

FAT-Schriftenreihe 387

Recycling von Permanentmagneten und Bewertung der
Rezyklierbarkeit von Permanentmagnet-Synchronmotoren



Recycling von Permanentmagneten und Bewertung der Rezyklierbarkeit von Permanentmagnet- Synchronmotoren

Forschungsstelle

Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS

Autoren

Md Mahmudul Hasan, M. Sc.

Mario Schönfeldt, M. Eng.

Dipl.-Ing. Jürgen Gassmann

**Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung
Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.**

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | AUFGABENSTELLUNG | 3 |
| 1.1 | AP 1: Stand der Wissenschaft und Technik | 3 |
| 1.2 | AP 2: Bewertung von PMSM-Rotoren im Hinblick auf die Demontierbarkeit und Rezyklierbarkeit der Permanentmagnete | 4 |
| 1.3 | AP 3: Recycling von Nd-Fe-B- Permanentmagneten | 5 |
| 2 | VERSUCHSDURCHFÜHRUNG | 5 |
| 3 | ERGEBNISSE | 8 |
| 3.1 | AP 1: Stand der Wissenschaft und Technik | 8 |
| 3.1.1 | Nd-Fe-B-Magnete und ihre Anwendungen | 8 |
| 3.1.2 | Aktuelle und zukünftige Magnethersteller | 9 |
| 3.1.3 | Historische und prognostizierte Nachfrage nach Nd-Fe-B-Magneten | 10 |
| 3.1.4 | Strategien zur Verringerung der Kritikalität | 12 |
| 3.1.5 | Recyclingtechnologien für SE- Permanentmagnete | 12 |
| 3.1.6 | Ökobilanzstudien zu verschiedenen Recyclingtechnologien | 16 |
| 3.1.7 | Industrielles Magnetrecycling und aktueller Marktüberblick | 18 |
| 3.2 | AP 2: Bewertung von PMSM-Rotoren im Hinblick auf die Demontierbarkeit und Wiederverwertbarkeit der Permanentmagnete | 19 |
| 3.2.1 | Konstruktionsbedingte Einflüsse auf die thermische Entmagnetisierung von PMSM-Rotoren | 19 |
| 3.2.2 | Automatisierte Demontage von PMSM-Rotoren | 27 |
| 3.3 | AP 3: Recycling von Nd-Fe-B-Permanentmagneten | 29 |
| 3.3.1 | Recycling von konventionellen gesinterten Nd-Fe-B-Magneten | 29 |
| 3.3.2 | Recycling von GBDP Nd-Fe-B-Magneten | 36 |
| 4 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK | 42 |
| 5 | LITERATURVERZEICHNIS | 44 |

Die Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) (Auftraggeber) ist unter dem Dach des Verbandes der Automobilindustrie e.V. (VDA e.V.) ein Zusammenschluss von deutschen Pkw- und Nutzfahrzeugherstellern, zahlreichen Zulieferern und Anbietern von mobilitätsbezogenen Produkten und Dienstleistungen. Der Verband konzentriert sich auf die Durchführung vorwettbewerblicher und kooperativer Forschung mit dem Schwerpunkt, innovative Lösungen für eine umweltfreundliche, sichere und komfortable Mobilität der Zukunft zu entwickeln.

Ziel dieses Projektes ist die Evaluierung von Demontage- und Recyclingtechnologien für Rotoren aus Permanentmagnet-Synchronmotoren (PMSM), welche die als kritisch eingestuften Seltenerd-haltigen Nd-Fe-B Magnete enthalten. Der Einsatz recycelter Magnete kann dazu beitragen Versorgungsrisiken entlang der Lieferkette zu reduzieren, Rohstoffkosten zu senken und die Nachhaltigkeit des Produktes zu erhöhen. Die im Projekt erzielten Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse sollen bei der Entwicklung zukünftiger PMSM helfen die Nachhaltigkeit und Recyclingfähigkeit im Hinblick auf eine Kreislaufwirtschaft zu erhöhen.

Das Projekt gliedert sich in drei Arbeitspakete. In Arbeitspaket 1 (AP 1) wird eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Arbeitspaket 2 (AP 2) beinhaltet die Charakterisierung verschiedener PMSM-Rotoren im Hinblick auf ihre Demontierbarkeit und Recyclingfähigkeit. Arbeitspaket 3 (AP 3) schließlich konzentriert sich auf das pulvermetallurgische oder schmelzmetallurgische Recycling der Nd-Fe-B-Magnete aus AP 2 mit dem Ziel, recycelte Magnete mit vergleichbaren Eigenschaften herzustellen.

1.1 AP 1: Stand der Wissenschaft und Technik

In AP 1 wird eine systematische Durchsicht der Literatur, einschließlich wissenschaftlicher Veröffentlichungen, Konferenzbeiträge und Bücher, mit Schwerpunkt auf dem Recycling von Nd-Fe-B-Magneten durchgeführt. Im Vordergrund der Recherche stehen dabei:

- Eine Analyse verschiedener Recyclingverfahren und -methoden für Seltenerd-Permanentmagnete, wobei die jeweiligen Vor- und Nachteile untersucht werden
- Eine aktuelle Marktübersicht und Perspektive für das industrielle Magnetrecycling in Europa, die die gegenwärtige und prognostizierte Nachfrage nach Hochleistungsmagnetwerkstoffen, Preistrends, Magnethersteller und potenzielle Partner im Magnetrecyclingsektor umfasst
- Ein Überblick über Studien zur Ökobilanz (engl. life cycle assessment, LCA) für verschiedene Recyclingtechnologien, die deren Umweltauswirkungen und Nachhaltigkeit bewerten

Meilenstein 1: Die Literaturrecherche zu potenziellen Recyclingverfahren, der Ökobilanz verschiedener Recyclingtechnologien und der aktuellen Marktsituation sind abgeschlossen (M3, nach Projektbeginn).

1.2 AP 2: Bewertung von PMSM-Rotoren im Hinblick auf die Demontierbarkeit und Rezyklierbarkeit der Permanentmagnete

In diesem Arbeitspaket werden mehrere PMSM-Rotoren auf ihre Demontierbarkeit und die Rezyklierbarkeit der enthaltenen Magnete untersucht. Neben der Untersuchung konstruktionsbedingter Einflüsse zielt das Arbeitspaket darauf ab, den Grad der Demontage zu bestimmen, der für die Entwicklung eines automatisierten und kostengünstigen Recyclingprozesses notwendig ist.

AP 2.1: Konstruktionsbedingte Einflüsse auf die thermische Entmagnetisierung von PMSM-Rotoren

Im Gegensatz zu externen magnetischen Gegenfeldern ist die thermische Entmagnetisierung ein Verfahren, das für eine Vielzahl von Rotortypen, Konstruktionen, Geometrien und Größen anwendbar ist. Ziel ist die Entmagnetisierung der enthaltenen Magnete für nachfolgende Demontage- und Recyclingprozesse. Konstruktionsbedingte Einflüsse und die verwendeten Werkstoffe können diesen Prozess jedoch beeinträchtigen, z. B. durch Erhöhung der erforderlichen Temperaturen, was sich negativ auf die Konzentration von Verunreinigungen im Magnetmaterial und damit auf dessen Eigenschaften auswirken kann. In diesem Arbeitspaket werden konstruktionsbedingte Einflüsse, Beschichtungen und Verklebungen der Bleche über verschiedene Rotortypen hinweg untersucht. Der Schwerpunkt liegt dabei auf:

- Unterschiede hinsichtlich Recyclingfähigkeit industriell eingesetzter Klebstoffe (Temperaturbeständigkeit, Einfluss auf Verunreinigungsgehalt der Magnete)
- Einfluss unterschiedlicher Korrosionsbeschichtungen der Magnete auf die Rezyklierbarkeit, Verunreinigungsgehalte und -diffusionstiefe
- Einfluss der Rotorbauweise auf die notwendigen Temperaturen und die anschließende Demontierbarkeit

AP 2.2: Automatisierte Demontage von PMSM-Rotoren

Für das funktionale Recycling von Magneten unter Verwendung von Wasserstoff ist eine vollständige Demontage des Rotors aufgrund einer selektiven Reaktion der Materialien möglicherweise nicht erforderlich (Seltenerd-magnete verspröden zu einem groben Pulver, während Stahl nicht versprödet). Eine partielle Demontage könnte Zeit, Energie und Kosten sparen. In diesem Arbeitspaket wird untersucht, inwieweit verschiedene PMSM-Rotoren für ein kosteneffizientes und möglichst ressourcenschonendes Recycling demontiert werden müssen. Zu diesem Zweck werden unterschiedlich stark demontierte Rotoren mittels Wasserstoffversprödung prozessiert.

Meilenstein 2: Die Untersuchungen zur Rezyklierbarkeit verschiedener Rotortypen mit Schwerpunkt auf deren Eignung für die thermische Entmagnetisierung und die automatisierte Teildemontage sind abgeschlossen (M7, nach Projektbeginn).

1.3 AP 3: Recycling von Nd-Fe-B- Permanentmagneten

In diesem Arbeitspaket werden die Magnete eines Rotors von AP 2 pulvermetallurgisch recycelt. Ziel ist es, recycelte Magnete mit vergleichbaren Eigenschaften zu den Originalmagneten herzustellen.

Die folgenden Analysen werden an den primären und recycelten Magneten durchgeführt:

- Messung der magnetischen Eigenschaften mittels Permagraph; Bestimmung von Remanenz (B_r), Koerzitivfeldstärke (H_c) und Energiedichte ($(BH)_{max}$)
- Analyse der chemischen Zusammensetzung mittels optischer Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)
- Bestimmung von Verunreinigungen wie Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff und Kohlenstoff mit der Heißgasextraktionsmethode (O-N-H- und C-S-Analyse)
- Bestimmung der Dichte mit der Archimedes-Methode oder Helium-Pyknometrie
- Untersuchung der Korngröße, der Homogenität, der Selten-Erd-Verteilung und der Korngrenzphase mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Meilenstein 3: Recycelte Magnete mit vergleichbaren Eigenschaften wie die ursprünglichen Magnete eines Rotors aus AP 2 wurden hergestellt (M11, nach Projektbeginn).

2 Versuchsdurchführung

In Arbeitspaket 1 wurden Studien aus wissenschaftlichen Veröffentlichungen, Konferenzbeiträgen und Büchern zu verschiedenen Recyclingverfahren für Nd-Fe-B-Magnete, ihren Vor- und Nachteilen, ihrer Ökobilanzierung, dem aktuellen Marktüberblick und der Perspektive für das industrielle Magnetrecycling in Europa ausgewertet.

Für das Arbeitspaket 2 wurden sieben verschiedene Typen von PMSM-Rotoren, die von drei verschiedenen Projektpartnern der FAT geliefert wurden, hinsichtlich der Demontierbarkeit und Recyclingfähigkeit der enthaltenen Magnete untersucht. Zunächst wurde die Rotorwelle mit Hilfe eines Roboters mit einer Kraft zwischen 10 und 25 Tonnen herausgedrückt. Einige Magnete und eine geringe Menge Klebstoff, der zur Fixierung der Magnete in den Hohlräumen des Rotorblechpaketes verwendet wurde, wurden für erste Charakterisierungen manuell herausgelöst. Die Segmente des Rotorblechs wurden getrennt und einer Wärmebehandlung unterzogen, um die Magnete zu entmagnetisieren und den Klebstoff zu pyrolysieren. Die thermische Entmagnetisierung erfolgte in einem Kammerofen in einer Schutzgasatmosphäre mit einem konstanten Argon-Fluss von 40 l/min. In einigen Fällen wurde die Entmagnetisierung jedoch auch in einem Muffelofen unter Luft durchgeführt. Die Temperaturbeständigkeit der enthaltenen Klebstoffe wurde vorab mittels simultaner Thermischer Analyse (STA), d.h. Thermogravimetrie (TG) und dynamischer Differenzkalorimetrie (engl. differential scanning calorimetry DSC), bestimmt.

Mit einem Splintentreiber und einem Hammer wurden die Magnete aus den Taschen der Blechpakete herausgedrückt. In einigen Rotorsegmenten wurden die Magnete auch durch niederfrequente Schwingungen herausgelöst. Für ein automatisiertes Recyclingverfahren wurden die Rotorsegmente in einem HD-Autoklaven (FCT Anlagenbau GmbH) unter 3 bar Wasserstoffdruck bei 25 °C einer direkten Wasserstoffversprödung (engl. Hydrogen Decrepitation, HD) unterzogen. Es folgten eine 2-stündige Wärmebehandlung bei 500 °C und eine anschließende 3-stündige partielle Wasserstoffentfernung unter Vakuum. Schließlich wurden die Rotorsegmente unter Argon-Atmosphäre auf Raumtemperatur abgekühlt.

In Arbeitspaket 3 wurden die Primärmagnete und die aus den Rotoren gewonnenen Magnete pulvermetallurgisch zu recycelten Sintermagneten aufbereitet. Die optimierten recycelten Magnete wurden mit den folgenden Verfahren hergestellt:

- Die Oberflächenbeschichtung wurde durch Sandstrahlen entfernt und die Magnete wurden gebrochen, um die Magnetoberfläche freizulegen
- Die Magnete wurden unter 3 bar Wasserstoffdruck bei 25 °C versprödet, anschließend wurde der Wasserstoff 3 Stunden lang unter Vakuum bei 500 °C teilweise entfernt und dann unter Argon-Atmosphäre auf Raumtemperatur abgekühlt
- Die groben Pulver wurden anschließend mit einem 800-µm-Sieb gesiebt, um die restlichen Beschichtungselemente vom Nd-Fe-B-Pulver zu trennen
- Die gesiebten Pulver wurden unter Stickstoff mit einer Gegenstrahlmühle (engl. jet-mill) und einer Targetmühle auf eine Partikelgröße von etwa 5 bis 6 µm (d50-Wert) gemahlen
- Die feinen Pulver wurden in einer Transversalfeldpresse unter einem externen Magnetfeld von 2,5 T ausgerichtet und anschließend zu anisotropen Grünlingen gepresst
- Diese Grünlinge wurden in Molybdänboxen platziert und in Quarzglasröhren unter Vakuum (10^{-6} mbar) bei Temperaturen von 1050 °C bis 1120 °C gesintert, gefolgt von einem Niedertemperaturglühen bei 500 °C für 1 Stunde

Die allgemeinen Verfahrensschritte zur Herstellung gesinterner Nd-Fe-B-Magnete sind in **Abbildung 1** dargestellt.



Abbildung 1: Prozessschritte zur Herstellung von gesinterten Nd-Fe-B-Magneten über die Primärroute (links) und die Recyclingroute aus einem Elektromotor (rechts).

Die magnetischen Eigenschaften wurden mit Hilfe eines Hysteresegraphen (PERMAGRAPH C, Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH) bei Raumtemperatur und 120 °C bestimmt. Die chemische Zusammensetzung der Proben wurde mit Hilfe der optischen Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) (OPTIMA 8300 DV, PerkinElmer LAS (Germany) GmbH) analysiert. Verunreinigungen wie Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff wurden mit dem Heißgasextraktionsverfahren (LECO ONH-836-MC und CS-744-MHPC Analysator) gemessen. Die Dichte wurde mit einer analytischen Waage nach dem archimedischen Prinzip bestimmt. Die Partikelgrößenverteilung erfolgte mittels Laserbeugung (Mastersizer 3000, Malvern Instruments GmbH). Die mikrostrukturelle Analyse, einschließlich Korngröße, Homogenität des Gefüges, Verteilung der Seltenen Erden, Korngrenzen und Analyse der Beschichtung, wurde mit einem Carl Zeiss Cross Beam 540 Rasterelektronenmikroskop (REM) durchgeführt. Die Proben für die REM-Analyse des Querschnittes wurden mit einem Ionenstrahlätzsystem (Leica EM-TIC 3X) präpariert, wohingegen die Beschichtungen an der Oberfläche mittels fokussiertem Ionenstrahl (FIB, engl. Focus Ion Beam) präpariert wurden.

In diesem Projektbericht werden die wichtigsten Ergebnisse des Projektes vorgestellt. Weitere Ergebnisse wurden mittels PowerPoint-Präsentationen während der regelmäßigen Projekttreffen über MS Teams dem Auftraggeber zur Verfügung gestellt und im Detail diskutiert.

3.1 AP 1: Stand der Wissenschaft und Technik

3.1.1 Nd-Fe-B-Magnete und ihre Anwendungen

Nd-Fe-B-Magnete sind fortschrittliche Seltenerd-Dauermagnete, die aus Neodym, Eisen und Bor bestehen. Sie sind für ihre überragenden magnetischen Eigenschaften bekannt, die die anderer Magnettypen übertrifft (siehe **Abbildung 2**) und ermöglichen die Entwicklung kleinerer, effizienterer Konstruktionen für eine Vielzahl von Anwendungen. Ihre kompakten und dennoch starken Magnetfelder sind entscheidend für die Förderung technologischer Innovationen und die Verbesserung der Leistung in verschiedenen Sektoren (**Gutfleisch 2011**). Aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz werden diese Magnete häufig in Elektromotoren für Fahrzeuge und Generatoren von Windkraftanlagen eingesetzt. Darüber hinaus sind sie wesentliche Bestandteile von Datenspeichern, medizinischen Bildgebungssystemen wie MRT-Geräten und Unterhaltungselektronik wie Smartphones und Kopfhörern, was sie in der modernen Technologie unverzichtbar macht.

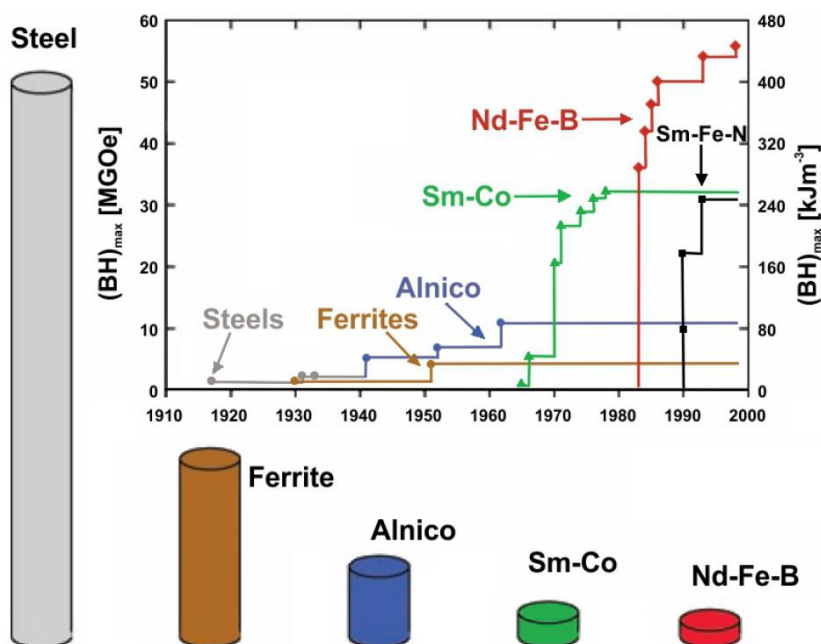


Abbildung 2: Entwicklung der Energiedichte (BH_{max}) für hartmagnetische Materialien im 20. Jahrhundert mit Darstellung des relativen Volumenanteils bei gleicher Energiedichte (**Gutfleisch 2011**).

3.1.2 Aktuelle und zukünftige Magnethersteller

Im Jahr 2019 belief sich die weltweite Produktion von Nd-Fe-B-Magneten auf etwa 130 Kilotonnen im Wert von 6,5 Milliarden Euro. China war für 94 % dieser Produktion verantwortlich, wobei 60 % der dafür notwendigen Seltenerdoxide ebenfalls aus chinesischen Minen stammten. Die globale Nd-Fe-B-Magnetindustrie wird von den größten Herstellern angeführt, die hauptsächlich in China ansässig sind, wie in **Tabelle 1** dargestellt.

Tabelle 1: Die größten globalen Nd-Fe-B-Hersteller und ihre Produktionskapazität in Kilotonnen pro Jahr (kt/a).

| Firmenname | Land | Kapazität (kt/a) |
|-----------------------------|-------------|------------------|
| Zhongke San Huan | China | 31,5 |
| JL Mag | China | 23 |
| Ningbo Yunsheng | China | 19 |
| Zhenghai Magnetic Materials | China | 18 |
| Hitachi Metals (Proterial) | Japan | 20 |
| Vacuumschmelze (and Neorem) | Deutschland | 5 |

Neben diesen Hauptakteuren tragen mehrere andere Unternehmen erheblich zur Gesamtproduktionskapazität bei. Zu den nennenswerten chinesischen Unternehmen gehören Tianhe Magnetic (10,5 kt/a), Yentai Shougang (9 kt/a) und Jingci Magnetic Materials (7,5 kt/a). Mittlere Hersteller wie Zhejiang Innuovo Magnetics (5,5 kt/a) und Beijing Sanjili New Materials (5 kt/a) spielen ebenfalls eine wichtige Rolle für den Fortbestand der Branche. Kleinere Unternehmen wie Anhui Baosteel Rare Earth Permanent Magnetic Alloy Industry (Earth Panda) und Antai Technology tragen zur weiteren Diversifizierung der Landschaft bei. Außerhalb Chinas tragen die japanischen Unternehmen Shin-Etsu Chemical und TDK mit einer Kapazität von jeweils 5 kt/a erheblich zum weltweiten Angebot bei. Zusätzliche Unterstützung kommt von den Betrieben von Shin-Etsu in Vietnam (2 kt/a) und Neo Performance Materials in Thailand (1,8 kt/a), die die Präsenz der Branche in ganz Asien erweitern.

Wie oben beschrieben, befindet sich die Mehrheit der Magnethersteller in China. Im Jahr 2019 wurden in Europa nur etwa 1 kt Dauermagnete produziert und um die Nachfrage zu decken, mussten etwa 16 kt aus China importiert werden (**Gauss 2021**). Um die Abhängigkeit von einem einzigen Land zu minimieren, haben einige Marktteilnehmer daher ein Geschäftsmodell entwickelt, um Permanentmagnete in Europa und Nord-/Mittelamerika herzustellen. **Tabelle 2** gibt einen Überblick über die Newcomer im Bereich der Produktion von Seltenerdsmagneten.

Tabelle 2: Übersicht über die bekannten Newcomer aus Europa und Nord-/Mittelamerika im Bereich der Produktion von Seltenerdsmagneten.

| Firmenname | Land | Produkt | Anfangsdatum | Kapazität (kt/a) |
|---------------------------|---------|---------|--------------|------------------|
| Neo Performance Materials | Estland | Magnet | 2025 | 2-5 |
| GKN Powder Metallurgy | USA/EU | Magnet | 2026 | 4 |
| Vacuumschmelze | USA | Magnet | 2025 | 2 |
| MP Materials | USA | Magnet | 2023 | 1 |
| NOVEON | USA | Magnet | 2022 | 2 |

Neben diesen Herstellern entstehen in Nordamerika und Europa weitere Unternehmen im Bereich der Produktion von Seltenerdsmagneten. USA Rare Earth plant die Aufnahme der Produktion im Jahr 2024, mit einer Kapazität von 1,2 bis 4,8 kt/a. JL Mag in Mexiko wird ebenfalls in den Markt eintreten, wobei der Starttermin noch nicht feststeht, und strebt eine Kapazität von 3 kt/a an.

Weitere Unternehmen, die sich auf die Produktion von Vorstufen konzentrieren, sind Solvay (Frankreich) mit einer erwarteten Kapazität von 10 bis 15 kt/a und REEtec (Norwegen), das 2024 mit einer Kapazität von 0,7 kt/a beginnen will. Lynas Rare Earth (USA) strebt eine Kapazität von 5 kt/a an, während andere Unternehmen wie Element US-Minerals, Rare Earth Salts, Cyclic Materials und Geomega Resources Inc. sich noch in der Anfangsphase ihrer Geschäftstätigkeit befinden, wobei Einzelheiten zu Startterminen und Kapazitäten noch festgelegt werden müssen. Die Canada Rare Earth Corp. befindet sich ebenfalls im Aufbau, aber genaue Einzelheiten zu ihren Aktivitäten sind noch nicht bekannt. Diese neuen Unternehmen stellen eine vielversprechende Veränderung auf dem Markt für Seltenerdsmagnete dar und tragen zu einer stabileren Lieferkette bei.

3.1.3 Historische und prognostizierte Nachfrage nach Nd-Fe-B-Magneten

Die für das kommende Jahrzehnt prognostizierte Nachfrage nach Seltenen Erden wird vor allem durch den Ausbau der Elektromobilität und die zunehmende Verwendung in den Antriebssträngen von Elektrofahrzeugen getrieben.

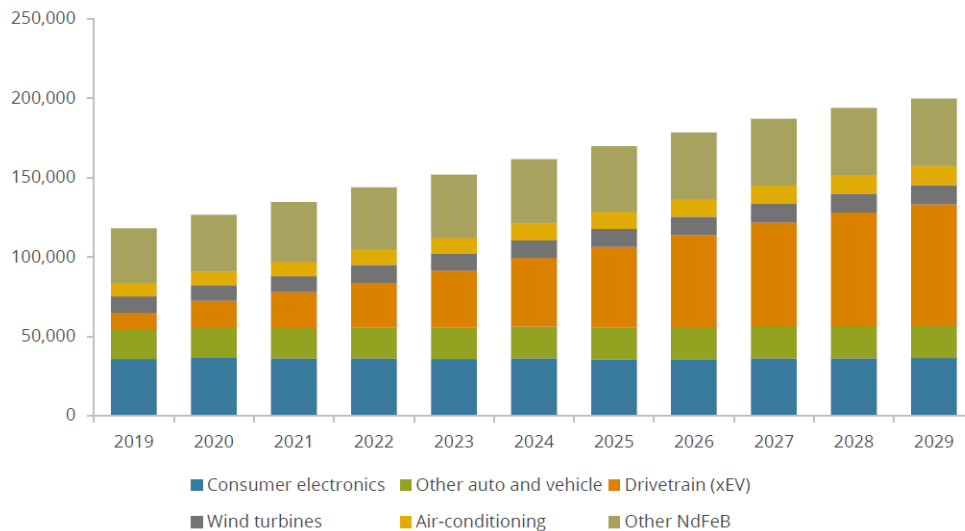


Abbildung 3: Prognostizierte weltweite Nachfrage nach Nd-Fe-B-Magneten von 2019 bis 2029, in Tonnen und kategorisiert nach Anwendung (Roskill 2019).

Wie in **Abbildung 3** dargestellt, wird die Nachfrage nach Nd-Fe-B-Magneten in der Unterhaltungselektronik und anderen Anwendungen bis 2029 voraussichtlich leicht zurückgehen. Im Gegensatz dazu wird die Nachfrage nach Nd-Fe-B-Magneten in Antriebssträngen für Elektrofahrzeuge voraussichtlich deutlich ansteigen. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Nachfrage nach Seltenerdoxid (SEO) für Nd-Fe-B-Magnete im Jahr 2035 findet sich in **Tabelle 3**, die batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge (engl. batterie electric vehicle, BEV), Plug-in-Hybride und Hybridfahrzeuge umfasst. Insgesamt wird erwartet, dass die Gesamtnachfrage nach Nd-Fe-B-Magneten in Elektrofahrzeugen von 2022 bis 2035 um das Sechsfache ansteigen wird (Adamas 2022).

Tabelle 3: SE-Oxid- und Nd-Fe-B-Bedarf für verschiedene Fahrzeugtypen der Elektromobilität in den Jahren 2022 und 2035 (Adamas 2022).

| Typ | Jahr | Nachfrage in Tonnen | |
|----------------|------|--------------------------|-----------------|
| | | SE-Oxid (Nd, Pr, Dy, Tb) | Nd-Fe-B-Magnete |
| BEV | 2022 | 5.636 | 12.389 |
| | 2035 | 40.135 | 88.180 |
| Plug-in Hybrid | 2022 | 1.807 | 3.972 |
| | 2035 | 8.956 | 19.676 |
| Hybrid | 2022 | 2.043 | 4.486 |
| | 2035 | 6.009 | 13.186 |
| Gesamt | 2022 | 9.486 | 20.847 |
| | 2035 | 55.100 | 121.042 |

Adamas Intelligence prognostiziert ab 2022 erhebliche Engpässe bei Nd-Fe-B-Legierungen und -Pulver, die für High-Tech-Anwendungen von entscheidender Bedeutung sind, da nicht genügend Seltene Erden zur Verfügung stehen. Bis 2030 wird das weltweite Defizit voraussichtlich 66.000 Tonnen pro Jahr erreichen und bis 2035 auf 206.000 Tonnen ansteigen - fast so viel wie die Gesamtproduktion des letzten Jahres (**Adamas 2022**).

3.1.4 Strategien zur Verringerung der Kritikalität

Da sich bestätigt hat, dass die künftige Nachfrage nach Seltenen Erden zu einem Defizit zwischen Angebot und Nachfrage führen könnte, sind neue Strategien erforderlich, um das Gleichgewicht zwischen Produktion und Nachfrage herzustellen. Um die Versorgung mit Seltenerdmetallen weniger kritisch zu gestalten, könnten die folgenden drei Strategien hilfreich sein:

1. Substitution von kritischen Elementen oder Legierungen
 - Nutzung von weniger kritischen Seltenen Erden, von denen es einen Überschuss auf dem Markt gibt wie Lanthan und Cer
 - Stabilisierung von alternativen Legierungen in Magneten, um die Abhängigkeit von kritischen Elementen zu verringern
2. Erkundung alternativer Quellen für Seltene Erden
 - Investitionen in den Bergbau, um neue Quellen für Seltene Erden zu entdecken
 - Gewinnung von Seltenen Erden als Nebenprodukt anderer Bergbauaktivitäten, um die Versorgungsquellen zu diversifizieren
3. Recycling oder Wiederverwendung von Altprodukten und Magneten
 - Fokus auf das Recycling von Schrott und ausgedienten Magneten, um Magnete zu reproduzieren oder wertvolle Seltene Erden zurückzugewinnen
 - Entwicklung von Anwendungen für recycelte Magnete, um eine effiziente Nutzung der zurückgewonnenen Materialien zu gewährleisten

3.1.5 Recyclingtechnologien für SE- Permanentmagnete

Als Reaktion auf das schwindende Rohstoffangebot und die Auswirkungen der Selten-Erd-Krise im Jahr 2011 wurden in den letzten Jahren verschiedene Technologien und Verfahren für das Recycling von Dauermagneten auf Basis Seltener Erden, insbesondere Nd-Fe-B, entwickelt. Im Allgemeinen können diese Verfahren in drei Gruppen eingeteilt werden:

- Wiederverwendung (engl. re-use)
- Funktionales Recycling (direktes Recycling, Magnet-zu-Magnet-Recycling, short-loop Recycling)
- Elementares Recycling (indirektes Recycling, long-loop Recycling)

Jede Gruppe hat unterschiedliche Vor- und Nachteile sowie Anwendungsbereiche. Sie unterscheiden sich in Bezug auf die erreichbaren Eigenschaften, die Nachhaltigkeit und die Kosten. Während das funktionale Recycling durch einen geringeren Energie- und Materialverbrauch mit Nachhaltigkeit und Kosteneinsparungen punktet, ermöglicht das elementare

Recycling die Rückgewinnung der ursprünglichen Elemente. Dennoch haben beide Recyclingverfahren das Potenzial, die Herstellungskosten im Vergleich zu Primärmagneten zu senken (**Schönfeldt 2023**).

Re-Use: Die Wiederverwendung von Nd-Fe-B-Magneten könnte die wirtschaftlichste und wirksamste Strategie zur Verbesserung der Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz sein. Das Verfahren umfasst die Demontage und Extraktion von Magneten aus ausgedienten elektronischen Geräten oder Industrieanlagen. Nach der Rückgewinnung können diese Magnete gereinigt und für die Wiederverwendung in neuen Anwendungen wiederaufbereitet werden. Dieser Ansatz ist jedoch auf große, leicht zugängliche Magnetanwendungen beschränkt (Elektromotoren, Windturbinen usw.).

Funktionales Recycling / Magnet-zu-Magnet-Recycling: Beim funktionalen Recycling werden gebrauchte oder End-of-Life (EoL) Nd-Fe-B-Magnete als komplette Einheit verarbeitet, d.h. die gesamte Legierung wird wiederverwendet, ohne die einzelnen Elemente zu trennen. Die daraus resultierenden recycelten Magnete weisen eine ähnliche Zusammensetzung und ähnliche Eigenschaften auf wie die ursprünglichen Magnete. Dieser Ansatz bietet mehrere Vorteile, darunter eine hohe Nachhaltigkeit, einen geringeren Energie- und Materialverbrauch und niedrigere Kosten (**Diehl 2018**). Darüber hinaus fügt sich das funktionale Recycling nahtlos in die primären Produktionsprozesse ein, da die beteiligten Schritte denen der ursprünglichen Herstellung von Magneten ähneln (siehe **Abbildung 1**).

Der Recyclingprozess beginnt mit dem zweiten Schritt der Prozesskette, der **Wasserstoffversprödung**, wobei das für die Primärproduktion notwendige Bandgießen (engl. Strip-Casting) umgangen werden kann. EoL-Magnete werden zunächst unter Wasserstoff versprödet, wodurch ein grobes Pulver mit einer Partikelgröße von $d_{50} > 120 \mu\text{m}$ entsteht. Der Wasserstoff reagiert mit der an Seltenen Erden reichen intergranularen Phase, die die ferromagnetischen $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Körner umgibt, und bildet Nd-Hydride, die das Material entlang der Korngrenzen aufbrechen. Dieses grobe Pulver wird anschließend in einer Strahlmühle zu einem feinen Pulver mit einer Partikelgröße von d_{50} zwischen 3 und $6 \mu\text{m}$ gemahlen. Die feinen Pulverteilchen werden in einem externen Magnetfeld ausgerichtet, zu Grünkörpern gepresst und bei Temperaturen zwischen $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ und $1120 \text{ }^\circ\text{C}$ gesintert, um vollständig dichte Körper zu erzeugen. Nach dem Sintern werden die Magnete gegläht, in ihre endgültige Form geschnitten, mit einer korrosionsbeständigen Schicht überzogen und magnetisiert. Alle diese Prozesse, mit Ausnahme der abschließenden Endbearbeitung, werden unter Vakuum oder Inertgasatmosphäre durchgeführt, um eine Oxidation des Materials zu verhindern.

Direkte Recyclingverfahren können mit verschiedenen Techniken durchgeführt werden, darunter:

- Erneutem Sintern / Wasserstoffversprödung (engl. Hydrogen Decrepitation, HD)
- Umschmelzen (Umgießen)
- Schmelzspinnen (engl. melt-spinning)

Unter den verschiedenen Methoden ist die Wasserstoffroute die effektivste in Bezug auf die Nachhaltigkeit und ein weit verbreitetes Verfahren. Allerdings erfordert dieses Verfahren relativ saubere Ausgangsmaterialien mit einem geringen Anteil an Verunreinigungen. Oxidierte Altmagnete hingegen können mittels **Umschmelzens** recycelt werden. Bei diesem Verfahren werden Verunreinigungen durch Schlackenbildung während des Schmelzens entfernt, wodurch der Sauerstoffgehalt im Gussmaterial von 0,2 - 0,5 % auf 0,03 - 0,07 % reduziert wird (Yang 2017). Allerdings kann dieses Verfahren mit relativ hohen Materialverlusten von bis zu 30 % verbunden sein und erfordert im Vergleich zu wasserstoffbasierten Verfahren mehr Energie.

Das **Schmelzspinnen** ist ein weiteres Verfahren, mit dem gesinterte Magnete in nanokristallines Material umgeschmolzen werden können, das dann zu recycelten kunststoffgebundenen Magneten oder heißumgeformten Magneten weiterverarbeitet werden kann. Bei diesem Verfahren werden die gebrauchten Magnete induktiv aufgeschmolzen und unter Argon-Druck auf ein schnell rotierendes Metallrad gegossen, wo sie zu nanokristallinen Plättchen (engl. flakes) erstarren.

Indirektes / elementares Recycling: Direkte Recyclingverfahren sind in der Regel am wirtschaftlichsten, wenn sie für großtechnische Anwendungen und Komponenten eingesetzt werden, wie z.B. in Windturbinengeneratoren oder Traktionsmotoren. Indirekte Recyclingverfahren könnten jedoch für kleinere Anwendungen vorteilhaft sein, z.B. für Unterhaltungselektronik oder für geschredderte Stoffströme. Diese Verfahren erfordern jedoch zusätzliche Schritte, um wirtschaftlich effizient zu sein. Sie erfordern insbesondere eine effektive Vorsortierung, Trennung und Konzentration der Materialien, um sicherzustellen, dass der Recyclingprozess kosteneffektiv und effizient bleibt. Indirekte Recyclingverfahren für Nd-Fe-B-Magnete umfassen mehrere Techniken:

Hydrometallurgische Verfahren: Bei dieser Methode werden wässrige Lösungen verwendet, um Seltene Erden (SE) selektiv aus den Magnetmaterialien zu lösen und zu extrahieren. Für Nd-Fe-B-Magnete sind sowohl ein selektives Auslaugungsverfahren als auch ein vollständiges Auslaugungsverfahren möglich. Für die selektive Laugung sind jedoch viele Vorbehandlungsprozesse (wie Rösten und elektrochemische Laugung) erforderlich, um die Selektivität und Effizienz des Prozesses zu verbessern. Die Abtrennung der Seltenen Erden oder ihrer Oxide aus den Laugungslösungen erfolgt durch ein Fällungsverfahren, ein Lösungsmittlextraktionsverfahren oder ein Verfahren zur Extraktion mit ionischen Flüssigkeiten. Sie unterscheiden sich auch in Bezug auf die Prozessparameter, die Endprodukte und die Rückgewinnungsrate. Das größte Manko dieses Verfahrens ist die unzureichende Abtrennungseffizienz und es lässt sich kaum vermeiden, dass unerwünschte Elemente in die Lösung gelangen. **Abbildung 4** zeigt beispielhaft einen solchen Prozess.

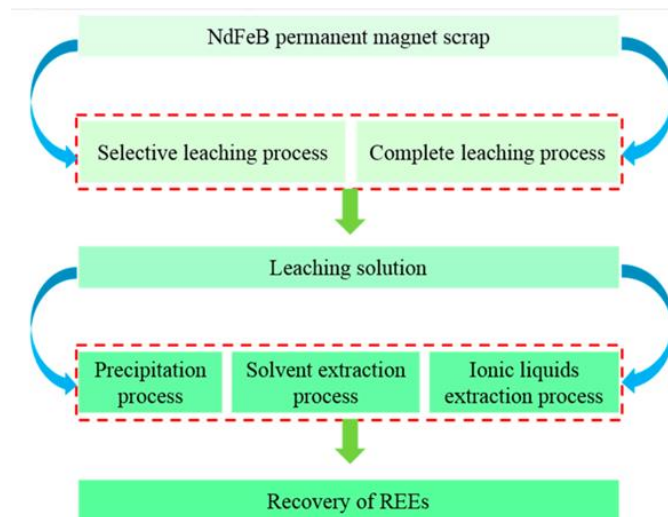


Abbildung 4: Schematische Darstellung typischer hydrometallurgischer Prozesse für Nd-Fe-B-Magnete (Zhang 2020).

Pyrometallurgische Verfahren: Pyrometallurgische Verfahren bieten eine wertvolle Alternative zum hydrometallurgischen Prozess, da es den Wasserverbrauch reduziert und die Entstehung von gefährlichen Abfällen minimiert. Bei dieser Methode werden die Seltenen Erden in ihrer metallischen Form gewonnen. Beim pyrometallurgischen Prozess wird das Material bei hohen Temperaturen, etwa 1000 °C, an Luft oxidiert. Anschließend wird das oxidierte Material einer karbothermischen Reduktion unterzogen, bei der es in eine metallische Phase und eine an SE_2O_3 reiche Rückstandsphase getrennt wird (Xiao 2023). Es gibt zwei wesentliche pyrometallurgische Verfahren:

Metallurgische Prozesse mit reaktiven Flüssigmetallen: Bei diesem Ansatz werden Metalle wie Magnesium (Mg) oder Silber (Ag) bei hohen Temperaturen mit SE umgesetzt, um schnell intermetallische Verbindungen zu bilden.

Elektrolytische Prozesse in geschmolzenen Chloriden: Bei dieser Methode werden geschmolzene Chlorid-Salze verwendet und Neodym aus Nd-Fe-B-Magneten selektiv ionisiert. Ein Nachteil der pyrometallurgischen Verfahren ist, dass sie eine ausreichend hohe Konzentration an SE-Schrott erfordern, um wirtschaftlich rentabel zu sein.

Elektrochemische Verfahren: Bei diesen Verfahren werden elektrische Ströme eingesetzt, um die Extraktion und Abtrennung der Seltenen Erden aus den Magnetmaterialien zu erleichtern. Dieses Verfahren kann auf spezifische Anwendungen zugeschnitten werden und ist für die Verarbeitung kleinerer, komplexer Materialströme von Vorteil.

Biotechnologische Ansätze: Neuere Methoden verwenden biologische Agenzien wie Bakterien oder Pilze, um wertvolle Seltene Erden aus Abfallmagneten herauszulösen. Dieser innovative Ansatz bietet eine potenziell umweltfreundlichere Alternative zu herkömmlichen Recyclingmethoden.

Tabelle 4 stellt die unterschiedlichen Recyclingansätze mit ihren Vor- und Nachteilen gegenüber.

Tabelle 4: Vergleich der Vor- und Nachteile von direkten und indirekten Recyclingverfahren (Binnemans 2013).

| Methoden | Vorteile | Nachteile |
|------------------------------------|--|---|
| Re-Use | <ul style="list-style-type: none"> • Am wirtschaftlichsten • Wenig Abfall • Höchste GWP (Global Warming Potential) - Einsparung | <ul style="list-style-type: none"> • Nur bei großen, leicht zugänglichen Magneten möglich • Manuelle Demontage und Reinigung erforderlich |
| Direktes / Funktionales Recycling | <ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Energieverbrauch • Geringe Produktion von Abfällen • Weniger Prozessschritte und niedrigere Kosten als bei indirekten Verfahren • Nachhaltiger und mit Primärproduktion kombinierbar • Hohes GWP-Einsparungspotenzial | <ul style="list-style-type: none"> • Nicht geeignet für Abfallströme mit unterschiedlichen Zusammensetzungen • Relativ reine Stoffströme und saubere Trennung sind notwendig • Nicht geeignet für stark oxidierte Magnete |
| Indirektes / Elementares Recycling | <ul style="list-style-type: none"> • Hochwertiges und flexibles Produkt • Resistent gegen Verschmutzung, Alterung und Materialmischungen • Gleiche Prozessschritte wie bei der Trennung von SE-Erzen | <ul style="list-style-type: none"> • Viele Prozessschritte und höherer Energieverbrauch als bei direkten Verfahren • Große Mengen an Chemikalien erforderlich • Große Mengen an Abwässern • Geringeres GWP-Einsparpotenzial |

3.1.6 Ökobilanzstudien zu verschiedenen Recyclingtechnologien

Bei der Analyse des CO₂-Fußabdruckes (CO₂-Äquivalent) von Dauermagneten verwenden Ökobilanzstudien in der Regel 1 kg des Magneten als Bezugseinheit. Bei Nd-Fe-B-Magneten entstehen etwa 47 % der CO₂-Emissionen zu einem frühen Zeitpunkt in der Wertschöpfungskette, nämlich vor der Lösungsmittelextraktion, wenn das Material noch ein Gemisch aus Seltenerdmetallen ist. Die Lösungsmittelextraktion allein ist für 27 % der Emissionen verantwortlich, während die Elektrolyse weitere 5 % beiträgt. Somit entstehen 79 % der CO₂-Emissionen bei der Bereitstellung der SE-Metalle vor der eigentlichen Magnetproduktion (Arshi 2018).

Die Herstellung des Magneten selbst ist für die verbleibenden 21 % der CO₂-Emissionen verantwortlich, wobei der Bandgießprozess der Hauptverursacher ist (siehe **Abbildung 5**).

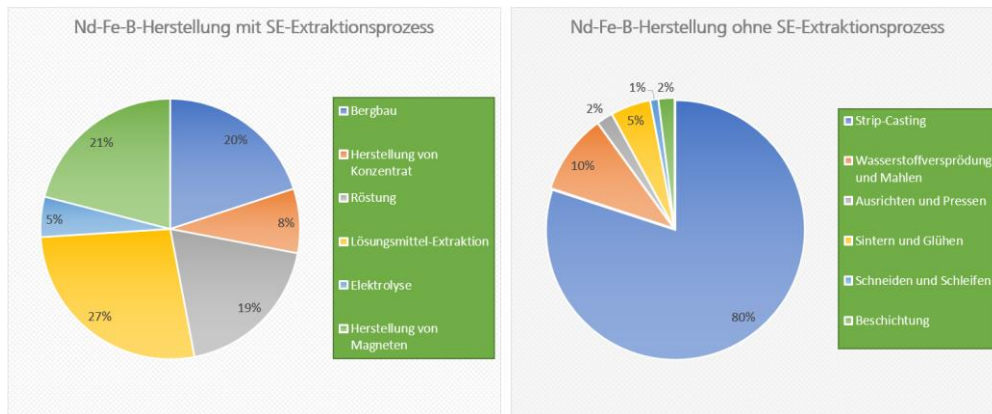


Abbildung 5: Ungefähre prozentuale Verteilung der CO₂-Emissionen im gesamten Nd-Fe-B-Magnetproduktionsprozess, von der Gewinnung der Seltenen Erden bis zum endgültigen Magneten (links). Ungefähre prozentuale Verteilung der CO₂-Emissionen speziell innerhalb der Nd-Fe-B-Magnet-Produktionsphase (rechts) (Arshi 2018, Jin 2018).

Im Falle des Recyclings, insbesondere des funktionalen Recyclings mit anschließender Wasserstoffroute, beginnen die Prozessschritte mit der Wasserstoffversprödung, wobei die CO₂-intensivsten Schritte der Rohstoffgewinnung und des Bandgießens nicht notwendig sind. **Tabelle 5** vergleicht das Treibhauspotenzial (engl. Global Warming Potential, GWP) unterschiedlicher Ökobilanz-Studien.

Tabelle 5: Zusammenfassung des GWP aus verschiedenen LCA-Studien über die Primärproduktion und den Recyclingprozess von Nd-Fe-B-Magneten.

| Quelle | Recyclingprozess | Primär (kg CO ₂ -Äq.) | Recycelt (kg CO ₂ -Äq.) | Re-Use (kg CO ₂ -Äq.) |
|------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Walachowicz 2014 | Funktional (70/30) | 219 | 178 | 1,65 |
| Jin 2016 | Funktional | 27,6 | 12,5 | - |
| Jin 2018 | Funktional | 130 | 25 | - |
| Amato 2019 | Elementar | 37 | 6 | - |
| Zapp 2022 | Bergbau 1 kg Nd | 61 - 115 | - | - |

Die LCA-Studie von Jin unterstreicht den erheblichen Umweltvorteil des funktionalen Recyclings gegenüber der Primärproduktion mit einer GWP-Reduzierung von 130 kg CO₂-Äq. für Primärmagnete auf 25 kg CO₂-Äq. für recycelte Magnete, was eine Einsparung von über 80 % an CO₂-Äquivalentemissionen bedeutet (Jin 2018). Die Studie von Sprecher bestätigt dies mit einem ähnlichen Recyclingprozess und zeigt eine Reduzierung um 87 % des GWP, obwohl ihre Berechnungen leicht variieren, wobei die Primärproduktion bei 27 kg CO₂-Äq. und das Recycling bei 3,3 kg CO₂-Äq. liegt (Sprecher 2014). Im Gegensatz dazu bietet das in der Studie von Walachowicz beschriebene funktionale Recycling eine geringere GWP-Einsparung von etwa 18 %, da es zu 70 % aus Primärrohstoffen besteht (Walachowicz 2014). Darüber hinaus zeigt. Insgesamt weist das funktionale Recycling im Vergleich zur Primärproduktion

und zu anderen Recyclingmethoden durchweg die größten Umweltvorteile auf (Jin 2016; Jin 2018; Sprecher 2014; Walachowicz 2014; Amato 2019).

3.1.7 Industrielles Magnetrecycling und aktueller Marktüberblick

Das industrielle Recycling von Magnetwerkstoffen ist dank der jüngsten technologischen Fortschritte auf dem Vormarsch, wobei in den letzten zwei Jahren mehrere neue Unternehmen in diesen Bereich eingestiegen sind. Trotz dieses Fortschritts ist das Recycling in großem Maßstab aufgrund der niedrigen Preise für Primärmagnete und der unzureichenden Materialströme nach wie vor begrenzt. Derzeit werden die meisten Magnete zusammen mit elektronischen Geräten geschreddert, was dazu führt, dass sie bei der Rückgewinnung von Primärmetallen verloren gehen (Yue 2019). Um das Recycling wirtschaftlich tragfähig zu machen, müssen Herausforderungen wie das effiziente Sammeln gebrauchter Magnete und die Entwicklung automatisierter Demontage- und Trennverfahren für verschiedene Materialströme (z.B. Generatoren, Motoren, Festplattenlaufwerke) angegangen werden. Der Sektor des Magnetrecyclings entwickelt sich rasch weiter und umfasst mehrere innovative Unternehmen (Tabelle 6). Die RockLink GmbH gewinnt Seltene Erden aus Altmagneten durch pyrometallurgische Verfahren zurück. Heraeus Remloy GmbH, ein im Jahr 2023 gegründetes Unternehmen, konzentriert sich auf das Recycling von Vorprodukten und die Herstellung fortschrittlicher nanokristalliner Legierungen. MagREESource produziert Seltene-Erd-Pulver durch die Wasserstoffbehandlung alter Magnete, während HyProMag Nd-Fe-B-Magnete direkt mit Wasserstoff recycelt. Darüber hinaus setzt Noveon Magnetics Inc. Wasserstoff für das direkte Recycling von Magneten ein und verbessert so die nachhaltige Rückgewinnung wertvoller Materialien in dieser sich entwickelnden Branche.

Tabelle 6: Liste einiger Unternehmen und Neugründungen auf dem Gebiet des Recyclings magnetischer Materialien.

| Firmenname | Land | Gegründet |
|------------------------|--------------------------------|--|
| Heraeus Remloy GmbH | Deutschland | 2021 |
| MagREESource | Frankreich | 2020 |
| Cyclic Materials Inc. | Kanada | 2022 |
| RockLink GmbH | Deutschland | 2004, seit 2018 Rücknahmesystem Magcycle |
| HyProMag Ltd. & GmbH | Großbritannien und Deutschland | 2018 (Ltd.) und 2021 (GmbH) |
| REECycle Inc. | USA | 2012 |
| Noveon Magnetics Inc. | USA | 2012 |
| Geomega Resources Inc. | Kanada | 2009 |

3.2 AP 2: Bewertung von PMSM-Rotoren im Hinblick auf die Demontierbarkeit und Wiederverwertbarkeit der Permanentmagnete

Ergebnisse

Sieben verschiedene Typen von PMSM-Rotoren, die in **Abbildung 6** dargestellt sind, wurden auf ihren konstruktionsbedingten Einfluss auf die Rezyklierbarkeit untersucht. Ebenfalls wurde der Demontage-Grad ermittelt, der für die Entwicklung eines automatisierten Recyclingprozesses erforderlich ist.

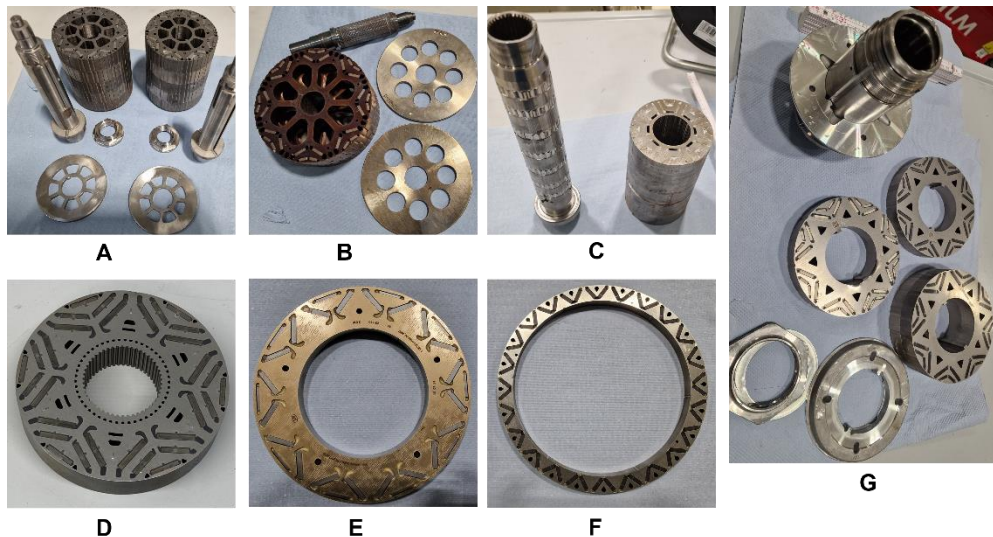
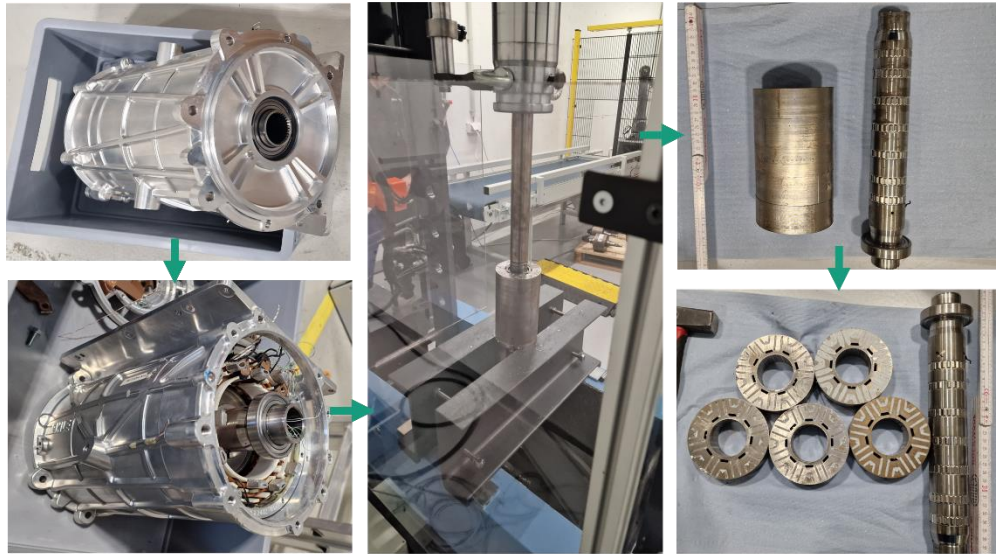


Abbildung 6: Sieben verschiedene Rotortypen von verschiedenen Projektpartnern mit Variationen in Design und Dimension.

3.2.1 Konstruktionsbedingte Einflüsse auf die thermische Entmagnetisierung von PMSM-Rotoren

Bei Permanentmagnet-Synchronmotoren befinden sich die Magnete in Hohlräumen innerhalb des Rotorblechs und sind in der Regel durch Klebeverbindungen fixiert. Bei der Demontage des kompletten Motors wird zunächst der Deckel manuell entfernt. Anschließend wird die Welle mittels einer Roboterpresse, die eine Kraft von 10 bis 20 Tonnen aufbringt, aus dem gesamten Rotor ausgepresst. Nun werden die Rotorscheiben oder Blechpakete getrennt, entweder mit oder ohne Anwendung von Schlagkraft. **Abbildung 7** zeigt die Schritte zur Trennung der einzelnen Blechpakete. Um die Zersetzungstemperatur des enthaltenen Klebstoffs und die Eigenschaften der Magnete vor der thermischen Behandlung zu beurteilen, wurden mehrere Magnete und eine kleine Menge Klebstoff für die Analyse separiert.



Ergebnisse

Rotor C

Abbildung 7: Vereinzelung der einzelnen Blechpakete durch Entnahme des kompletten Rotors aus dem Motor und Herausdrücken der Rotorkernwelle aus dem Rotor mittels Pressroboter.

Von den sieben Rotortypen verwenden die Typen A und B nur eine geringe Menge an Klebstoff, der ausreicht um die Magnete in ihren Taschen zu befestigen. Im Gegensatz dazu, wird bei den anderen Typen Klebstoff sowohl zur Befestigung der Magnete als auch zum Füllen von Lücken in den Hohlräumen verwendet. Um die Magnete zu entmagnetisieren und den Klebstoff zu zersetzen, wurden die Rotoren 30 Minuten lang unter einer inerten Atmosphäre (mit einem konstanten Argon-Fluss von 40 l/min) über die Curie-Temperatur der Seltenerd-magnete auf 410 °C erhitzt. Anschließend wurden die Magnete durch mechanisches Schlagen oder Pressen aus den Rotorsegmenten herausgelöst.

Bei Rotoren mit geringem und leicht zersetzbarem Klebstoff (Typen A, B, D, E und F) lassen sich die Magnete leicht mit einer geringen Druckkraft, z.B. mit einem Hammer und einem Splintentreiber, oder sogar durch niederfrequente Vibrationen herauslösen (vgl. **Abbildung 8**). Bei Rotoren mit einem höheren Anteil an hochtemperaturbeständigem Klebstoff (Typen C und G) war die Extraktion bei gleicher Wärmebehandlungstemperatur jedoch nicht erfolgreich. Die Rotoren wurden anschließend auf höhere Temperaturen mit längerer Haltezeit erhitzt, um den Klebstoff auszubrennen. Trotz einer 2-stündigen Erwärmung auf 600 °C wurde keine vollständige Entfernung des Klebstoffs erreicht. Folglich erwies sich die Extraktion von Magneten aus diesen Rotoren als schwieriger als bei Rotoren mit vollständig zersetzbarem Klebstoff bei niedrigen Temperaturen, wie beispielsweise bei Rotor F. Außerdem werden die Magnete durch die Hochtemperaturbehandlungen mechanisch geschädigt und weisen einen erhöhten Gehalt an Verunreinigungen auf.

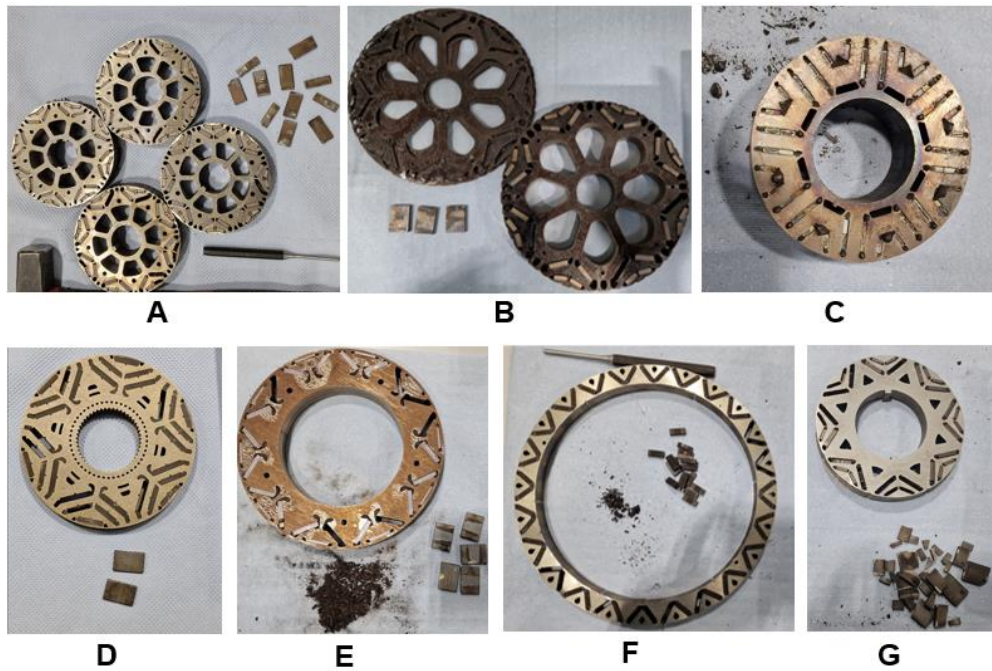


Abbildung 8: Herauslösen der Magnete aus den Hohlräumen des Rotorblechpaketes nach der thermischen Behandlung mit geringer Presskraft oder Vibrationen.

Die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse (TGA) für die Klebstoffe sind in **Abbildung 9** für die Rotoren C, F und G dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass alle Klebstoffe bei etwa 380 °C zu zersetzen beginnen, wobei der Prozentsatz der Zersetzung unterschiedlich groß ausfällt. Der Klebstoff von Rotor F ist fast vollständig zersetzbar (73 %), während sich die Klebstoffe von Rotor C und G nur zu 47 % bzw. 21 % zersetzen. Dies macht es schwieriger Magnete aus den Rotortypen C und G zu extrahieren.

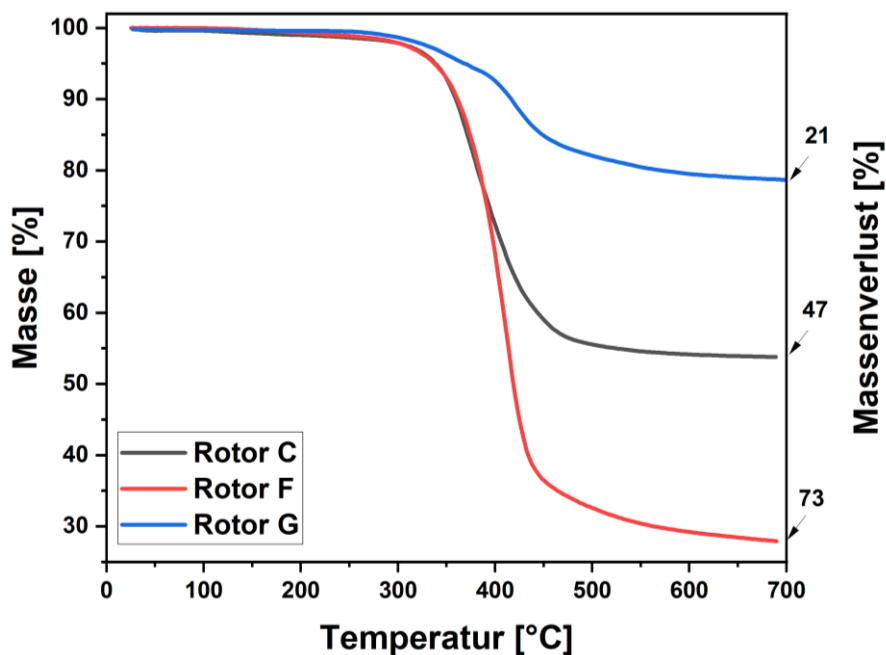


Abbildung 9: Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse von Klebstoffen, die in den Rotortypen C, F und G verwendet wurden, mit Angabe des prozentualen Massenverlustes in Abhängigkeit der Temperatur.

Außerdem benötigen einige Klebstoffe Luft, um sich bei niedrigeren Temperaturen zu zersetzen. Der Klebstoff des Rotortyps C benötigt beispielsweise 500 °C, um sich unter einer Inertgasatmosphäre zu zersetzen, aber nur 410 °C in Gegenwart von Luft im Muffelofen. Die Wahl der Atmosphäre ist jedoch wegen des Oxidationsrisikos und der möglichen Aufnahme von Verunreinigungen während der thermischen Entmagnetisierung kritisch.

Die Analyse der Zusammensetzung der extrahierten Magnete mittels ICP-OES, wie in **Tabelle 7** dargestellt, zeigt, dass die untersuchten Rotoren verschiedene Typen von Nd-Fe-B-Magneten mit unterschiedlichen Anteilen an Seltenerdelementen enthalten. Der Gesamtgehalt an Seltenerden liegt bei allen Magnettypen durchgängig bei etwa 30 Gew.-%, wobei einige Magnete zusätzlich Pr enthalten, welches das enthaltene Nd ersetzt. Von allen Magneten enthalten die Magnete von Rotor C, D und E vergleichsweise höhere Mengen an schweren Seltenerden (Tb und Dy).

Tabelle 7: Ergebnis der ICP-OES-Analyse mit dem Gesamtgehalt an Seltenen Erden (TSE), sowie weiterer enthaltener Elemente der extrahierten Magnete. Eisen ist als Rest (engl. balance) angegeben.

Ergebnisse

| Magnet/ Gew.-% | Nd | Pr | Tb | Dy | TSE | B | Co | Al | Cu | Ga | Fe |
|-------------------|-------|------|------|------|--------------|------|------|------|------|------|------|
| Rotor A | 24,20 | 5,90 | 0,66 | 0,45 | 31,21 | 0,96 | 0,93 | 0,20 | 0,29 | 0,09 | bal. |
| Rotor B | 24,30 | 5,81 | 0,85 | 0,04 | 31,00 | 0,96 | 1,54 | 0,16 | 0,14 | 0,23 | bal. |
| Rotor C | 22,10 | 5,10 | 0,61 | 2,45 | 30,26 | 0,98 | 1,38 | 0,09 | 0,13 | 0,23 | bal. |
| Rotor D | 20,50 | 6,58 | 2,30 | 0,02 | 29,40 | 0,96 | 1,10 | 0,10 | 0,13 | 0,11 | bal. |
| Rotor E | 21,50 | 6,65 | 2,72 | 0,68 | 31,55 | 0,93 | 1,12 | 0,12 | 0,09 | 0,26 | bal. |
| Rotor F | 29,00 | - | 0,37 | 0,46 | 29,83 | 0,97 | 1,45 | 0,06 | 0,17 | 0,09 | bal. |
| Rotor G | 30,10 | - | 0,37 | 0,86 | 31,33 | 0,96 | 1,88 | 0,12 | 0,25 | 0,09 | bal. |

Tabelle 8 zeigt die magnetischen Eigenschaften bei zwei Temperaturen (Raumtemperatur (22 °C) und 120 °C), sowie die Dichteanalyse der extrahierten Magnete vor und nach der Wärmebehandlung. Bei den Rotortypen A, B, D, E und F gab es vor und nach der thermischen Behandlung keine merkliche Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften. Beispielsweise wiesen die Magnete des Rotortyps B bei Raumtemperatur vor der thermischen Entmagnetisierung eine Remanenz von 1,42 T, eine Energiedichte von 393 kJ/m³ und eine Koerzitivfeldstärke von über 1950 kA/m auf (**Abbildung 10**). Nach der thermischen Behandlung blieben diese Werte konstant, auch bei den magnetischen Eigenschaften bei hohen Temperaturen (120 °C). Die gleiche Stabilität der magnetischen Eigenschaften wurde für die Rotortypen A, D, E und F beobachtet, was darauf hindeutet, dass diese Magnete nach einer Reinigung und erneuten Beschichtung für dieselben Anwendungen wiederverwendet werden können. Geringfügige Anomalien in den Werten liegen im Rahmen der Messgenauigkeit.

Tabelle 8: Dichte und magnetische Eigenschaften der extrahierten Magnete aus verschiedenen Rotortypen bei zwei verschiedenen Temperaturen (22 °C und 120 °C). Ergebnisse

| Proben | Temp. (°C) | Dichte (g/cm ³) | Remanenz, B _r (T) | Koerzitivfeldstärke, H _d (kA/m) | Energiedichte, (BH) _{max} (kJ/m ³) |
|-------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------------|--|---|
| Rotor A | 22 | 7,55 | 1,41 | >1950 | 396 |
| Rotor A Entmag. in Ar | | | 1,41 | >1950 | 389 |
| Rotor A | 120 | | 1,24 | 1083 | 302 |
| Rotor A Entmag. in Ar | | | 1,24 | 1088 | 299 |
| Rotor B | 22 | 7,56 | 1,42 | >1950 | 393 |
| Rotor B Entmag. in Ar | | | 1,42 | >1950 | 394 |
| Rotor B | 120 | | 1,26 | 1093 | 311 |
| Rotor B Entmag. in Ar | | | 1,26 | 1098 | 309 |
| Rotor C Entmag. in Ar | 22 | 7,58 | 1,32 | 1811 | 347 |
| Rotor C Entmag. in Luft | | | 1,31 | 1746 | 329 |
| Rotor C Entmag. in Ar | 120 | | 1,18 | 791 | 272 |
| Rotor C Entmag. in Luft | | | 1,17 | 738 | 257 |
| Rotor D | 22 | 7,59 | 1,38 | >1950 | 377 |
| Rotor D Entmag. in Ar | | | 1,38 | >1950 | 379 |
| Rotor D | 120 | | 1,21 | 1238 | 284 |
| Rotor D Entmag. in Ar | | | 1,21 | 1300 | 283 |
| Rotor E | 22 | 7,58 | 1,34 | >1950 | 351 |
| Rotor E Entmag. in Ar | | | 1,34 | >1950 | 348 |
| Rotor E | 120 | | 1,20 | 1457 | 280 |
| Rotor E Entmag. in Ar | | | 1,19 | 1469 | 277 |
| Rotor F | 22 | 7,59 | 1,43 | >1950 | 404 |
| Rotor F Entmag. in Ar | | | 1,44 | >1950 | 401 |
| Rotor F Entmag. in Luft | 120 | | 1,43 | >1950 | 396 |
| Rotor F | | | 1,28 | 1091 | 313 |
| Rotor F Entmag. in Ar | | | 1,28 | 1041 | 307 |
| Rotor F Entmag. in Luft | | | 1,28 | 1045 | 304 |
| Rotor G | 22 | 7,58 | 1,39 | >1950 | 381 |
| Rotor G Entmag. in Ar | | | 1,34 – 1,38 | >1950 | 325 - 360 |
| Rotor G Entmag. in Luft | 1,34 – 1,38 | | >1950 | 345 - 370 | |
| Rotor G | 120 | | 1,24 | 1042 | 298 |
| Rotor G Entmag. in Ar | | | 1,2 | 993 | 254 |
| Rotor G Entmag. in Luft | | | 1,2 | 975 | 266 |

Im Gegensatz dazu zeigten die Rotortypen C und G nach einer Wärmebehandlung bei erhöhter Temperatur oder einer Behandlung ohne Schutzgasatmosphäre eine Verschlechterung ihrer magnetischen Eigenschaften. Beim Rotortyp C sank die Remanenz von 1,32 T auf 1,31 T, die Koerzitivfeldstärke von 1811 kA/m auf 1746 kA/m und die Energiedichte von 347 kJ/m³ auf 329 kJ/m³ bei Raumtemperatur. Der Rotortyp G wies eine unterschiedlich starke Verschlechterung der Eigenschaften auf, wobei die Remanenz von 1,39 T auf einen Bereich von 1,34 - 1,38 T und die Energiedichte von 381 kJ/m³ auf einen Bereich von 345 - 370 kJ/m³ abfiel. Diese Verschlechterung kann auf mikrostrukturelle Veränderungen bei hohen Temperaturen, die Aufnahme von Verunreinigungen wie Sauerstoff, Kohlenstoff und Stickstoff oder restliche Klebstoffverbindungen zurückgeführt werden.

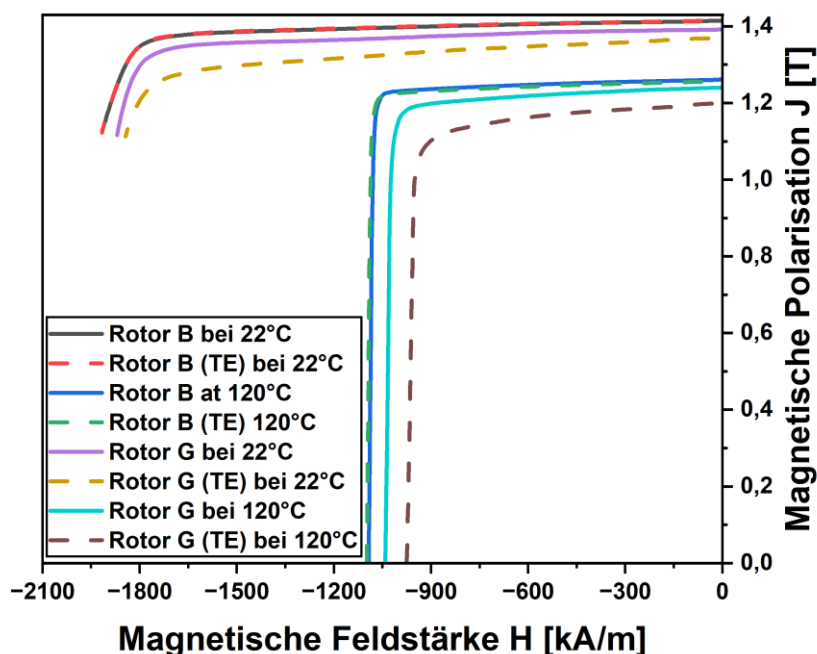


Abbildung 10: Entmagnetisierungskurven der aus Rotor B und G entnommenen Magnete vor und nach der thermischen Entmagnetisierung (TE) mit den magnetischen Eigenschaften bei Raumtemperatur (22 °C) und 120 °C. Anmerkung: Aufgrund der Sättigungseffekte der Polschuhe des Messgeräts kann die vollständige Entmagnetisierungskurve bei RT nicht gemessen werden.

Die Ergebnisse der Heißgasextraktionsanalyse (**Tabelle 9**) zeigen, dass Magnete, die nach der thermischen Behandlung eine Verschlechterung ihrer Eigenschaften aufweisen, auch stärker mit Verunreinigungen belastet sind. Beispielsweise wiesen die Magnete des Rotortyps G vor der thermischen Behandlung einen Verunreinigungsgrad von 0,130 Gew.-% Sauerstoff und 0,061 Gew.-% Kohlenstoff auf. Nach der thermischen Behandlung in Gegenwart von Luft stiegen diese Werte auf 0,193 Gew.-% Sauerstoff bzw. 0,071 Gew.-% Kohlenstoff. Im Gegensatz dazu wiesen die Rotortypen A, B, D, E und F keine signifikante Erhöhung des Verunreinigungsgehaltes auf und zeigten daher keine merkliche Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften.

Tabelle 9: Prozentualer Anteil der Verunreinigungen in den aus verschiedenen Rotoren stammenden Magneten vor und nach der Wärmebehandlung.

| Magnet/ Verunreinigung Gew. -% | O | N | C |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| Rotor A | 0,065 | 0,053 | 0,068 |
| Rotor A Entmag. in Ar | 0,062 | 0,054 | 0,066 |
| Rotor B | 0,075 | 0,031 | 0,067 |
| Rotor B Entmag. in Ar | 0,072 | 0,030 | 0,070 |
| Rotor C | N/A | N/A | N/A |
| Rotor C Entmag. in Ar | 0,079 | 0,014 | 0,086 |
| Rotor C Entmag. in Luft | 0,081 | 0,016 | 0,093 |
| Rotor D | 0,114 | 0,019 | 0,071 |
| Rotor D Entmag. in Ar | 0,115 | 0,019 | 0,070 |
| Rotor E | 0,092 | 0,039 | 0,063 |
| Rotor E Entmag. in Ar | 0,089 | 0,040 | 0,068 |
| Rotor F | 0,056 | 0,028 | 0,061 |
| Rotor F Entmag. in Ar | 0,051 | 0,027 | 0,066 |
| Rotor F Entmag. in Luft | 0,056 | 0,029 | 0,065 |
| Rotor G | 0,130 | 0,052 | 0,061 |
| Rotor G Entmag. in Ar | 0,168 | 0,050 | 0,067 |
| Rotor G Entmag. in Luft | 0,193 | 0,050 | 0,071 |

Neben konstruktiven Faktoren, die sich auf die Extrahierbarkeit der Magnete auswirken, spielt die Korrosionsschutzschicht der Magnete eine wichtige Rolle für ihre magnetischen Eigenschaften nach der Wärmebehandlung. Um die Struktur der Korrosionsschutzschicht und die Verteilung der Verunreinigungen von der Oberfläche bis zum Zentrum der Magnete zu untersuchen, wurden die Proben mittels fokussiertem Ionenstrahl (FIB) präpariert und die Querschnitte mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) analysiert. **Abbildung 11** zeigt ein REM-EDX-Elementverteilungsbild, welches die Verteilung der Beschichtungs- und Verunreinigungselemente aufzeigt. Es ist zu beobachten, dass Magnete ohne Korrosionsschutzbeschichtung (Rotor G) einen höheren Grad an Sauerstoff- und Kohlenstoffverunreinigungen aufweisen, die tiefer in die Magnete eindringen und zu einer Verringerung der magnetischen Eigenschaften führen können. Im Gegensatz dazu begrenzt selbst eine dünne Phosphatschicht (wie bei den Magneten des Rotors C) die hohen Verunreinigungsgehalte auf die äußere Oberfläche der Magnete und mildert so die Auswirkungen auf ihre magnetischen Eigenschaften.

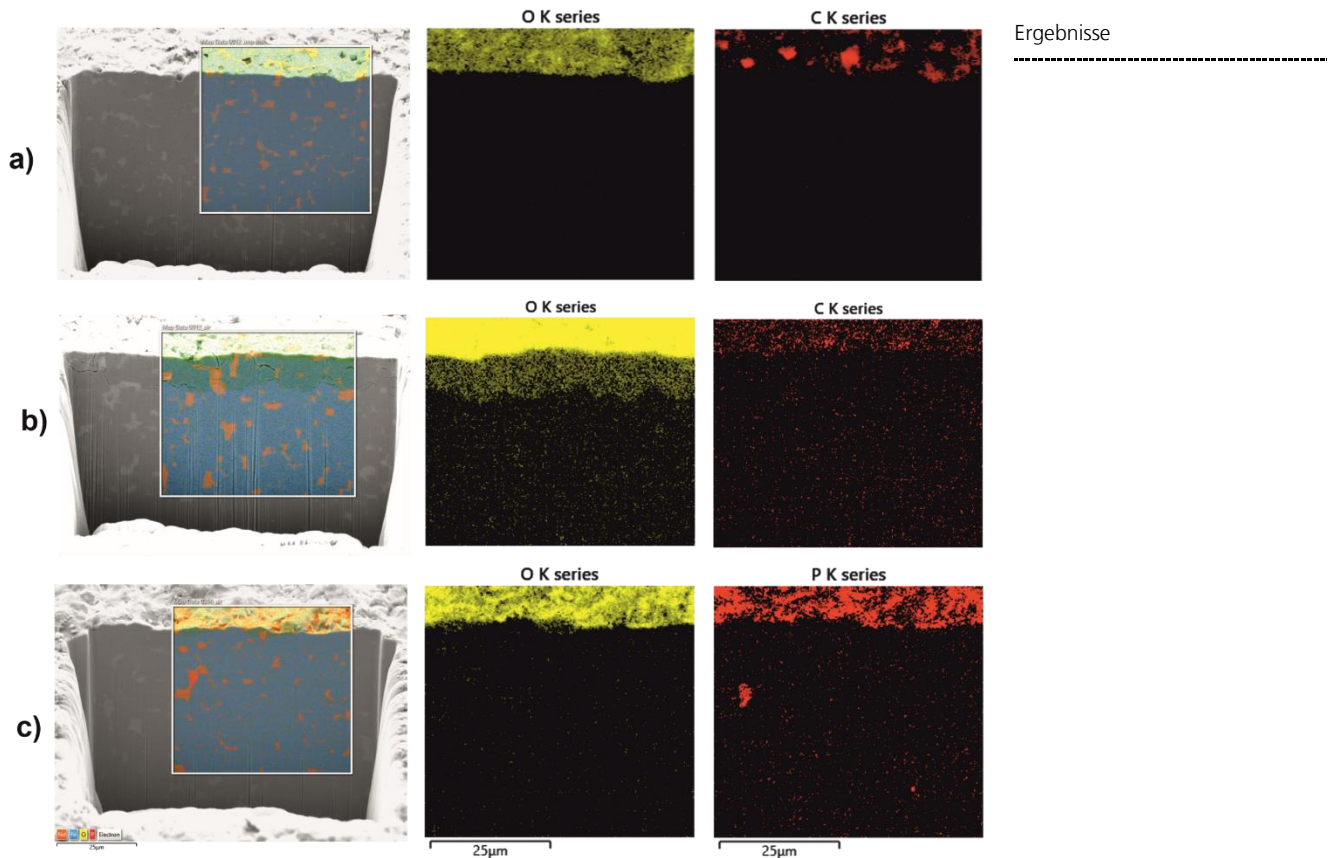


Abbildung 11: REM-EDX-Aufnahmen von Magneten vor der Wärmebehandlung (a) und nach der Wärmebehandlung (b) ohne Korrosionsbeschichtung (Rotor G), sowie nach der Wärmebehandlung (c) mit einer dünnen Phosphatschicht auf der Oberfläche (Rotor C). Der Magnet ohne Beschichtung zeigt eine tiefere Schicht an Verunreinigungen.

3.2.2 Automatisierte Demontage von PMSM-Rotoren

Ein effektives und kostengünstiges Recyclingverfahren ist für die Wiederverwertbarkeit von Nd-Fe-B-Magneten unerlässlich. Automatisierte Prozesse können dazu beitragen, die notwendigen Schritte und Kosten zu reduzieren. Neben der thermischen Wärmebehandlung und der manuellen Entnahme der einzelnen Magnete wurden in diesem Arbeitspaket auch automatisierte Demontageverfahren untersucht. Dazu wurde ein kompletter Rotor mit einer Prallmühle bei einer Drehzahl von 1852 U/min zerlegt. Es war jedoch nicht möglich, intakte Magnete oder Magnetstücke für das weitere Recycling zu gewinnen. Durch die hohe Drehzahl und den Aufprall auf die Prallwände im Inneren der Mühle wurden die Magnete zu einem groben Pulver zerkleinert, das nicht vom restlichen Material getrennt werden konnte (siehe **Abbildung 12**). Daher stellt die Verwendung einer Prallmühle keine praktikable Option für die automatische Demontage eines Rotors dar.



Abbildung 12: Die Zerkleinerung eines kompletten Rotors mit einer Prallmühle führt neben größeren Stahlfragmenten aufgrund der starken Kräfte im Inneren der Mühle zu einem groben Magnetpulver, welches mit anderen Materialien verunreinigt ist und daher für ein funktionales Recycling ungeeignet ist.

Beim funktionalen Magnetrecycling mit Wasserstoff ist die vollständige Extraktion einzelner Magnete nicht zwingend erforderlich. Bei diesem Verfahren reagiert der Wasserstoff selektiv mit den Seltenerdmetallen und versprödet sie in ein grobes Pulver. In diesem Fall wurde der Rotor A in einzelne Blechpakete zerlegt, wobei sich die Magnete noch in ihren Taschen befanden. Diese Blechpakete wurden dann in einem Wasserstoff-Autoklaven bei einem Druck von 3 bar einer Wasserstoffversprödung unterzogen, anschließend 3 Stunden lang bei 500 °C unter Vakuum entgast und schließlich unter Argon-Atmosphäre auf Raumtemperatur abgekühlt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Nd-Fe-B-Magnete von den Stahlblechen getrennt werden können, indem sie in ein grobes Pulver versprödet werden, an den Stahlkomponenten jedoch keine Reaktion stattfindet (siehe **Abbildung 13**). Eine detaillierte Gewichtsanalyse zeigte, dass ein Blechpaket mit einem Gewicht von 757,5 g in 144,0 g grobes Magnetpulver und 612,6 g intakte Stahlbleche prozessiert wird. Dieses Verfahren ist damit geeignet Magnete aus Rotoren automatisiert, d.h. ohne manuelle Separation, zu zerlegen, was zu erheblichen Zeit-, Energie- und Kosteneinsparungen beim Recycling führen würde.



Abbildung 13: Direkte Wasserstoffversprödung der im Rotorblechpaket enthaltenen Magnete führt zu einer Trennung der Nd-Fe-B-Magnete (als Pulver) von den Stahlkomponenten.

Die Ergebnisse des Arbeitspakets 2 lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die thermische Behandlung, typischerweise bei 410 °C, führt in den meisten Fällen zu einer erfolgreichen Entmagnetisierung und Zersetzung der Klebstoffe, obwohl für Rotoren mit widerstandsfähigeren Klebstoffen höhere Temperaturen erforderlich sind
- Rotoren mit Klebstoffen, welche sich bei niedrigeren Temperaturen zersetzen (Typen A, B, D, E und F) ermöglichen eine einfachere Magnetentnahme im Vergleich zu solchen mit hochtemperaturbeständigen Klebstoffen (Typen C und G)
- Die magnetischen Eigenschaften bleiben bei Rotoren mit Niedertemperatur-Klebstoffen weitgehend erhalten, während sie bei Rotoren mit Hochtemperatur-Klebstoffen aufgrund von Verunreinigungen wie Sauerstoff und Kohlenstoff eine gewisse Verschlechterung aufweisen
- Das Vorhandensein von Korrosionsschutzschichten beeinflusst den Verunreinigungsgrad, wobei unbeschichtete Magnete ein tieferes Eindringen von Verunreinigungen zeigen
- Die automatische Demontage mit einer Prallmühle war unwirksam, da sie die Magnete pulverisierte, so dass sie nicht vom restlichen Material separiert werden konnten. Mit einem Verfahren zur Wasserstoffversprödung konnten die Magnete jedoch erfolgreich von den Stahlblechen getrennt werden, ohne dass eine manuelle Demontage erforderlich war, was das Recycling effizienter gestalten würde

3.3 AP 3: Recycling von Nd-Fe-B-Permanentmagneten

Für das funktionale Recycling wurden zwei Arten von primären Magneten als Ausgangsmaterial für Recyclingversuche verwendet: konventionell hergestellte gesinterte Magnete und gesinterte Magnete mit nachgeschaltetem Korngrenzendiffusionsprozess (engl. Grain Boundary Diffusion Process, GBDP), aus Rotor G.

3.3.1 Recycling von konventionellen gesinterten Nd-Fe-B-Magneten

Die erste Analyse dieser konventionell hergestellten Magnete, bei denen kein zusätzlicher GBDP verwendet wurde, zeigt eine Remanenz von 1,34 T, eine Koerzitivfeldstärke von über 1950 kA/m und eine Energiedichte von 350 kJ/m³ bei Raumtemperatur (vgl. **Tabelle 10**).

Tabelle 10: Dichte und magnetische Eigenschaften von konventionell hergestellten Nd-Fe-B-Sintermagneten, die als Ausgangsmaterial für die Recyclingversuche verwendet wurden.

| Temperatur (°C) | Dichte (g/cm ³) | B _r (T) | H _d (kA/m) | (BH) _{max} (kJ/m ³) |
|-----------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------|--|
| 22 (RT) | 7,58 | 1,34 | >1850 | 350 |
| 50 | | 1,31 | 1665 | 333 |
| 80 | | 1,26 | 1341 | 307 |
| 120 | | 1,18 | 952 | 270 |
| 150 | | 1,13 | 694 | 244 |
| 200 | | 0,98 | 348 | 172 |

Die ICP-OES-Analyse zeigt, dass der Gesamtgehalt an Seltenen Erden 30,46 Gew.-% beträgt. Der erhöhte Gehalt an Terbium, einem schweren Seltenerdelement, trägt zur höheren Koerzitivfeldstärke des Magneten bei. Darüber hinaus sind kleinere Elemente wie Al, Co, Cu und Ga entscheidend für die Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit und Verarbeitbarkeit der Legierung.

Tabelle 11: Zusammensetzung (ICP-OES) der Primärmagnete mit Angabe des Gesamtgehalts an Seltenen Erden (TSE) und zusätzlichen Legierungselementen.

| Magnet/ Gew.-% | Nd | Pr | Tb | TSE | B | Co | Al | Cu | Ga | Fe |
|--------------------------------|-------|------|------|--------------|------|------|------|------|------|------|
| Primär- magnet, konvent. | 20,30 | 6,40 | 3,76 | 30,46 | 0,94 | 1,01 | 0,13 | 0,06 | 0,19 | bal. |

Die Analyse der Verunreinigungen zeigt typische Werte für gesinterte Nd-Fe-B-Magnete: 0,116 Gew.-% Sauerstoff, 0,014 Gew.-% Stickstoff und 0,082 Gew.-% Kohlenstoff.

Die mikrostrukturelle Analyse (siehe **Abbildung 14**) zeigt große, an Seltenen Erden reiche Körner und sog. Tripelpunkte (helle Phasen) mit einer homogenen SE-reichen Korngrenzphase, die die ferromagnetischen Nd₂Fe₁₄B-Matrixkörner (dunkle Phasen) umgibt. Daneben weist das Gefüge auch einige wenige Poren auf. Die homogene Korngrenzphase trägt zur magnetischen Entkopplung der einzelnen Körner bei und erhöht damit die Koerzitivfeldstärke der Magnete.

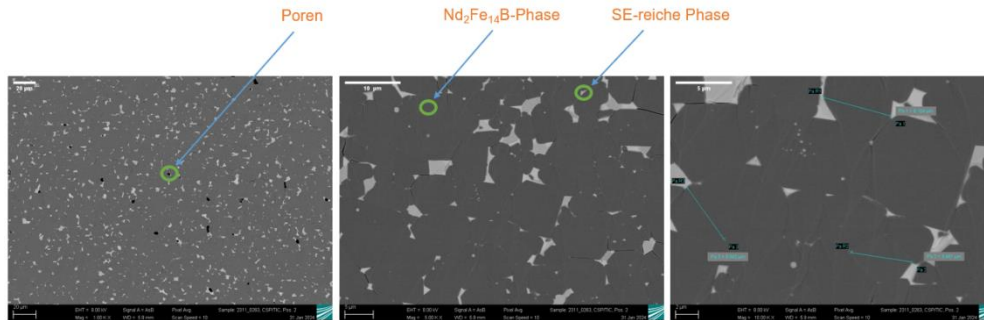


Abbildung 14: REM-Mikrostrukturanalyse, die SE-reiche Körner und Tripelpunkte (helle Phasen) zeigt, mit einer einheitlichen SE-reichen Korngrenzphase, die die primären $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Matrixkörner (dunkle Phasen) umgibt.

Die Primärmagnete wurden unter einem Druck von 3 bar Wasserstoff versprödet und bei 500 °C unter Vakuum 3 Stunden lang entgast. Die groben Pulver wurden auf $< 800 \mu\text{m}$ gesiebt, um evtl. enthaltene Beschichtungsrückstände abzutrennen und anschließend unter Stickstoff auf zwei Partikelgrößen (vgl. **Abbildung 15**) gemahlen: $d_{50} = 5,8 \mu\text{m}$ (engere Verteilung) und $d_{50} = 5,9 \mu\text{m}$ (breitere Verteilung). Diese Pulver wurden mit einem externen Magnetfeld von 2,5 T zu anisotropen Grünlingen gepresst, bei 1080 °C bis 1120 °C gesintert und bei 500 °C nachgeglüht.

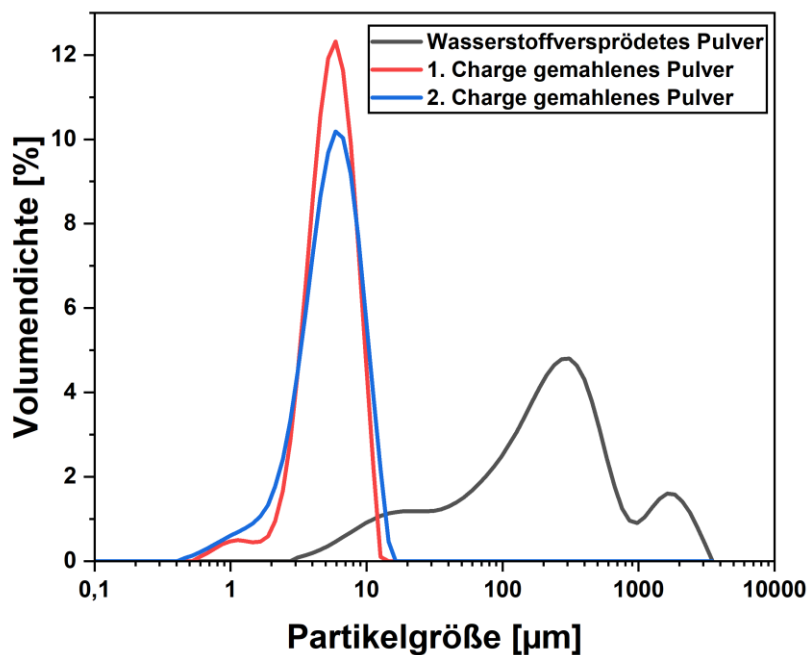


Abbildung 15: Partikelgrößenverteilung von wasserstoff-versprödetem Pulver (HD-Pulver) aus konventionellen Primärmagneten und dem daraus gemahlenem Feinpulver, mit zwei unterschiedlichen Feinheiten und Verteilung.

Der Zweck des Mahlens verschiedener Pulverchargen ist die Feinabstimmung der resultierenden magnetischen Eigenschaften der recycelten Magnete. Größere Pulverpartikel erreichen beim Pressen tendenziell einen höheren Grad an

Ausrichtung, was zu einer höheren Remanenz in den Magneten führt. Umgekehrt lassen sich mit feineren Partikelgrößen Magnete mit kleineren Körnern und höherer Koerzitivfeldstärke herstellen. Außerdem erfordert die Verwendung größerer Sinterpulver eine höhere Sintertemperatur, um vollständig dicht gesinterte Magnete zu erhalten, wie in **Abbildung 16** dargestellt. Beispielsweise wurden die optimalen magnetischen Eigenschaften für das 5,8 μm -Pulver mit einem Sinterprofil von 8 Stunden bei 1100 °C erzielt, während für das 5,9 μm -Pulver 4 Stunden bei 1120 °C erforderlich waren (in **Tabelle 12** grün markiert).

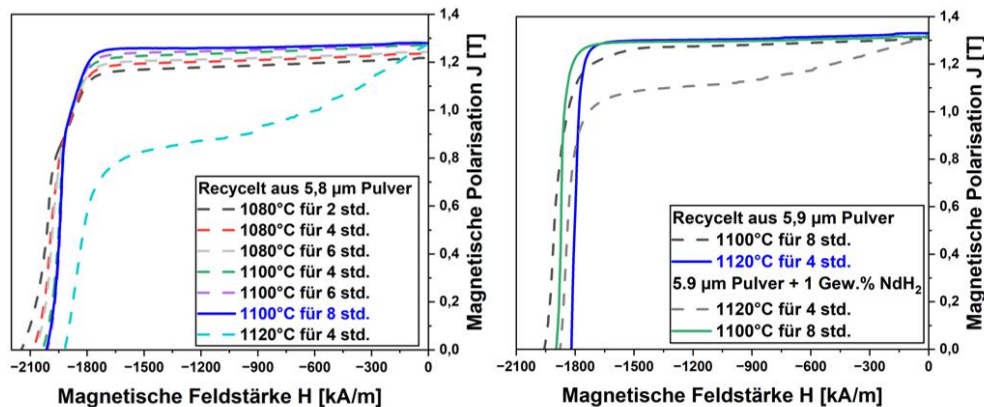


Abbildung 16: Entmagnetisierungskurven von recycelten Magneten, welche mit unterschiedlichen Temperaturprogrammen hergestellt wurden. Die optimale Sintertemperatur zur Erzielung der besten magnetischen Eigenschaften für das 5,8 μm -Pulver (links) und das 5,9 μm -Pulver (rechts) ist farblich hervorgehoben. In allen Fällen wird auch ein Nachglühprozess bei 500 °C für 1 Stunde durchgeführt.

Für das 5,8 μm -Pulver mit einer engeren Verteilung erreichten die recycelten Magnete optimale Eigenschaften, mit einer Dichte und Koerzitivfeldstärke (>1950 kA/m), die denen der primären Magnete ähnlich waren. Allerdings sanken die Remanenz und die Energiedichte von 1,34 T auf 1,28 T bzw. von 350 kJ/m³ auf 320 kJ/m³ (vgl. **Tabelle 12**). Bei dem 5,9 μm -Pulver mit einer breiteren Verteilung war der Unterschied in Remanenz und Energiedichte zwischen Primär- und Recyclingmagneten dagegen deutlich geringer. Die optimalen Eigenschaften für dieses Pulver waren eine Remanenz von 1,33 T und eine Energiedichte von 345 kJ/m³ (vgl. **Tabelle 13**).

Tabelle 12: Dichte und magnetische Eigenschaften von recycelten Magneten, die aus Pulvern kleinerer Größe (5,8 µm) mit engerer Partikelgrößenverteilung hergestellt wurden.

| Sintertemperatur | Dichte (g/cm ³) | Remanenz, B _r (T) | Koerzitivfeldstärke, H _d (kA/m) | Energiedichte, (BH) _{max} (kJ/m ³) |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|---|
| 1080°C für 2 Std. | 7,31 | 1,22 | >1950 | 287 |
| 1080°C für 4 Std. | 7,39 | 1,23 | >1950 | 297 |
| 1080°C für 8 Std. | 7,45 | 1,24 | >1950 | 300 |
| 1100°C für 4 Std. | 7,57 | 1,26 | >1950 | 313 |
| 1100°C für 6 Std. | 7,60 | 1,28 | >1950 | 317 |
| 1100°C für 8 Std. | 7,60 | 1,28 | >1950 | 320 |
| 1120°C für 4 Std. | 7,61 | 1,27 | 1919 | 232 |

Tabelle 13: Dichte und magnetische Eigenschaften von recycelten Magneten aus größerem Pulver (5,9 µm) mit breiterer Partikelgrößenverteilung, sowohl mit als auch ohne NdH₂-Zusatz.

| Sintertemperatur | Zusatz | Dichte (g/cm ³) | Remanenz, B _r (T) | Koerzitivfeldstärke, H _d (kA/m) | Energiedichte, (BH) _{max} (kJ/m ³) |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|---|
| 1100°C für 8 Std. | Keiner | 7,47 | 1,31 | 1957 | 332 |
| 1120°C für 4 Std. | | 7,58 | 1,33 | 1819 | 345 |
| 1120°C für 4 Std. | 1 Gew. % NdH ₂ | 7,60 | 1,31 | 1877 | 290 |
| 1100°C für 8 Std. | | 7,60 | 1,32 | 1897 | 339 |

Dennoch sank die Koerzitivfeldstärke von über 1950 kA/m auf 1819 kA/m. Um den Verlust an Seltenen Erden während des Recyclingprozesses auszugleichen und die Koerzitivfeldstärke zu erhöhen, wurden dem 5,9 µm Sinterpulver geringe Mengen (1 Gew.-%) Nd-Hydrid (NdH₂) zugegeben. Diese Anpassung verbesserte die Koerzitivfeldstärke von 1819 kA/m auf 1897 kA/m und brachte sie näher an die Werte des Primärmagneten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Verwendung des 5,8 µm-Pulvers mit einer engeren Verteilung zu recycelten Magneten mit einer ähnlichen Dichte und Koerzitivfeldstärke wie bei den Primärmagneten führte, wenn auch mit einer etwas geringeren Remanenz und Energiedichte. Im Gegensatz dazu verringerte das 5,9 µm-Pulver mit einer breiteren Verteilung die Leistungslücke zwischen den recycelten und den primären Magneten erheblich und erzielte eine höhere Remanenz und Energiedichte. Trotz eines anfänglichen Rückgangs der Koerzitivfeldstärke verbesserte sich die Koerzitivfeldstärke durch die Zugabe von 1 Gew.-% Nd-Hydrid zum 5,9 µm-Pulver auf Werte, die denen der Primärmagnete nahekamen. **Abbildung 17** bietet einen umfassenden Vergleich der erzielten Eigenschaften für verschiedene Pulverchargen und Zusätze von Seltenen Erden.

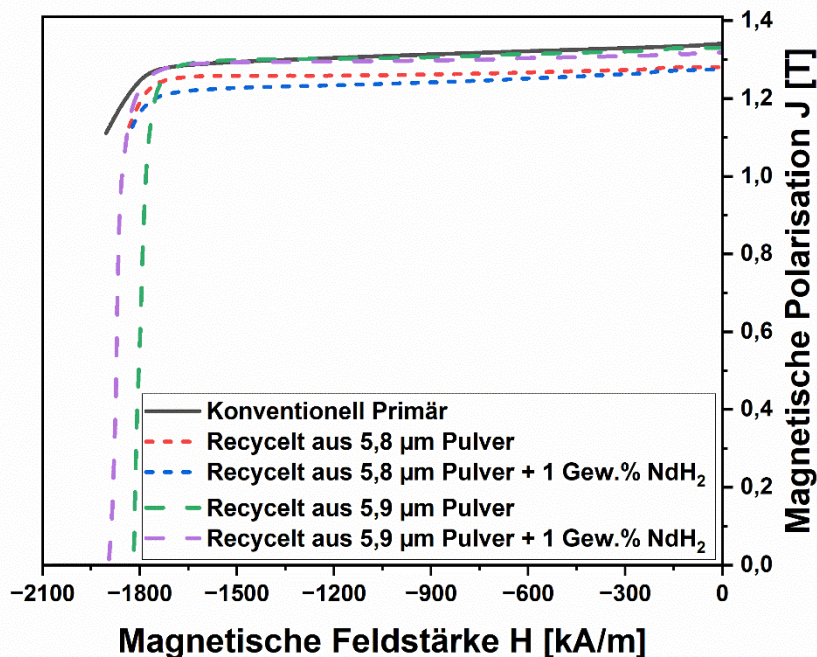


Abbildung 17: Entmagnetisierungskurven des Primärmagneten und verschiedenen Recyclingmagneten, die aus zwei verschiedenen Partikelgrößenverteilungen und Zusätzen von Seltenen Erden hergestellt wurden. Bei den Recyclingexperimenten wurden konventionelle Primärmagnete als Ausgangsmaterial verwendet.

Bei beiden Pulverchargen zeigen die Eigenschaften der recycelten Magnete eine leichte Verschlechterung gegenüber den Eigenschaften des Ausgangsmaterials. Der Grund für diese schlechteren Eigenschaften könnte der höhere Gehalt an Verunreinigungen, Prozessunterschiede, Verluste von Seltenen Erden während des Prozesses und mikrostrukturelle Unterschiede zwischen den beiden Chargen sein. Die in **Abbildung 18** dargestellte Analyse der Verunreinigungen ergab einen höheren Sauerstoffgehalt in beiden Chargen der recycelten Magnete und auch einen etwas höheren Stickstoff- und Kohlenstoffgehalt im Vergleich zum Primärmagneten. So enthalten die Primärmagnete Gehalte an Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff von 0,116 Gew.-%, 0,014 Gew.-% und 0,082 Gew.-%. Im Gegensatz dazu sind diese Verunreinigungen in den recycelten Magneten höher: 0,215 Gew.-%, 0,034 Gew.-% und 0,112 Gew.-% für die Magnete aus 5,8 µm-Pulver und 0,184 Gew.-%, 0,038 Gew.-% und 0,083 Gew.-% für die Magnete aus 5,9 µm-Pulver.

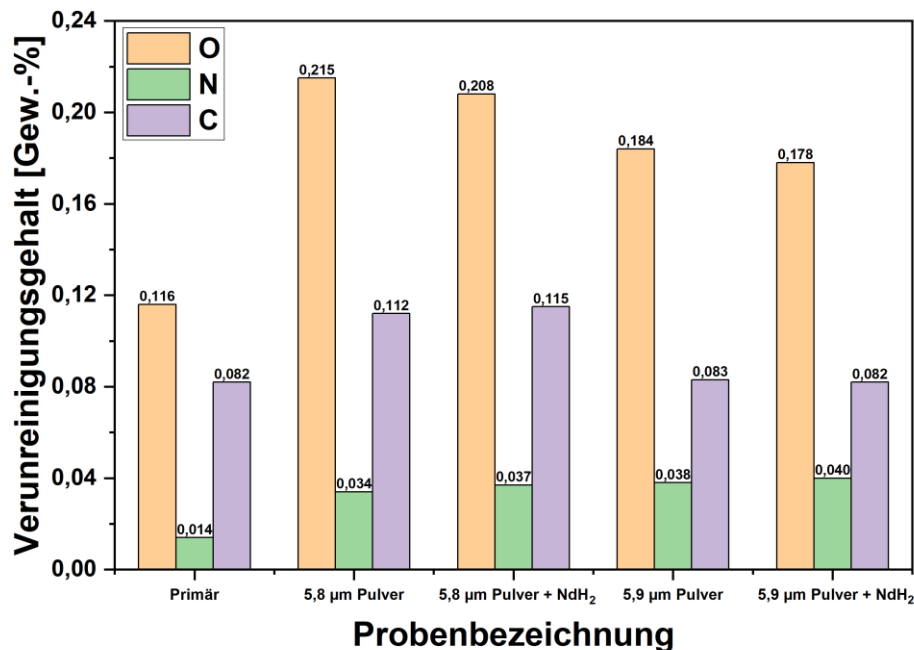


Abbildung 18: Prozentualer Anteil von Verunreinigungen in konventionellen Primärmagneten und verschiedenen recycelten Magneten, wobei der erhöhte Gehalt an Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff in den recycelten Magneten im Vergleich zum Primärmagneten deutlich wird.

Abbildung 19 zeigt die mikrostrukturelle Analyse von primären und recycelten Magneten. Der primäre Magnet weist eine homogene Kornstruktur auf, die durch kleinere und gut verteilte Körner gekennzeichnet ist, was auf eine hohe Qualität mit minimalen Defekten hinweist. Im Gegensatz dazu zeigt der recycelte 5,8 µm-Magnet eine leichte Zunahme der Korngröße zusammen mit einer gewissen Inhomogenität, was auf eine geringfügige Verschlechterung der Materialqualität hindeutet. Der recycelte 5,9 µm-Magnet weist eine unregelmäßigere und gröbere Kornstruktur mit einer weniger gleichmäßigen Verteilung der Seltenen Erden auf, was auf eine Verschlechterung der Koerzitivfeldstärke schließen lässt. Darüber hinaus nimmt das Vorhandensein von Defekten wie Rissen oder Poren zu.

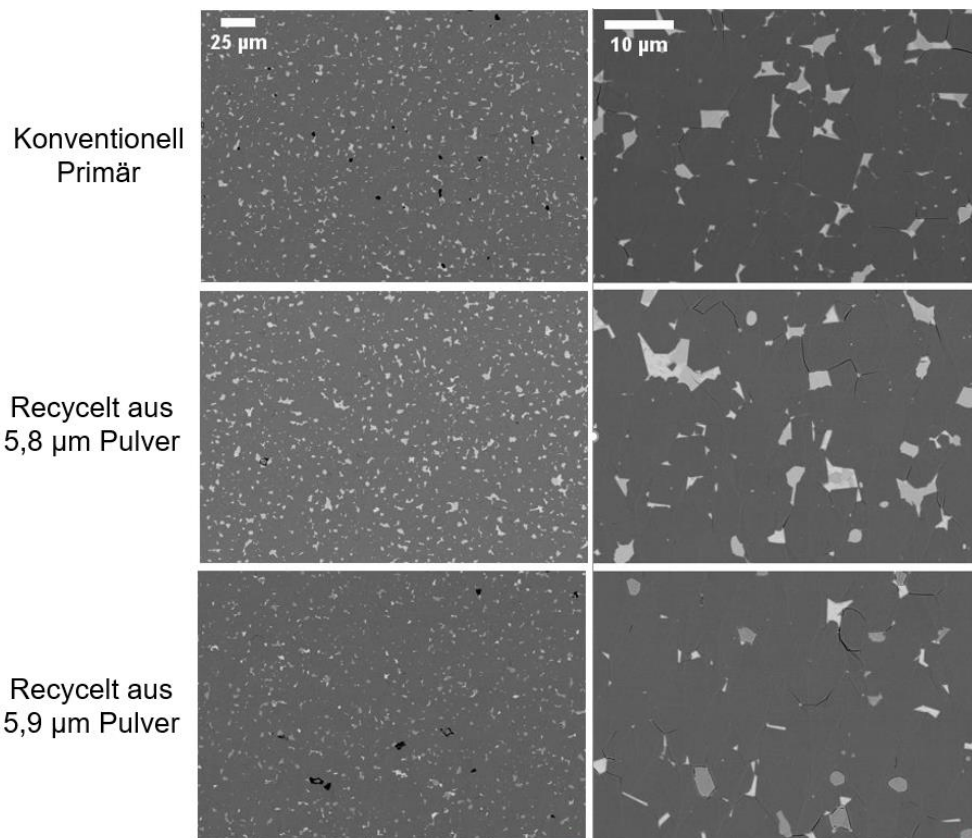


Abbildung 19: Die REM-Analyse zeigt die typische Mikrostruktur, bestehend aus SE-reichen Korngrenzphasen (helle Phasen), welche die $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Matrixkörner (dunkle Phasen) umgeben. Risse, Poren und eine unregelmäßigere Verteilung der Phasen nimmt bei den recycelten Magneten zu.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die recycelten Magnete leicht reduzierte magnetische Eigenschaften aufwiesen, wobei das 5,8 μm -Pulver eine ähnliche Dichte und Koerzitivfeldstärke, aber eine geringere Remanenz und Energiedichte erreichte, während das 5,9 μm -Pulver eine bessere Remanenz und Energiedichte, aber eine geringere Koerzitivfeldstärke aufwies. Durch die Zugabe von 1 Gew.-% Nd-Hydrid wurde die Koerzitivfeldstärke jedoch auf ein nahezu primäres Niveau verbessert. Die Leistungsver schlechterung der recycelten Magnete wird auf den höheren Gehalt an Verunreinigungen und auf Prozessunterschiede zurückgeführt.

3.3.2 Recycling von GBDP Nd-Fe-B-Magneten

In diesem Abschnitt wurden Nd-Fe-B-Magnete aus dem Rotor G entnommen und recycelt, welche ursprünglich mittels Korngrenzendiffusionsprozess (engl. Grain Boundary Diffusion Process, GBDP) hergestellt wurden. Wie im Abschnitt zu Arbeitspaket 2 erwähnt, haben sich bei diesen Magneten während der thermischen Behandlung Verunreinigungen angesammelt, was auf die Verwendung von temperaturbeständigen Klebstoffen und das Fehlen von Korrosionsschutzschichten zurückzuführen ist. Infolgedessen verschlechterten sich ihre Eigenschaften, wobei die Remanenz von 1,39 T auf einen Bereich von 1,34 - 1,38 T und die Energiedichte von 381 kJ/m^3 auf 345 - 370 kJ/m^3 abfiel (siehe **Abbildung 20**).

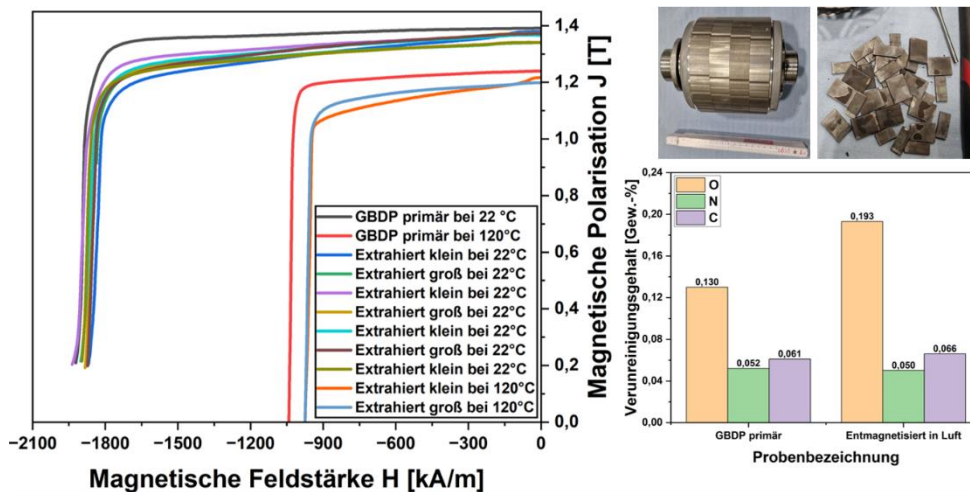


Abbildung 20: Entmagnetisierungskurven von GBDP-Primärmagneten und von aus den Rotoren extrahierten Magneten bei 22 °C und 120 °C. Die zur Extraktion notwendige Wärmebehandlung an Luft hat einen negativen Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften (links). Bild des Rotors und der extrahierten Magnete, mit begleitender Verunreinigungsanalyse, die den Gehalt an Verunreinigungen vor und nach der Wärmebehandlung und Extraktion zeigt (rechts).

Die aus dem Rotor G extrahierten Magnete, welche teilweise unterschiedliche Eigenschaften aufwiesen, wurden unter Wasserstoff versprödet und zu einem feinen Pulver mit einer mittleren Partikelgröße (D_{50}) von 4,91 μm vermahlen. Als optimale Sinterbedingungen für dieses Pulver erwiesen sich 4 Stunden bei 1080 °C (siehe **Abbildung 21** und **Tabelle 14**), gefolgt von einem Nachglühen bei 500 °C für 1 Stunde. Geringere Sintertemperaturen reichten nicht aus um volllichte recycelte Magnete herzustellen, wohingegen zu hohe Temperaturen zu einem abnormen Kornwachstum führen, was sich in der Form der Entmagnetisierungskurve bemerkbar macht.

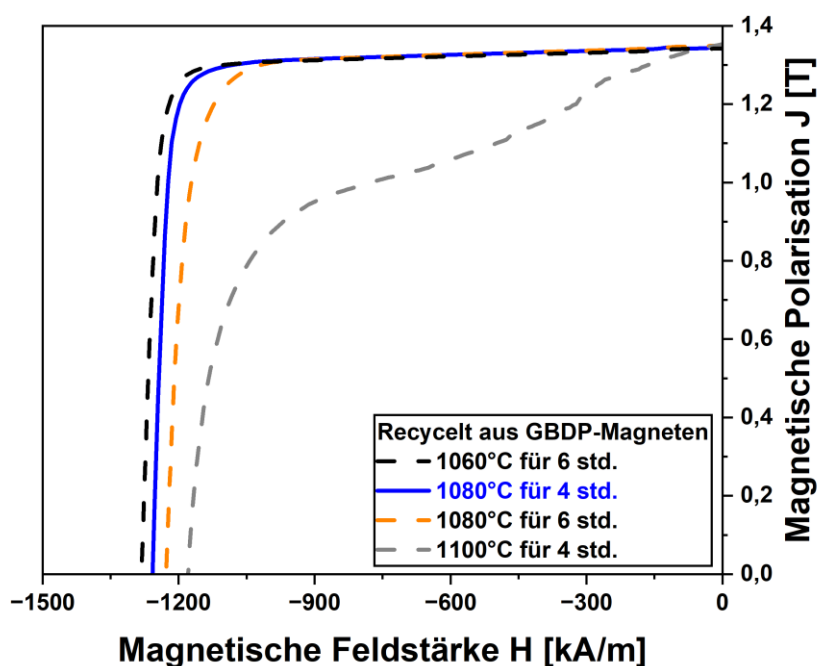


Abbildung 21: Entmagnetisierungskurven von recycelten Magneten, welche mit unterschiedlichen Temperaturprofilen hergestellt wurden. Die optimale Sinter Temperatur zur Erzielung der besten magnetischen Eigenschaften zeigte sich bei 1080 °C für 4 Std. In allen Fällen wird nach dem Sintern auch ein Glühprozess bei 500 °C für 1 Stunde durchgeführt.

Die recycelten Magnete mit einer Dichte von 7,55 g/cm³ erreichten optimale magnetische Eigenschaften von 1,35 T Remanenz, 1257 kA/m Koerzitivfeldstärke und eine maximale Energiedichte von 351 kJ/m³.

Tabelle 14: Dichte und magnetische Eigenschaften von recycelten Magneten aus extrahierten GBDP-Rotormagneten.

| Sintertemperatur | Dichte (g/cm ³) | Remanenz, B _r (T) | Koerzitivfeldstärke, H _d (kA/m) | Energiedichte, (BH) _{max.} (kJ/m ³) |
|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|--|
| 1060°C für 6 Std. | 7,50 | 1,34 | 1282 | 349 |
| 1080°C für 4 Std. | 7,55 | 1,35 | 1257 | 351 |
| 1080°C für 6 Std. | 7,56 | 1,35 | 1228 | 351 |
| 1100°C für 4 Std. | 7,57 | 1,35 | 1179 | 261 |

Während die Remanenz und die Energiedichte nahe bei den Werten der ursprünglich extrahierten Primärmagnete liegen, weist die Koerzitivfeldstärke eine relativ große Verringerung um 600 kA/m auf. Diese große Lücke könnte auf die Aufnahme von Verunreinigungen während der thermischen Entmagnetisierung und des Recyclingprozesses, oder auf die Zerstörung der GBDP-typischen Mikrostruktur mit optimal verteilten schweren Seltenen Erden zurückzuführen sein.

Die in **Abbildung 22** gezeigte Analyse des Verunreinigungsgehaltes deutet auf einen Anstieg der Verunreinigungen in thermisch behandelten Magneten hin: Sauerstoff stieg von 0,130 Gew.-% auf 0,193 Gew.-%, Stickstoff sank von 0,050 Gew.-% auf 0,045 Gew.-%, und Kohlenstoff stieg von 0,061 Gew.-% auf 0,066 Gew.-%. In recycelten Magneten lagen die Gehalte an Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff bei 0,210 Gew.-%, 0,083 Gew.-% und 0,065 Gew.-%. Während der Kohlenstoff-Wert konstant bleibt, ist beim Recycling eine geringe Aufnahme von Sauerstoff und Stickstoff zu verzeichnen. Dennoch weisen die recycelten Magnete Verunreinigungsgehalte auf, die auch in industriell hergestellte Primärmagneten zu finden sind.

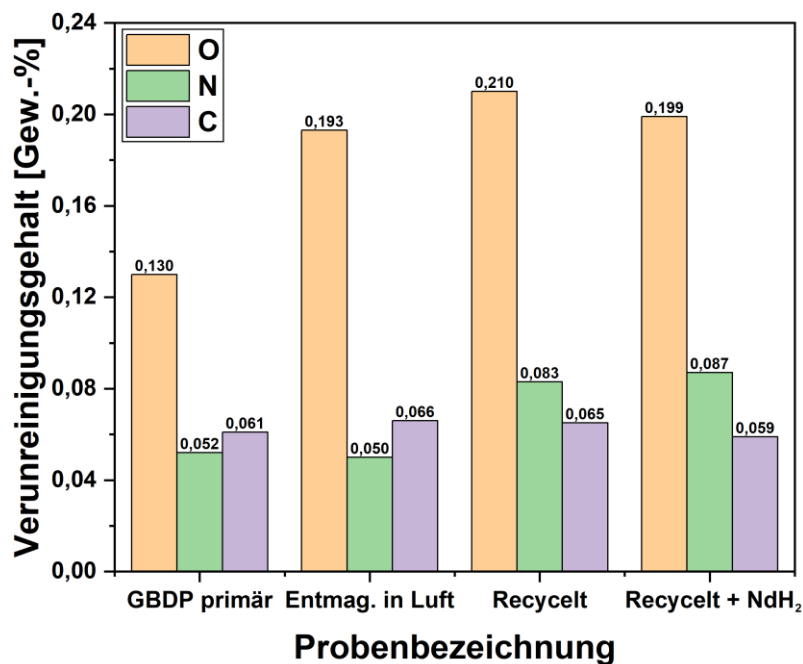
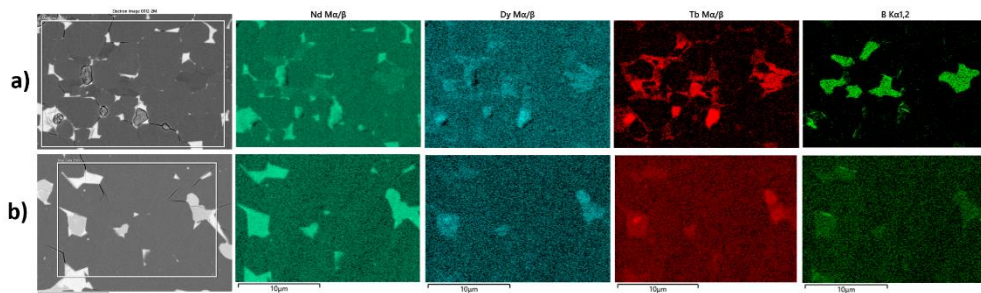


Abbildung 22: Prozentualer Verunreinigungsgehalt in primären GBDP-Magneten, in vom Rotor extrahierten Magneten und in recycelten Magneten. Die Abbildung verdeutlicht den erhöhten Gehalt an Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenstoff nach der thermischen Entmagnetisierung und dem Recyclingprozess im Vergleich zum Primärmagneten.

Die Gefüge-Analyse mittels REM-EDX im Hinblick auf die Elementverteilung (**Abbildung 23**) zeigte, dass die schweren Seltenen Erden in den Primärmagneten stärker im Korngrenzbereich konzentriert sind, während sie in den recycelten Magneten gleichmäßiger über das gesamte Gefüge verteilt sind. Dies hat zur Folge, dass der positive Effekt der Erhöhung der Koerzitivfeldstärke durch die GBDP-Mikrostruktur hier unwirksam wird. Auch die Remanenz kann aufgrund des erhöhten Gehalts an schweren Seltenen Erden innerhalb der Nd₂Fe₁₄B-Körner abnehmen. Weitere mikrostrukturelle Effekte im Gefüge der Recyclingmagnete sind eine Zunahme der Korngröße, sowie eine inhomogenere Korngrenzphase, welche beide zu einer Reduktion der Koerzitivfeldstärke führen können.



Ergebnisse

Abbildung 23: REM-EDX-Mikrostrukturanalyse, die die Unterschiede in der Verteilung der Seltenerdelemente, insbesondere der schweren Seltenen Erden wie Tb oder Dy, in GBDP-Primärmagneten (a) und recycelten Magneten (b) zeigt. Die Unterschiede in der Tb-Verteilung sind die Hauptursache für die signifikante Abnahme der Koerzitivfeldstärke der recycelten Magnete.

Die optimale GBDP-Mikrostruktur kann jedoch durch einen erneuten Korngrenzendiffusionsprozess wiederhergestellt werden. Um die Koerzitivfeldstärke zu verbessern und die Verluste und Verunreinigungen zu kompensieren, wurde zusätzlich 1 Gew.-% frisches Seltenerd-Hydrid (NdH_2) mit dem recycelten Pulver gemischt, was zu einer Verbesserung der Koerzitivfeldstärke von 1257 kA/m auf 1320 kA/m führte. Für eine weitere Verbesserung der Koerzitivfeldstärke wurde ein GBDP an Recyclingmagneten durchgeführt. Dazu wurde eine dünne Dy-Folie (0,025 mm) auf der Oberfläche der beiden Pole aufgebracht und eine zusätzliche Wärmebehandlung von 6 Stunden bei 900 °C durchgeführt, gefolgt von einem Glühen von 1 Stunde bei 500 °C. Die Ergebnisse zeigten eine Verbesserung der Koerzitivfeldstärke von 1257 kA/m (recycelt ohne GBDP) auf 1901 kA/m (recycelt mit anschließendem GBDP), bei gleichzeitiger nur minimaler Verringerung der Remanenz und Energiedichte. **Abbildung 24** zeigt den Vergleich der magnetischen Eigenschaften der GBDP-Primärmagnete, der Magnete nach der thermischen Entmagnetisierung und der Recyclingmagnete mit unterschiedlichen Zusätzen.

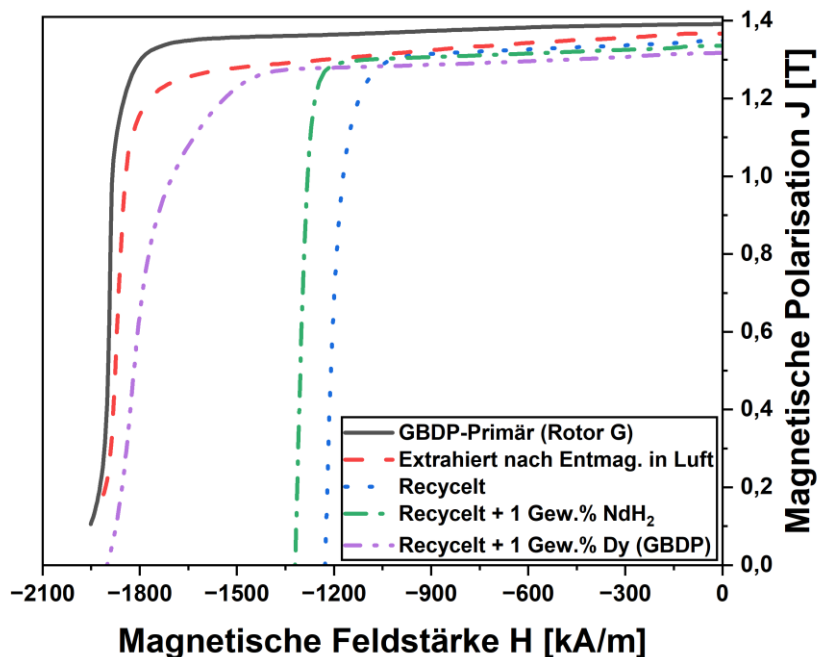


Abbildung 24: Entmagnetisierungskurven von GBDP-Primärmagneten, entmagnetisierten GBDP-Magneten und recycelten Magneten mit durch verschiedene Verfahren optimierten Eigenschaften.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die GBDP Nd-Fe-B-Magnete, welche aus dem Rotor G extrahiert wurden, aufgrund der Aufnahme von Verunreinigungen und thermischer Schäden schlechtere Eigenschaften aufwiesen. Recycelte Magnete, die unter optimalen Sinterbedingungen verarbeitet wurden, wiesen zwar verbesserte Eigenschaften auf, aber immer noch eine geringere Koerzitivfeldstärke als die ursprünglichen Magnete. Verunreinigungen und Veränderungen in der Mikrostruktur und Verteilung der Seltenen Erden trugen zu diesem Rückgang bei. Eine zusätzliche Prozessierung mit frischen Seltenen Erden und eine erneute GBDP-Beschichtung verbesserten die Koerzitivfeldstärke erheblich und zeigten das Potenzial für weitere Optimierungen auf.

Nd-Fe-B-Magnete sind für moderne Schlüsseltechnologien von entscheidender Bedeutung. Aufgrund ihrer herausragenden magnetischen Eigenschaften sind sie in zahlreichen Anwendungen, von Elektrofahrzeugen bis hin zur Unterhaltungselektronik, zu finden. Die Branche steht jedoch vor Herausforderungen, darunter die starke Abhängigkeit von der chinesischen Monopolstellung und möglichen Versorgungsengpässe aufgrund der steigenden Nachfrage, insbesondere im Bereich der Elektromobilität. In Europa und Nordamerika werden Anstrengungen unternommen, um die Abhängigkeit von China zu verringern und die Widerstandsfähigkeit der Lieferkette zu verbessern. Zu den wichtigsten Strategien zur Bewältigung der kritischen Situation bei Seltenen Erden gehören die Substitution, die Erschließung neuer Quellen und die Verbesserung von Recyclingtechnologien. Insbesondere das funktionale Recycling bietet kostengünstigere Magnete und erhebliche Umweltvorteile durch die Verringerung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Primärproduktion.

Jüngste Fortschritte bei den Recyclingtechnologien, sowohl bei den direkten als auch bei den indirekten Verfahren, versprechen eine Verringerung der Versorgungsrisiken und der Umweltauswirkungen. Kontinuierliche Innovationen und Investitionen in die Recycling-Infrastruktur sind entscheidend, um den künftigen Bedarf an Nd-Fe-B-Magneten zu decken und eine stabile Versorgung für neue Technologien zu gewährleisten.

Bei der Bewertung von PMSM-Rotoren im Hinblick auf die Demontage und das Recycling hat eine Analyse von sieben unterschiedlichen Rotoren gezeigt, dass das Rotordesign einen erheblichen Einfluss auf die Demontage- und Recyclingeffizienz hat. Rotoren mit Niedertemperatur-Klebstoffen (Typen A, B, D, E und F) erleichterten die Magnetentnahme und führten im Hinblick auf eine thermische Entmagnetisierung zu stabileren magnetischen Eigenschaften, da sich diese Klebstoffe bereits bei 410 °C zersetzen. Im Gegensatz dazu benötigten Rotoren mit Hochtemperaturklebstoffen (Typen C und G) höhere Temperaturen und hinterließen Klebstoffrückstände, die die Magnetentnahme erschwerten und zu einer stärkeren Verunreinigung führten. Ein wirksamer Korrosionsschutz verbesserte den Erhalt der magnetischen Eigenschaften, indem er das Eindringen von Verunreinigungen während der Wärmebehandlung verringerte. Automatisierte Verfahren wie die Wasserstoffversprödung erwiesen sich als vielversprechend für das Recycling, da sie die Rückgewinnung der Magnete ohne manuelle Extraktion erleichterten.

Anhand der Ergebnisse können folgende Konstruktionsempfehlungen für PMSM-Rotoren abgeleitet werden, welche die Rezyklierbarkeit der enthaltenen Permanentmagnete erhöhen könnten:

- **Verwendung von Niedrigtemperatur-Klebstoffen:** Klebstoffe sollten eine maximale Temperaturbeständigkeit von 410 °C besitzen und sich möglichst vollständig zersetzen, um die Magnetentnahme zu erleichtern und die magnetischen Eigenschaften zu erhalten
- **Vermeidung von Hochtemperatur-Klebern:** Sie erschweren die Extraktion, hinterlassen Rückstände und erhöhen das

Kontaminationsrisiko, wodurch es zu einer Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften kommen kann

- **Korrosionsschutz verwenden:** Korrosionsschutzbeschichtungen minimieren das Eindringen von Verunreinigungen und erhalten die Leistung der Magnete
- **Konstruktion für direkte Wasserstoffversprödung:** Verwendung von Rotoren mit möglichst geringem Klebstoffanteil, um eine effiziente und automatisierte Rückgewinnung des Magnetmaterials zu ermöglichen

Die Recycling-Experimente mit Nd-Fe-B-Magneten zeigen, dass die Prozessparameter einen entscheidenden Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften haben. Recycelte Magnete aus konventionellen primären Nd-Fe-B-Magneten weisen eine ähnliche Dichte und Koerzitivfeldstärke auf wie ihre Ausgangsmagnete, allerdings mit leicht verringerter Remanenz und Energiedichte. Größere Pulver verbessern Remanenz und Energiedichte, verringern aber die Koerzitivfeldstärke. Der Zusatz von Nd-Hydrid kann die Koerzitivfeldstärke erhöhen (**Abbildung 25**).

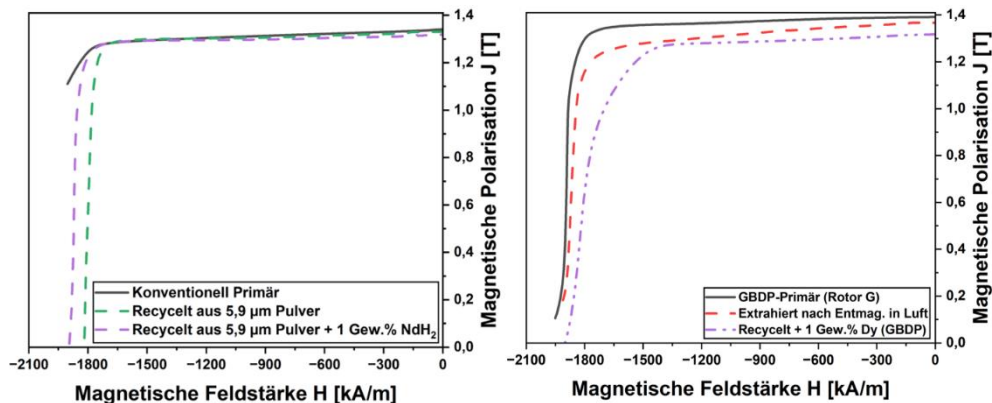


Abbildung 25: Entmagnetisierungskurven konventioneller Nd-Fe-B Magnete und daraus hergestellter Recyclingmagnete (links), sowie Entmagnetisierungskurven primärer GBDP-Magnete, thermisch entmagnetisierter Magnete und daraus hergestellter Recyclingmagnete (rechts).

Bei recycelten Magneten aus GBDP-Magneten sinkt die Koerzitivfeldstärke aufgrund der Aufnahme von Verunreinigungen und der Zerstörung einer besonderen GBDP-Mikrostruktur, welche für eine hohe Koerzitivfeldstärke notwendig ist. Die erneute Anwendung eines GBDP mit schweren Seltenen Erden kann die Koerzitivfeldstärke auf nahezu das ursprüngliche Niveau verbessern (**Abbildung 25**). Obwohl recycelte Magnete eine gewisse Leistungsverschlechterung aufweisen, zeigen Anpassungen bei der Pulvergröße, der Zusammensetzung und zusätzlichen Verarbeitungsschritten das Potenzial, Eigenschaften zu erreichen, die denen neuer Magnete nahekommen, wobei weitere Optimierungen für eine verbesserte Wirksamkeit und Nachhaltigkeit erforderlich sind.

- Adamas 2022 Adamas Intelligence, Rare earth magnet market outlook to 2035, 2022
- Arsi 2018 P.S. Arshi, E. Vahidi, F. Zhao; Behind the scenes of clean energy – The environmental footprint of rare earth products; ACS Sustainable Chemistry Engineering, 6, 3, 3311-3320, 2018
- Amato 2019 Amato, A., A. Becci, I. Birloaga, I. De Michelis, F. Ferella, V. Innocenzi, N. M. Ippolito, C. Pillar Jimenez Gomez, F. Vegliò, and F. Beolchini. "Sustainability Analysis of Innovative Technologies for the Rare Earth Elements Recovery." Renewable and Sustainable Energy Reviews 101: 1-13, 2019
- Binnemans 2013 K. Binnemans, P.T. Jones, B. Blanpain, T. van Gerven, Y. Yang, A. Walton, M. Buchert; Recycling of rare earths: A critical review; Journal of Cleaner Production, 51, 1-22, 2013
- Diehl 2018 O. Diehl, M. Schönfeldt, E. Brouwer, A. Dirks, K. Rachut, J. Gassmann, K. Güth, A. Buckow, R. Gauß, R. Stauber, O. Gutfleisch; Towards an alloy recycling of Nd-Fe-B permanent magnets in a circular economy; Journal of Sustainable Metallurgy, 4, 163-175, 2018
- Gauß 2021 R. Gauß, C. Burkhardt, F. Carencotte, M. Gasparon, O. Gutfleisch, I. Higgins, M. Karajic, A. Klossek, M. Mäkinen, B Schäfer, R. Schindler, B. Veluri; Rare earth magnets and motors: A European call for action. A report by the rare earth magnets and motors cluster of the European Raw Materials Alliance, Berlin 2021
- Gutfleisch 2011 O. Gutfleisch, M. A. Willard, E. Brück, C. H. Chen, S. G. Sankar, and J. P. Liu, "Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient," Adv. Mater., vol. 23, no. 7, pp. 821–842, 2011
- Gutfleisch 2013 O. Gutfleisch, K. Güth, T.G. Woodcock, L. Schultz; Recycling used Nd-Fe-B sintered magnets via a hydrogen-based route to produce anisotropic, resin bonded magnets; Advanced Energy Materials, 3, 2, 151-155, 2013
- Jin 2016 H. Jin, P. Afiuny, T. McIntyre, Y. Yih, J.W. Sutherland; Comparative life cycle assessment of NdFeB magnets: Virgin production versus magnet-to-magnet recycling; Procedia CIRP, 48, 45-50, 2016
- Jin 2018 H. Jin, P. Afuny, S. Dove, G. Furlan, M. Zakotnik, Y. Yih, J.W. Sutherland; Life cycle assessment of neodymium-iron-

boron magnet-to-magnet recycling for electric vehicle motors; Environmental Science and Technology, 52, 6, 3796-3802, 2018

- Roskill 2019 Rare earths: Outlook to 2029, 19th edition, Roskill Information Service Ltd., ISBN 978 1 910922 80 4
- Schönfeldt 2023 M. Schönfeldt, U. Rohrmann, P. Schreyer, M. Hasan, K. Opelt, J. Gassmann, A. Weidenkaff, O. Gutfleisch; Magnetic and structural properties of multiple recycled and sustainable sintered Nd-Fe-B magnets; Journal of Alloys and Compounds, 939, 168709, 2023
- Sprecher 2014 B. Sprecher, Y. Xiao, A. Walton, J. Speight, R. Harris, R. Kleijn, G. Visser, G.J. Kramer; Life cycle inventory of the production of rare earth and the subsequent production of NdFeB rare earth permanent magnets; Environmental Science and Technology, 48, 7, 3951-3958, 2014
- Walachowicz 2014 F. Walachowicz, A. March, S. Fiedler, M. Buchert, J. Sutter, C. Merz; Verbundprojekt: Recycling von Elektromotoren – MORE, Teilprojekt: Ökobilanz der Recyclingverfahren; 2014
- Xiao 2023 Xiao, F., Hu, W., Zhao, J., and Zhu, H. "Technologies of Recycling REEs and Iron from NdFeB Scrap." Metals 13: 779, 2023
- Yang 2017 Y. Yang, A. Walton, R. Sheridan, K. Güth, R. Gauß, O. Gutfleisch, M. Buchert, B.M. Steenari, T van Gerven, P.T. Jones, K. Binnemans; REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: A critical review; Journal of Sustainable Metallurgy, 3, 122-149, 2017
- Yue 2019 M. Yue, X. Yin, W. Liu, Q. Lu; Progress in recycling of Nd-Fe-B sintered magnet wastes; Chinese Physics B, 28, 7, 077506, 2019
- Zapp 2022 Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., and Kuckshinrichs, W. "Environmental Impacts of Rare Earth Production." MRS Communications 12, no. 1 (2022): 1–16, 2022
- Zhang 2020 Zhang, Y., Gu, F., Su, Z., Liu, S., Anderson, C., and Jiang, T. "Hydrometallurgical Recovery of Rare Earth Elements from NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Review." Metals 10, no. 6 (2020): 841, 2020

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2020)

| Nr. | Titel |
|-----|--|
| 324 | Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020 |
| 325 | Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020 |
| 326 | Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020 |
| 327 | Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020 |
| 328 | Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020 |
| 329 | Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020 |
| 330 | Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020 |
| 331 | Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashsimulation, 2020 |
| 332 | Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashsimulation, 2020 |
| 333 | Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation, 2020 |
| 334 | Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020 |
| 335 | Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020 |
| 336 | Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020 |
| 337 | Analyse von neuen Zell-Technologien und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem Batteriepack, 2020 |
| 338 | Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten von Al-Druckgusskomponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashsimulation, 2020 |
| 339 | Stochastisches Bruchverhalten von Glas, 2020 |
| 340 | Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2021 |
| 341 | Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge, 2021 |
| 342 | Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030, 2021 |
| 343 | Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process, 2021 |
| 344 | Review of non-exhaust particle emissions from road vehicles, 2021 |
| 345 | Ganzheitliche Betrachtung von Rollwiderstandsverlusten an einem schweren Sattelzug unter realen Umgebungsbedingungen, 2021 |
| 346 | Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss, 2021 |

- 347 Typgenehmigungsanforderungen an Level-3-Autobahnssysteme - Hintergrundbetrachtungen zu technischen Anforderungen für eine automatisierte Fahrfunktion, 2021
- 348 Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung, 2021
- 349 Verstärkung dünner formgehärteter Bauteile mittels FVK-Verrippungen, 2021
- 350 HMI Anforderungen für den automatisierten Individualverkehr unter Berücksichtigung von Leistungsmöglichkeiten und -grenzen älterer Nutzer, 2021
- 351 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2021
- 352 Entwicklung einer gewichtsoptimierten Batteriegehäusestruktur für Volumenfahrzeuge, 2021
- 353 Charakterisierung und Modellierung des Deformations- und Versagensverhaltens von nicht-faserverstärkten Thermoplasten unter mehrachsiger Crashbelastung, 2021
- 354 Untersuchung zum thermischen Komfort im Pkw für den Grenzbereich des Luftzugempfindens, 2021
- 355 Anforderungen an die Güte, Verfügbarkeit und Vorausschau einer Reibwertschätzung aus Funktionssicht, 2021
- 356 Entwicklung einer standardisierten Prüfanordnung zur Bewertung der Übernahmeleistung beim automatisierten Fahren, 2022
- 357 Vorstudie zu Verkehrsemissionen - Räumlich und zeitlich aufgelöste Daten durch Schwarmmessungen, 2022
- 358 Produktivitätssteigerung und Kostensenkung der laser-additiven Fertigung für den Automobilbau, 2022
- 359 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen mit Fokus auf den Ventilationswiderstand von Nfz-Rädern, 2022
- 360 Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der thermischen Behandlungen beim Lackieren im Prozess bei hochfesten Werkstoffen, 2022
- 361 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2022
- 362 Ermüdung kurzfaserverstärkter thermoplastischer Polymerwerkstoffe, 2022
- 363 Market research and definition of procedure to comparison of comfort measuring systems for a vehicle cabin, 2022
- 364 Methodische Ansätze zur Auswahl von Bordnetzstrukturen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen, 2022
- 365 Fahrwiderstand von Lenk- und Liftachsen in Kurven und auf gerader Strecke unter realen Umgebungsbedingungen, 2022
- 366 Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen, 2022
- 367 Experimentelle und numerische Untersuchung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen mit konstanten und variablen Amplituden und Entwicklung einer Bewertungsmethode, 2022
- 368 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process – Part 2, 2023
- 369 Level 2 hands-off – Recommendations and guidance, 2023
- 370 Funktionale Sicherheitsbewertung und Cybersecurity Analysen relevanter Use Cases für die Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2023

- 371 Study on the technical evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal data in the automotive sector, 2023
- 372 Legal evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal and non-personal data in the automotive sector, 2023
- 373 Quantifizierung der mechanischen Belastbarkeit von Infrarot-Schweißverbindungen in zyklisch belasteten Thermoplast-Bauteilen, 2023
- 374 Lebensdauerbewertung von geschweißten Verbindungselementen unter Montagevorspannung, 2023
- 375 Einfluss verschiedener Scherschneidparameter auf die elektro-magnetischen Eigenschaften von NO-Elektroblech automobiler Traktionsantriebe, 2023
- 376 Automatisierte Demontage von Traktionsmotoren der E-Mobilität - Eine Studie zur Optimierung der Demontage, 2023
- 377 Untersuchungen zum Einfluss von feuchtem Wasserstoff auf die Spannungsrisskorrosionsempfindlichkeit von Aluminium-Legierungen für den Einsatz in Brennstoffzellenfahrzeugen, 2024
- 378 Diagnosekonzepte für zonale und teilredundante Bordnetzarchitekturen, 2024
- 379 Dynamische Erfassung und Beurteilung von Situationsbewusstsein im Kontext des automatisierten Fahrens, 2024
- 380 Charakterisierung zukunftssträchtiger Zellmaterialien im Hinblick auf deren Anforderungen an das Batteriepack, 2024
- 381 Fahrdynamik des Automatisierten Fahrens, 2024
- 382 Forschungsperspektiven für Mobilität in klimaneutralen Städten 2045 - Explorative Szenarioanalyse und innovationspolitische Handlungsempfehlungen, 2024
- 383 Codierung und Analyse der AO-Klassifikation für Fuß- und Sprunggelenksverletzungen zur Evaluation potentieller Langzeitfolgen, 2024
- 384 EMV-Nachweis der Störfestigkeit auf Komponenten- und Systemebene für FailOp ab Level 3 im Hinblick auf die Funktionssicherheit - Erster Projektteil, 2024
- 385 Retrospektive Berechnung des Crashpulses aus Fahrzeugdeformationen basierend auf EES-Berechnung von Fahrzeug-Voxelmodellen unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes, 2024
- 386 Energieverluste infolge von Rad-/Achsfelstellungen am schweren Sattelzug bei realen Umgebungsbedingungen, 2025
- 387 Recycling von Permanentmagneten und Bewertung der Rezyklierbarkeit von Permanentmagnet-Synchronmotoren, 2025

Impressum

| | |
|-------------|---|
| Herausgeber | FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de |
| ISSN | 2192-7863 |
| Copyright | Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2025 |

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik