläche sind bisher nicht bekannt. Da sich Laser-Bearbeitungseffekte häufig nicht linear verhalten, erfolgt die Entwicklung mit den jeweiligen Laserquellen auf Basis eines teilfaktoriellen Versuchsplans mit zwei bis drei Iterationsstufen. In jeder Iterationsstufe werden die Rahmenbedingungen enger gesetzt, um ein möglichst genaues Bild der sinnvollen Parametergrenzen zu erhalten. Die Eingrenzung der Rahmenbedingungen erfolgt durch Klebversuche in AP 4 auf Basis der in AP 1 entwickelten Prüfvorrichtung im trockenen Zustand. Als Referenzen werden beschichtete Magnete genutzt, welche zwar aufwendiger in der Herstellung sind, im Betrieb jedoch eine deutlich höhere Klebbeständigkeit im Vergleich zu unbehandelten Magneten aufweisen. Die Analyse der Oberflächengüte nach dem Laserprozess in AP 5 erfolgt primär an in den Klebprüfungen auffälligen Prozessparametern mit den zuvor erwähnten Messmethoden. Nach erfolgreicher Parameterentwicklung werden in AP 6 ergänzende, anwendungsnahe Prüfungen (auch bei PA-Mitgliedern) u.a. nach einer Auslagerung, z.B., in einem Klimawechseltest, und Klebungen mit weiteren Klebstoffen durchgeführt. Auf diese Weise sollen die Grenzen der Laser-Vorbehandlung und des klebtechnischen Fügeprozesses genauer aufgezeigt werden. Alle Daten werden in AP 7 im Rahmen eines Merkblattes zusammengefasst, welches über einschlägige Journale verteilt und Gremien und Verbänden zur weiteren Verbreitung zur Verfügung gestellt wird.

4. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Es sind umfangreiche Maßnahmen zum Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft vorgesehen. Die praktische Umsetzbarkeit der Ergebnisse ist sowohl während der Projektlaufzeit als auch nach Projektabschluss aufgrund des starken Interesses der im projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Industrierepräsentanten, insbesondere auch aus dem KMU-Bereich, zu erwarten. Zusätzlich zu den ohnehin bestehenden Verpflichtungen über die Mitteilung der Forschungsergebnisse in Form des Abschlussberichts sowie von Publikationen in Fachzeitschriften ist ein Transfer der Ergebnisse in das Aus- und Weiterbildungsangebot sowie in die Beratungsdienstleistungen des Fraunhofer IFAM vorgesehen. Des Weiteren sind studentische Arbeiten auf dem Gebiet der Magnetklebungen vorgesehen, sodass Studierende projektrelevante Fertigkeiten und Methoden erlernen. Durch den Personaltransfer der am Projekt beteiligten Mitarbeiter wird eine unmittelbare Nutzung in den relevanten Industriezweigen ermöglicht. Die aus dem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse werden ferner durch die aktive Mitarbeit der Forschungsstellen auf Fachtagungen und Messen in die industrielle Praxis übertragen. Die erarbeiteten Erkenntnisse und Methoden finden Eingang in die Lehrveranstaltungen der beteiligten Professoren in den Bereichen Fügetechnik, Klebtechnik und Oberflächentechnik. Die Mitgliedschaft in Gremien des Deutschen Instituts für Normung (DIN) sichert die Nutzung der Ergebnisse in der Normungs- und Zulassungspraxis.

5. Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Die Projektergebnisse sollen KMU in die Lage versetzen, die Haftfestigkeit und die Langzeitstabilität von Magnetklebungen mit Hilfe einer umweltfreundlichen, automatisier- und fertigungsintegrierbaren Laservorbehandlung zu optimieren und so einen qualitätsgesicherten Fertigungsprozess realisieren zu können. Durch die Nutzung von alterungsstabilen Magnetklebungen können KMU potenziell Kosten für Reparaturen, Austausch von defekten Teilen und Garantieansprüche reduzieren. Produkte, die länger halten und weniger anfällig für Ausfälle sind, können die Gesamtbetriebskosten senken und die Rentabilität des Unternehmens steigern. Das aktuelle Bandagieren oder mechanische Verkleben von Magneten auf dem Rotor führt aufgrund der notwendigen Fertigungstoleranzen zu Limitierungen bei der geometrischen Auslegung der Elektromotoren und zu erhöhten Kosten bei der Fertigung. Je stärker die Klebung wird, desto mehr kann auf derart unterstützende Vorkehrungen verzichtet werden, was prinzipiell zu neuen Motorgenerationen führen kann. KMU, die über innovative Technologien und fortschrittliche Herstellungsmethoden verfügen, können sich damit einen Wettbewerbsvorteil verschaffen. Durch die Implementierung von Laservorbehandlungstechnologien können sie sich von Mitbewerbern abheben und ihre Marktposition stärken. Die Fähigkeit, Magnete mit alterungsstabilen Klebungen herzustellen, können KMUs ermöglichen, ihr Produktportfolio zu erweitern und neue Märkte zu erschließen. Sie können maßgeschneiderte Lösungen für verschiedene Anwendungen anbieten und Kundenbedürfnisse besser erfüllen. Darüber hinaus können alterungsstabile Klebungen die Lebensdauer von Produkten

verlängern und somit zur Reduzierung von Abfall und Ressourcenverbrauch beitragen. Dies entspricht den zunehmenden Anforderungen an Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit in vielen Branchen. Darüber hinaus wird die entwickelte Laservorbereitungsmethode das Potenzial haben, in verschiedenen Branchen eingesetzt zu werden, wo Magnetklebungen verwendet werden.

6. Projektvolumen / Personaleinsatz / Projektlaufzeit

Das vorgestellte Forschungsvorhaben wird vom Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen durchgeführt. Die zeitliche Abfolge der Arbeitsschritte ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Arbeitsplan.

		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
AP1	Voruntersuchungen Prüfvorrichtung	■	■						
AP2	Charakterisierung der Ausgangszustände der Magnete	■	■						
AP3	Lasere-Parameterentwicklung		■	■		■		■	
AP4	Klebprüfungen			■	■		■		■
AP5	Oberflächenanalyse			■	■		■		■
AP6	Weiterführende Prüfungen / Tests anderer Klebstoffsysteme.						■	■	■
AP7	Erstellung eines Merkblattes							■	■

Die Durchführung des Forschungsprojektes erfordert unter Bearbeitung durch einen wissenschaftlichen Mitarbeiter, Techniker und wissenschaftliche Hilfskräfte eine Projektlaufzeit von 24 Monaten. Zur Durchführung des Forschungsprojekts wird für wissenschaftliches und technisches Personal und für sonstige Ausgaben ein Aufwand von insgesamt 269.821,04 € veranschlagt.

7. Geplante Zusammensetzung des pbA

Die geplante Zusammensetzung des projektbegleitenden Ausschusses ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Geplante Zusammensetzung des projektbegleitenden Ausschusses.

Firma	kmU
Clean-Lasersysteme GmbH	Ja
3D-Micromac AG	Ja
DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA	Nein
SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG	Nein
AEM – Anhaltische Elektromotorenwerk	Ja
Fischer Elektromotoren GmbH	Ja
Elektromotoren und Gerätebau Barleben GmbH	Ja
Walter Perske GmbH	Ja
Kählig Antriebstechnik GmbH	Ja
Steinlen Elektromaschinenbau GmbH	Ja
WINKELMANN Elektromotoren GmbH Co. KG	Ja
CEDS DURADRIVE GmbH	Ja
Brose Fahrzeugteile GmbH & Co. Kommanditgesellschaft	Nein
ebm-papst St. Georgen GmbH & Co. KG	Nein
Lenze Operations GmbH	Nein
dormakaba Deutschland GmbH	Nein

8. Forschungsstelle

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)
Wiener Straße 12, 28359 Bremen

Projektleiter: Dr. Markus Veltrup, Dr. Thorsten Fladung, Dr. Shahram Nouri-Shirazi

Forschungsstellenleiter: Prof. Dr. Bernd Mayer

Genehmigt durch den FS-Leiter: Bremen, 11.04.2024