

Produktionsnahe Messtechnik für Sensor- und Motormagnete

Dr. Rolf Slatter¹, Dipl.-Ing. Bernd Böhle¹

¹ELSOMA GmbH, Kurzer Morgen 7, 58239 Schwerte
rolf.slatter@elsoma.de, bernd.boehle@elsoma.de

Zusammenfassung

Die steigende Nachfrage nach Dauermagneten in den Bereichen Elektromobilität und Industrieautomation führt zu einem erhöhten Bedarf an produktionsintegrierten Messgeräten als notwendige Ergänzung zu herkömmlichen laborgestützten Geräten, wie z.B. 3D-Magnetmappern.

Bei der Wahl des Messverfahrens müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden. Für die Entwicklung und Prüfung unter Laborbedingungen erhöhen Geräte mit verbesserter Genauigkeit die Größenordnung der Genauigkeit. Für die Seriencharakterisierung sind zerstörungsfreie Messverfahren wirtschaftlicher und werden eher eingesetzt. Bei der Qualitätskontrolle in der Massenproduktion sind wirtschaftliche Faktoren (d. h. die Kosten als eine Funktion des Durchsatzes und der Messdauer pro Magnet) und die erforderliche Genauigkeit von besonderer Wichtigkeit.

Mit kompakten, tragbaren Flussdichtemessgeräten können sowohl die Flussdichte als auch die Magnetisierungsrichtung überprüft werden, bevor die Magnete am Rotor befestigt werden bzw. bevor Sensormagnete endmontiert werden. Es ist auch möglich, Magnete zu klassifizieren, damit Magnete mit ähnlichen Eigenschaften zusammengebaut werden, um eine schlechte Motorleistung zu vermeiden. Diese Geräte können entweder manuell oder als Teil einer automatisierten Produktionslinie verwendet werden. Wichtig ist, dass die Geräte einfach zu bedienen sind und keine speziellen Kenntnisse erfordern, um sie effektiv zu nutzen. Potenzielle Nutzer sind sowohl Motor- als auch Sensorhersteller.

Keywords: Magnetische Messtechnik, Dauermagnete, magnetische Sensoren, Elektromotoren

Einleitung

Ein Dauermagnet, oft auch Permanentmagnet genannt, ist ein Magnet, der seine magnetische Wirkung dauerhaft (permanent) ohne Energiezufuhr aufrechterhalten kann. Dauermagnete besitzen an ihrer Oberfläche je einen oder mehrere Nord- und Südpole.

Der Anwendungsbereich von Dauermagneten ist äußerst breit. Sie sind in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt, der Akustik, der Telekommunikation, der Energieerzeugung und vielen anderen Bereichen unverzichtbar geworden.

Physikalisch gesehen ist ein Dauermagnet ein metastabiles System. Schwankungen bei der chemischen Zusammensetzung und bei der Verarbeitung können zu Schwankungen der magnetischen Eigenschaften führen. Um die optimale Leistung für die jeweilige Anwendung zu erzielen, ist eine sorgfältige Kontrolle der unbearbeiteten Teile und der fertig bearbeiteten Magnete unverzichtbar.

In diesem Beitrag werden die gebräuchlichsten Messverfahren für die magnetischen Eigenschaften von Dauermagneten vorgestellt sowie ihre Vorteile und Grenzen erläutert. Dabei liegt der Fokus auf produktionsnahen Verfahren und Geräten, die bei der Wareneingangs- oder Wareneingangsprüfung bzw. bei In-Line Prüfungen benutzt werden können.



Abb. 1: ELSOMA C10 Flussdichtemessgerät bei der Wareneingangsprüfung von Motormagneten

Dauermagnete sind überall

Aufgrund ihrer starken Magnetkräfte werden Dauermagnete in vielen unterschiedlichen Bereichen eingesetzt. Die Anwendungsmöglichkeiten sind so vielfältig wie die Magnete selbst. Von der Industrie über den Haushalt bis hin zur Technik und zum Bauwesen – überall finden sich Einsatzbeispiele für Dauermagnete. Zum Beispiel werden Dauermagnete häufig in der Elektronik und in der Industrie eingesetzt. Sie können beispielsweise in Motoren, Generatoren oder Sensoren verwendet werden [1].

Auch in Haushaltsgeräten wie Staubsaugern oder Kühlschränken finden sich Dauermagnete. Permanentmagnete gibt es in unterschiedlichen Ausführungen und Größen. Sie können unter anderem als Ringmagnete, Scheibenmagnete, Quadermagnete oder Stabmagnete hergestellt werden.

Dauermagnete werden heute mithilfe spezieller Legierungen aus Metallen wie z. B. Eisen (Fe), Nickel (Ni) und Aluminium (Al) mit Zusätzen aus Kobalt (Co), Mangan (Mn) und Kupfer (Cu) hergestellt. Trotz der Vielzahl an Werkstoffen haben sich aus anwendungstechnischen und preislichen Gründen nur drei Werkstoffgruppen durchgesetzt: keramische Magnete wie z. B. Hartferrite, metallische Magnete wie z. B. Al-NiCo und kunststoff- bzw. gummigebundene Magnete.

Durch das Sinterverfahren werden besonders starke Dauermagnete, wie z. B. Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) und Samarium-Cobalt (SmCo) hergestellt. Diese Stoffe (Neodym und Samarium) gehören zu den sogenannten Seltenmetallen. Das Element Neodym besitzt dabei die stärkste magnetische Kraft aller bekannten Materialien und ist damit auch einer der am häufigsten verwendeten Permanentmagnete. Das Sinterverfahren jedoch begrenzt die Formflexibilität des Magnets und spritzgossene, kunststoffgebundene Magnete bieten eine hohe Freiheit bei der Magnetgeometrie, wenn auch bei etwas abgeschwächten magnetischen Eigenschaften.

Steigende Anforderungen an Mess- und Prüftechnik

Über die Anwendungsbereiche hinweg steigen die Qualitätsanforderungen an Dauermagneten. Im Bereich der Sensorik steigen die Anforderungen an die Genauigkeit von magnetischen Messsystemen, bestehend aus Magnetsensoren und Dauermagneten als Maßverkörperung, stetig. Drehgeber oder Motor-Feedback-Systeme müssen eine immer höhere

Präzision leisten, um entweder eine genauere Positionierung zu realisieren beziehungsweise einen besseren Wirkungsgrad und geringere Drehmoment-Rippel zu ermöglichen.

Bei Magneten für Elektromotoren gibt es eine ähnliche Entwicklung. Die Gleichmäßigkeit und Richtung der Magnetisierung bei Segmentmagneten hat einen großen Einfluss auf das Geräusch- und Schwingungsverhalten (NVH), und gerade im Fahrzeugbereich steigen die Anforderungen aktuell stark an.

Diese Anforderungen stellen neue Ansprüche nicht nur an die eingesetzten Sensoren, sondern auch an die verwendeten Magnete und folge dessen an die eingesetzte Messtechnik bei Wareneingangs- und Warenausgangsprüfungen entlang der Wertschöpfungskette.

Bei der Wahl des Messverfahrens müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden. Für die Entwicklung und Prüfung unter Laborbedingungen erhöhen Geräte mit verbesserter Genauigkeit die Größenordnung der Genauigkeit. Für die Seriencharakterisierung sind zerstörungsfreie Messverfahren wirtschaftlicher und werden eher eingesetzt. Bei der Qualitätskontrolle in der Massenproduktion sind wirtschaftliche Faktoren (d. h. die Kosten als eine Funktion des Durchsatzes und der Messzeit pro Magnet) und die erforderliche Genauigkeit von besonderer Wichtigkeit. Auf Basis der relativen Bedeutung dieser Faktoren während des Lebenszyklus des Produktes kommen sehr unterschiedliche Verfahren und Geräte zum Einsatz [2, 3, 4].



Abb. 2: Fluxmeter mit Helmholtzspule

In frühen Entwicklungsphasen, wo es primär um Materialforschungsaufgaben geht, werden häufig Vibrationsmagnetometer (VSM: vibrating sample magnetometer) benutzt. Es handelt sich dabei um ein Magnetometer zur Bestimmung magnetischer Eigenschaften (z. B.

des magnetischen Moments) einer Probe. Die zu untersuchende Probe wird in periodische Schwingungen versetzt und die so induzierte Spannung gemessen.

Für die Messung der magnetischen Feldstärke und der magnetischen Induktion ist ein Flussdichtemessgerät bzw. Feldstärkenmessgerät mit Hallsonde seit längerem das am häufigsten eingesetzte Gerät. Die Verwendung von Helmholtzspulen (**Abb. 2**) zur Messung der Remanenz in offenen Kreisen und des magnetischen Moments macht dieses Gerät in Labors und bei der Eingangskontrolle von Magneten allgegenwärtig [5, 6]. Wenn die Homogenität und die 3D-Komponenten des Magnetfelds erfasst werden müssen, kommen 3D-Magnetmapper zum Einsatz (**Abb. 3**) [7]. Solche Geräte jedoch sind eher für den Laboreinsatz konzipiert und sollen unter eng kontrollierten Umgebungsbedingungen eingesetzt werden. Für produktionsnahe Messungen geht es eher um Robustheit, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit, was zu dem Einsatz von anderen Messgerätypen führt.



Abb. 3: 3D magnetische Mapper

Flussdichtemessgeräte für produktionsnahe Messungen

Die Messung magnetischer Größen können fast immer auf die Messung eines magnetischen Flusses zurückgeführt werden. Daher ist ein Flussdichtemessgerät (engl. Fluxmeter) das vielseitigste Messgerät in der Magnettechnik [4]. Um den besonderen Anforderungen von produktionsnahen magnetischen Messungen gerecht zu sein, hat die ELSOMA GmbH mit Sitz in Schwerte bei Dortmund sich spezialisiert auf die Entwicklung von Flussdichtemessgeräten für stationäre und winkelbasierte Messungen.

Beispielhaft ist das ELSOMA C10 (**Abb. 1**), ein modulares Gerät, das eine Vielzahl von Mess-

aufgaben im Produktionsumfeld erledigen kann. Bei scheibenförmigen oder rechteckigen Dipolmagneten, wie sie sehr oft für on- und off-axis-Winkelmessung oder für Schaltvorgänge eingesetzt werden, können Werkstoffinhomogenitäten oder Fertigungsfehler zu einer asymmetrischen Magnetisierung oder zu inhomogenem Magnetfeldverlauf führen. Mit dem C10 Flussdichte-Messgerät werden solche Fehler deutlich schneller erfasst als bei bisherigen Lösungen, wie z. B. Helmholtz-Spulen.

Diese tragbare Lösung ist flexibel einsetzbar für Wareneingangs- und Wareenausgangsprüfungen sowie im Servicebereich. Der Konfiguration ist sehr bedienerfreundlich und die Auswertung der Messergebnisse erfolgt mittels Webinterface.

Das zu prüfende axial- oder radialmagnetisierte Bauteil wird dabei typischerweise in eine spezifische Vorrichtung eingelegt (**Abb. 4**). Ein spezieller, hochempfindlicher und präziser 3D-Sensorchip erfasst alle drei magnetischen Feldkomponenten mit nur einer Messung. Das Messgerät stellt dem Anwender sowohl die Flussdichtekomponenten als auch die Raumwinkel des Flussdichtevektors zur Verfügung. Damit werden magnetische Fehlwinkel an Magneten schnell und präzise überprüft.

Eine einfache und flexible Integration in automatisierte Fertigungsanlagen ermöglicht das mit einem Akku ausgestattete tragbare C10 Flussdichte-Messgerät mittels Ethernet- und USB-Schnittstellen sowie digitalem E/A-Interface. Ein Browser User Interface unterstützt die schnelle Konfiguration des Geräts sowie die Visualisierung von Messergebnissen. Kundenspezifische Software-Erweiterungen sind jederzeit möglich. Ein interner Datenspeicher vereinfacht die Überwachung von Messreihen zur Qualitätssicherung oder Wareneingangskontrollen. Diese Messreihen können mittels der Netzwerkschnittstelle problemlos abgerufen werden.

Neben den o.g. Vorrichtungen mit 3D-Sonde bietet ELSOMA eine breite Palette an weiteren axialen und transversalen Mess-Sonden zur Erweiterung des Messgeräts an. Mithilfe dieser Sonden können Flussdichten im Bereich $10 \mu\text{T}$ bis 5T mit einer Auflösung bis $1 \mu\text{T}$ und einem Messfehler kleiner 1% erfasst werden.



Abb. 4: ELSOMA C10 Flussdichtemessgerät mit Messvorrichtung

Der Bedarf an magnetischen Winkelmess-Systemen bzw. magnetischen Drehgebern nimmt kontinuierlich zu. Somit steigt auch der Bedarf an schneller, präziser Messtechnik zur Überprüfung und Sicherung der Qualität der eingesetzten zwei- und mehrpoligen Ring- und Zylindermagneten.

Dabei muss die Flussdichte des Magnetfelds an mehreren kodierten Spuren präzise, produktiv und kosteneffektiv erfasst werden. Hier kommt das CE-gekennzeichnete Flussdichtemessgerät ELSOMA A05 für winkelbasierte Messungen zum Einsatz. Das Gerät verfügt über einen speziellen, hochempfindlichen und präzisen 3D-Sensorchip zur Erfassung von allen drei magnetischen Feldkomponenten mit nur einer Messung (Abb. 5).



Abb. 5: ELSOMA A05 winkelbasiertes Flussdichtemessgerät

Der zu prüfende Magnet wird mittels Wechsellagerung auf einer Antriebswelle mit spielfreier vorgespannter Lagerung aufgenommen. Diese Welle wird mittels Zahnriemen angetrieben, um einen eventuellen Störfeld einfluss des Motors zu vermeiden. Der Drehwinkel der Welle wird mittels hochauflösendem optischen

Winkelmesssystem als Referenzmesssystem erfasst (Abb. 6).

Der werkskalibrierte 3D-Hall-Sensor misst die Flussdichte mit einer Auflösung von $10 \mu\text{T}$ und einer Messunsicherheit von kleiner $\pm 1,25 \%$.

Individuelle Softwarelösungen zur Auswertung der Messergebnisse sind realisierbar und kundenspezifische Anpassungen und Erweiterungen sind jederzeit möglich. Das Gerät ist flexibel bei Wareneingangs- oder Warenausgangsprüfungen einsetzbar, da mehrere Schnittstellen die Einbindung in automatisierten Fertigungsanlagen vereinfachen.

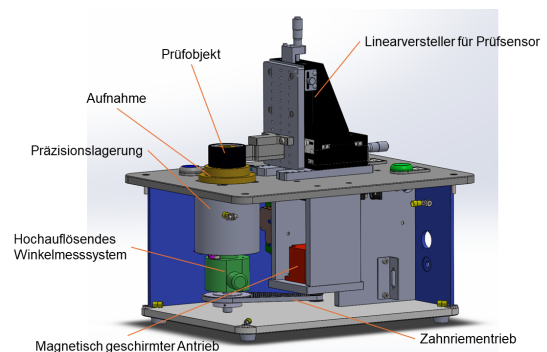


Abb. 6: Interner Aufbau des ELSOMA A05 winkelbasierten Flussdichtemessgeräts

Es erstellt Messprotokolle gemäß der neuen DIN SPEC 91411 „Anforderungen an die technische Darstellung von magnetischen Maßkörperungen in Konstruktionszeichnungen“ [8]. Dabei sind Messgrößen wie Pollängen- oder Pollageabweichungen neben Flussdichteabweichungen mess- und darstellbar (Abb. 7).

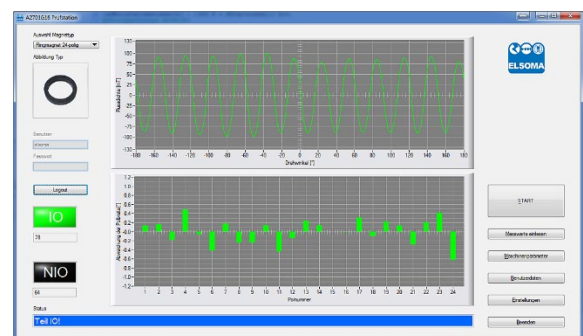


Abb. 7: Auswertung gemäß DIN SPEC 91411

Die C10 und A05 Flussdichte-Messgeräte sind ideal geeignet für Messaufgaben bei Firmen in den folgenden Anwendungsbereichen:

- Magnethersteller
- Magnetanwender
- Drehgeberhersteller
- Sensorhersteller
- Motorhersteller
- Automobil-Zulieferer

Ausblick

Begünstigt durch den deutlich gestiegenen Bedarf an Magneten für Elektromotoren sowie für Sensoren gibt es aktuell sehr viel Innovation im Bereich der Magnettechnik. Neue magnetische Legierungen mit geringeren Anteilen (oder keine) Seltenerdwerkstoffe werden entwickelt [1] und auch neue Fertigungsverfahren, z. B. Sputtern von hartmagnetischen Schichten, erreichen Serienreife [7, 9, 10].

Last, but not least, führen neue Applikationen zu ganz neuen Anforderungen an Magnete und die damit verbundene Messtechnik. Es wird nicht langweilig für die Hersteller von magnetischen Messgeräten.

Aktuell entwickelt ELSOMA eine neue Generation an noch präziseren Flussdichtemessgeräten, angelehnt an die Anforderungen der neuen DIN SPEC 91479 „Charakterisierung Maßverkörperungen für magnetische Weg- und Winkelmeßsysteme“. Dabei muss weiterhin die Wirtschaftlichkeit beibehalten werden, um solche Geräte in einem Produktionsumfeld einsetzen zu können.

Literatur

- [1] Gauß, R. & Gutfleisch, O., „Magnetische Materialien – Schlüsselkomponenten für neue Energietechnologien“ in Kausch, P. et al, Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung – Die nächsten 50 Jahre, Springer Verlag, Berlin, 2016
- [2] Kausch, P. et al, Rohstoffwirtschaft und gesellschaftliche Entwicklung – Die nächsten 50 Jahre, Springer Verlag, Berlin, 2016
- [3] Möwius, S., Kropff, N., & Velicescu, M., „Measurement technologies for permanent magnets“, ACTA IMEKO, December 2018, Volume 7, Number 4, s. 15-20
- [4] Trout, S., „Magnetic Testing of Bonded Magnets“, NATO/ ARW Conference on Bonded Magnets, August 22.-23., 2002, Newark, USA
- [5] Cassing, W. et al, Dauermagnete: Mess- und Magnetisieretechnik, Expert Verlag, Renningen, 2007
- [6] Popovic, D. P. et al, „An overview of commercially available teslameters for applications in modern science and industry“, ACTA IMEKO, April 2017, Volume 6, Number 1, s. 1-7
- [7] Rivera, S. & Slatter, R., „Pole positioning for precise magnetic measurement systems“, 26th IMEKO TC4 International Symposium, Pordenone, Italy, September 20.-21. 2023
- [8] Gerber, J. & Slatter, R., „DIN SPEC 91411: A standardized representation of magnetic scales“, 26th IMEKO TC4 International Symposium, Pordenone, Italy, September 20.-21. 2023
- [9] Croat, J. J. & Ormerod, J. (Hrsg.), Modern Permanent Magnets, Woodhead Publishing, Kidlington (UK), 2022
- [10] Wu, C. & Jin, J., Frontiers in Magnetic Materials – From Principles to Material Design and Practical Applications, CRC Press, Boca Raton (USA), 2023