DEUTSCHER SCHRAUBENVERBAND E.V.
HERSTELLER MECHANISCHER VERBINDUNGSELEMENTE

DSV - Information

Handhabung des Restmagnetismus von Verbindungselementen für die Automobilindustrie

Stand: März 2019

Inhalt

1. Vorwort ... 3

2. Anwendungsbereich ... 3

3. Grundlagen ... 3

3.1. Magnetische Eigenschaften von Festkörpern ... 3

3.2. Einflüsse auf den Grad der verbleibenden Magnetisierung – Restmagnetismus 5

3.3. Verfahren zur Entmagnetisierung ... 6

3.4. Messung des Restmagnetismus ... 7

4. Einflüsse des Produktionsprozesses auf den Grad des Restmagnetismus ... 9

5. Lagerung und Transport ... 12

6. Grenzwerte ... 12

7. Kostenbetrachtung ... 13

8. Literatur ... 14

1. Vorwort

Zunehmend spielen der Magnetisierungsgrad und die Technische Sauberkeit eine Rolle bei Verbindungselementen. Um hier eine Basis für den betrieblichen Alltag anzubieten wurde diese Richtlinie erstellt.

2. Anwendungsbereich

Diese Richtlinie dient der Information zur Bewertung der magnetischen Zustände von Verbindungselementen aus magnetisierbaren Eisenwerkstoffen, insbesondere aus:

- ferritischen Kaltstauch- und Kaltfließpressstählen z.B. nach DIN EN 10263-4,
- ferritischen korrosionsbeständigen Stählen z.B. nach DIN EN 10263-5,
- austenitisch-ferritische korrosionsbeständige Stähle, z.B. nach DIN EN 10263-5.

Die in dieser Richtlinie betrachtete physikalische Kenngröße ist die remanente magnetische Flussdichte B_R, die auch mit dem Begriff „Restmagnetisierung“ bezeichnet wird.
Diese Richtlinie wurde insbesondere für Verbindungselemente wie Schrauben erstellt. Sie kann jedoch sinngemäß auch auf von Schrauben abweichende Bauteile aus magnetisierbaren Werkstoffen, wie bspw. Muttern und Scheiben, angewendet werden. Die Richtlinie kann auf Verbindungselemente im wärmebehandelten und im nicht wärmebehandelten Zustand angewendet werden.

3. Grundlagen

3.1. Magnetische Eigenschaften von Festkörpern

Der Elektromagnetismus ist eine der vier Grundkräfte der Physik neben der Gravitation, der starken und der schwachen Wechselwirkung und hat eine fundamentale Bedeutung, auch für unser tägliches Leben.

Der Magnetismus wird in der Technik häufig getrennt betrachtet und stellt einen Spezialfall des Elektromagnetismus dar. Der Magnetismus setzt eine Relativbewegung elektrischer Ladungen voraus, entweder durch die Translation bspw. von Elektronen in einem Leiter oder deren „Eigenrotation“, den Spin. Eine Parallelstellung des Elektronenspins benachbarter Atome wird durch quantenmechanische Austauschkräfte begünstigt. Betrag und Vorzeichen der Austauschkräfte hängen u.a. vom Atomabstand ab und nehmen für die Elemente Fe, Co, Ni, Gd, Dy und Er sowie einiger Legierungen und Verbindungen (bspw. Cu_2MnAl, CrO_2) Werte an, die makroskopisch zu dem bekannten Phänomen des Ferromagnetismus führen. Das heißt praktisch, das diese Stoffe magnetisierbar sind.

Da Verschiebungen elektrischer Ladungsträger Magnetfelder erzeugen, wird jeder stromdurchflossene Leiter von einem Magnetfeld umgeben. Dabei erzeugt ein Strom I in einem geraden Leiter ein Magnetfeld mit konzentrischen Feldlinien, deren magnetische Feldstärke H respektive Flussdichte B mit zunehmender Entfernung vom Leiter abnimmt,

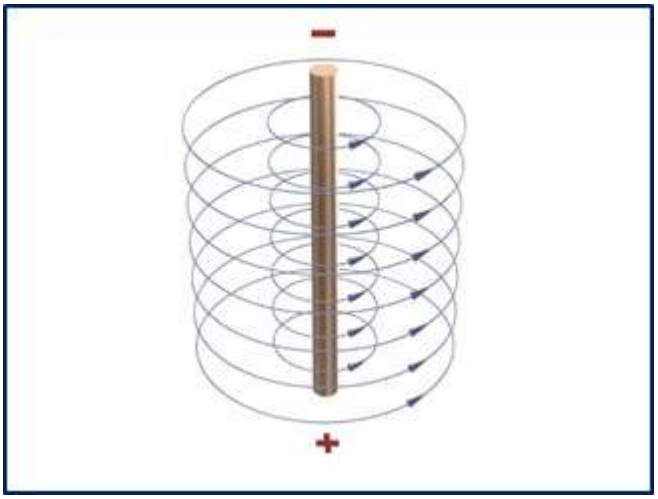

Bild 1: Magnetfeld um einen elektrischen Leiter

wobei die Feldstärke als Maß für die Stärke des Magnetfelds und die Flussdichte als Maß für die Induktionswirkung angesehen werden können.

Im Vakuum gilt der Zusammenhang

$$B = \mu_0 \times H$$

mit μ_0 = magnetische Feldkonstante (μ_0 = 1,2566371x10^{-6} Vs/Am).

Wird der Leiter zu einer Spule gewickelt und ist die Länge diese Spule im Vergleich zum Durchmesser groß, so ist das magnetische Feld in ihrem Inneren homogen und seine Stärke H proportional zur Stromstärke I und zur Windungszahl N sowie reziprok proportional zur Länge L:

$$H = \frac{I \times N}{L}$$

mit der physikalischen Einheit A/m.

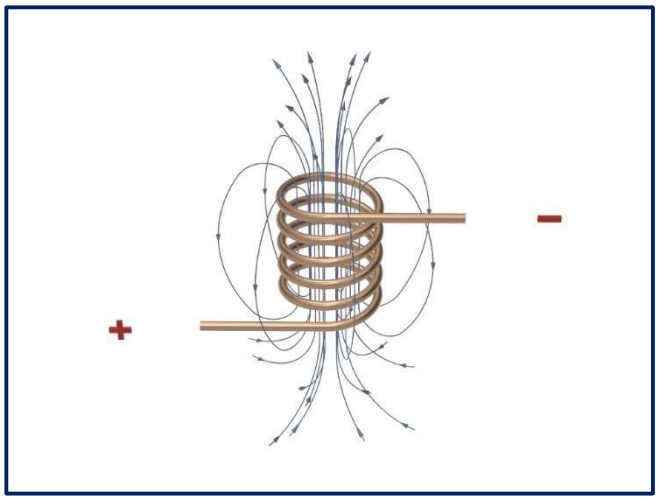

Bild 2: Magnetfeld im Bereich einer stromdurchflossenen Spule

3.2. Einflüsse auf den Grad der verbleibenden Magnetisierung – Restmagnetismus

Alle Stoffe erzeugen ein magnetisches Moment, wenn diese unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfelds stehen. Dieses magnetische Moment kann dem äußeren magnetischen Feld entgegengerichtet oder gleichgerichtet sein. Im ersten Fall spricht man von Diamagnetismus, im zweiten vom Paramagnetismus. Einige Stoffe können auch ohne ein äußeres Magnetfeld ein spontanes Magnetfeld besitzen, das nicht proportional zum äußeren Feld ist und auch ohne ein solches existieren kann. Das heißt, dass diese Stoffe magnetisierbar sind und somit die Eigenschaft „magnetisch“ annehmen können. Zwischen dem äußeren Magnetfeld H und der induzierten magnetischen Flussdichte B besteht der Zusammenhang gemäß folgender Formel:

$$B = \mu_0 \times \mu_R \times H$$

mit μ_R = Permeabilitätszahl.

Die Permeabilitätszahl ist einheitslos und beträgt im Vakuum 1, bei paramagnetischen bis zu etwa 1,1 und ist bei diamagnetischen Stoffen grob etwa um 10^{-5} geringer als 1. Bei ferromagnetischen Stoffen ist die Permeabilitätszahl $\mu_R >> 1$ und nicht proportional zur Feldstärke H (*s. Bild 3*).

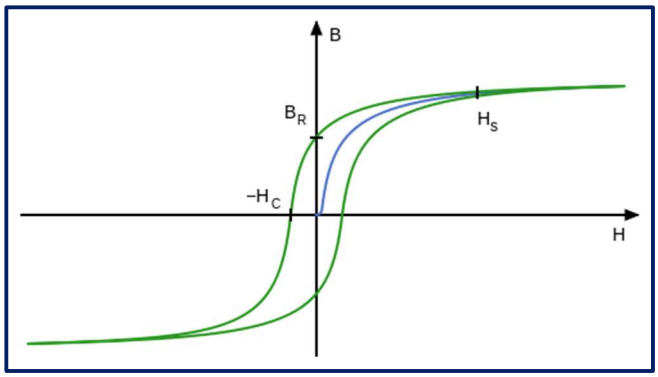

Bild 3: Magnetisierungskurve eines ferromagnetischen Werkstoffs.
Quelle: Walter Dvorak, wikimedia gemeinfrei

Die meisten ferromagnetischen Stoffe behalten einen Teil der Magnetisierung auch ohne äußeres Magnetfeld bei. Die dann vorhandene Flussdichte wird mit Remanenz bezeichnet. Die bei Bauteilen ohne gezielte Magnetisierung vorhandene Remanenz wird auch mit Restmagnetismus umschrieben. Ursache sind Magnetisierungen bspw. durch in elektrischen Anlagen auftretende Magnetfelder oder z.T. auch Plastifizierungen. Hier sind Magnetförderer, Elektromotore aber auch Kaltumformprozesse u.a. zu nennen. Angegeben wird die Stärke des Restmagnetismus entweder als Feldstärke H in A/cm oder als Flussdichte B in mT.

Sind Teile zu stark magnetisiert, so können sie aneinander und/oder an anderen magnetisierbaren Teilen haften. Ebenso haften magnetisierbare Partikel an magnetisierten Komponenten, wodurch Prozesse negativ beeinflusst werden können:

- Transport
- Montage
- Teilereinigung
- etc.

Es ist zu beachten, dass Teile durchfließende elektrische Ströme ebenfalls zu einer Magnetisierung führen können.

3.3. Verfahren zur Entmagnetisierung

Der Restmagnetismus lässt sich reduzieren, indem das Bauteil über die Curie-Temperatur des Werkstoffs erhitzt wird, was technisch jedoch nur in seltenen Fällen machbar sein dürfte. Die stoffabhängige Curie-Temperatur T_C ist die Temperatur, oberhalb derer ein Stoff seine Magnetisierbarkeit verliert. Die Curie-Temperatur beträgt bei reinem Eisen und unlegierten Stählen bis 0,5% C 769°C und sinkt oberhalb 0,5% C mit der Linie A3 im Eisen-

Kohlenstoff-Diagramm bis auf 723°C bei ≥ 0,8% C. Oberhalb dieser Temperatur verhalten sich Eisen und die meisten Stähle paramagnetisch.

Eine praktikablere Möglichkeit ist, das Bauteil einem wechselnden Magnetfeld mit abnehmender Feldstärke auszusetzen, was leicht durch ein „langsames“ Durchschreiten des zu entmagnetisierenden Teils durch eine Magnetspule (*Entmagnetisierungstunnel*) mit konstantem Wechselfeld oder unbewegt mit asymptotisch abklingendem Wechselfeld mittels Entmagnetisierungsplatte oder Jochmagnet realisierbar ist. Auch das Durchleiten eines abklingenden Wechselstroms führt zu einer Entmagnetisierung. Bei großvolumigen Komponenten sollte dies mit niedrigen Frequenzen erfolgen, um auch im Komponenteninneren eine gute Entmagnetisierung zu erreichen.

Voraussetzung ist in jedem Fall, dass die magnetische Feldstärke des Wechselfelds ausreichend stark ist, um das Permanentmagnetfeld des Bauteils umzukehren.

3.4. Messung des Restmagnetismus

Für Bauteile, deren Grad der Magnetisierung aus technischen Gründen zu begrenzen ist, ist diese vor dem Versand, dem Einsatz oder der Weiterverarbeitung zu bestimmen. Zur Bestimmung der Stärke der Magnetisierung sind geeignete Messsysteme einzusetzen. Als Messfühler eignen sich besonders solche, die auf dem Hall-Effekt beruhen. Bei den sogenannten Hall-Sonden wird ein Halbleitersensor von einem Strom durchflossen. Die Ladungsträger werden durch ein senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung liegendes Magnetfeld aufgrund der Lorenzkraft seitlich abgelenkt. Dadurch entsteht zwischen den beiden Seiten eine Potentialdifferenz, die als Spannung gemessen werden kann und in weiten Bereichen linear zur magnetischen Feldstärke ist. Andere Geräte beruhen auf dem Prinzip des Differentialtransformators, welches hier nicht weiter erläutert werden soll.

Die Hall-Sonde wird zur sicheren Handhabung in einen Träger eingebettet. Dieser Träger kann zungen- oder stabförmig sein. Der Abstand der Hall-Sonde / des Sensors von der Oberfläche des Messfühlers / der Sonde ist wichtig, da die magnetische Feldstärke magnetisierter Teile im Allgemeinen mit dem Abstand von der Oberfläche abnimmt. Dieser mit Messdistanz bezeichnete Abstand liegt bei üblichen Sensoren im Bereich von 0,5 mm bis 2 mm. Dieser Abstand ist der Beschriftung der Sonde oder den mitgelieferten Dokumenten zu entnehmen. Die Größe der Sonde spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, da der ermittelte Wert für die Feldstärke ein gemittelter Wert über die Fläche des Sensors darstellt.

Mit abnehmender Größe der zu bestimmenden Feldstärke spielt der Einfluss des Erdmagnetfelds eine zunehmenden Rolle. Ist dieses nicht mehr zu vernachlässigen, so ist die Messung so durchzuführen, dass die Sonde derart ausgerichtet ist, dass ihre Messrichtung senkrecht zur Richtung des Erdmagnetfelds liegt. Es ist zu beachten, dass

das Erdmagnetfeld lokal deutlich von der Nord-Süd-Achse abweichen kann. Diese auch Missweisung genannte Abweichung ist u.a. von der Beschaffenheit der Umgebung (*Längengrad, Erzlager im Boden, Stahlträger in Gebäuden, Strommasten etc.*) abhängig. Die optimale Ausrichtung der Sonde kann durch Drehen im Raum ermittelt werden. Die Anzeige sollte dann auf Null stehen, was jedoch einen exakt eingestellten Nullpunkt des Messsystems bedingt. In diesem Fall wird die Probe an der „festen“ Sonde vorbeigeführt. Eine andere Möglichkeit ist die Messung in einer erdmagnetfeldfreien Umgebung, bspw. in einer Null-Gauss-Kammer.

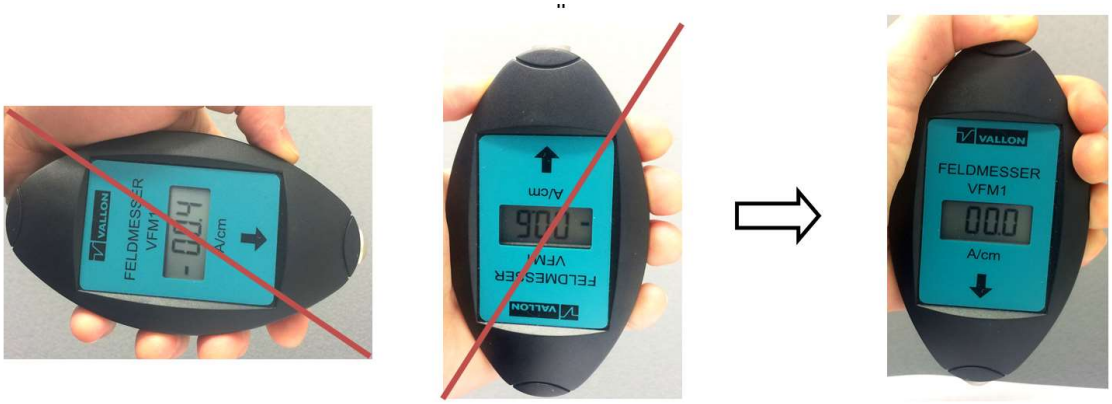

Bild 4: Einfluss der Orientierung des Erdmagnetfelds auf die Messung

Die Magnetisierung eines Bauteils lässt sich lediglich an dessen Oberfläche bestimmen. Aussagen zum Zustand in seinem Inneren sind nicht möglich. Die Magnetisierung kann über der Oberfläche sehr stark variieren, und es können mehrere magnetische Nord- und Südpole auftreten. Die größten Feldstärken sind an Enden und Kanten zu erwarten, was jedoch nicht zwingend so sein muss. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, das zu prüfende Bauteil vollständig zu umfahren. Das Messgerät sollte dabei auf die Messung statischer Magnetfelder im Modus Gleichfeld „*DC*“ gestellt werden. Bei Schüttgut wird ein Stichprobenumfang von n = 10 empfohlen. Der ermittelte Größtwert ist das Messergebnis. Werden mehrere Bauteile geprüft, dann ist der größte Gesamtmesswert der Stichprobe das Prüfergebnis. Das Messsystem ist arbeitstäglich vor dem ersten Einsatz mittels Referenzmagnet zu überprüfen und das Ergebnis zu dokumentieren.

Wichtig ist, das Messverfahren incl. Gerät und Sensor festzulegen, da deren Einflüsse nicht unerheblich sind. Es sind eindeutige, realistische und nachvollziehbare Grenzwerte zu vereinbaren, vorzugsweise in A/cm. Umrechnungen zu anderen Einheiten sind der Tabelle 1 zu entnehmen. Als Schiedsprüfung wird die Festlegung einer Messung mit einem spezifizierten Messsystem (Messgerät und Sensor) empfohlen.

A/m	A/cm	mT	(G)	(Oe)
1	0,01	0,00125664	0,0125664	
100	**1**	0,125664	1,25664	
795,775	7,95775	**1**	10	
79,5775	0,795775	0,1	**1**	

Tabelle 1: Umrechnung von Einheiten (ältere gesetzlich nicht mehr gültige in Klammern)
Beispiel: 1 A/cm = 100 A/m = 0,125664 mT
Hinweise: Die Umrechnungen gelten nur im Vakuum und an Luft, nicht im Materialinneren. Die Feldstärke des Erdmagnetfelds beträgt in unseren Breiten etwa 40 A/m (0,4 A/cm).

4. Einflüsse des Produktionsprozesses auf den Grad des Restmagnetismus

Bei der Produktion von Verbindungselementen können die Produkte bei verschiedenen Prozessschritten unterschiedlich stark magnetisiert werden.

Um die Höhe des Restmagnetismus im Endprodukt abschätzen zu können, ist es wichtig, die Einflüsse einer typischen Schraubenproduktion auf die Erzeugung von Magnetismus im Verbindungselement zu kennen.

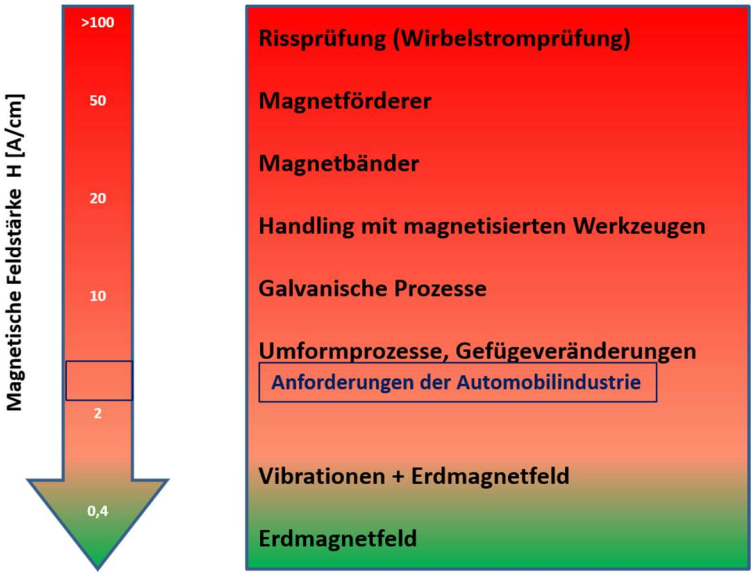

Bild 5: Magnetismus erzeugende Prozesse in der Produktionsumgebung

In der Regel sind es nicht die Prozessschritte selbst, die magnetisieren, sondern Maschinenteile oder Hilfsmittel. Typische Einflüsse mit den zugehörigen Richtwerten sind in Bild 5 dargestellt. Jeder Prozessschritt ist dabei gesondert zu betrachten. Im Bereich Fördern kann durch den Einsatz eines rein mechanischen Förderbands anstelle eines Magnetförderers der Grad der Magnetisierung reduziert werden (Bild 6)

Bild 6: Beispiel für die Reduzierung magnetischer Felder in der Produktion

Weitere Einflüsse haben z.B. Elektroantriebe, Magnetventile, stromführende Leitungen, Transport (s. Kapitel 5), magnetisierte Behälter, etc.

Eine besonderer Prozessschritt innerhalb der Herstellung von Verbindungselementen ist der Vergütungsprozess. Nach Überschreiten der materialspezifischen Curie-Temperatur T_C verschwinden die ferromagnetischen Eigenschaften eines Materials vollständig. Somit wird

auch eine vorherige Magnetisierung weitgehend aufgehoben (Bild 7). Jedoch können nachfolgende Schritte den Werkstoff erneut magnetisieren.

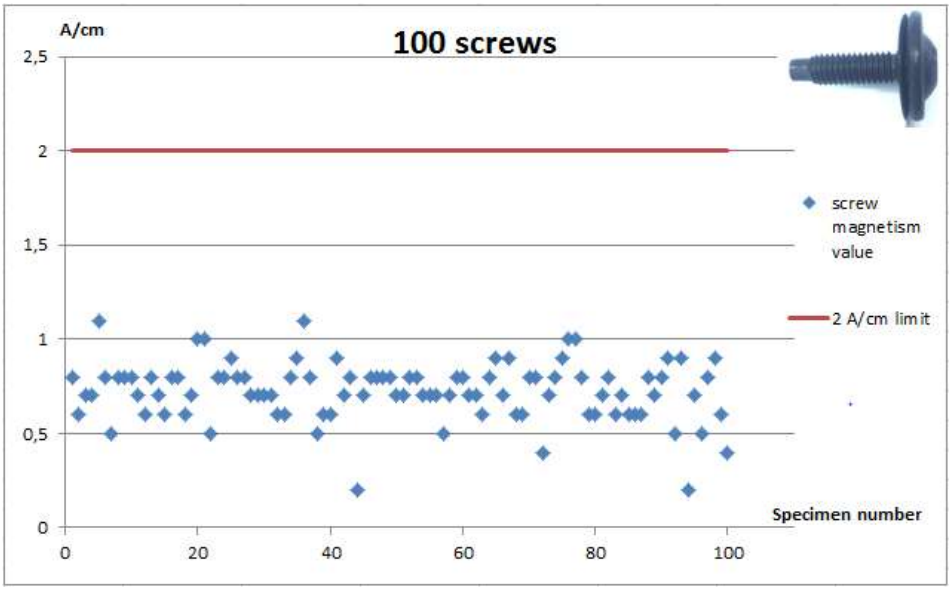

Bild 7: Verbleibender Grad der Magnetisierung nach der Vergütung

Bild 8 zeigt schematisch die Variation der Höhe der Magnetisierung je nach Folge der Prozessschritte.

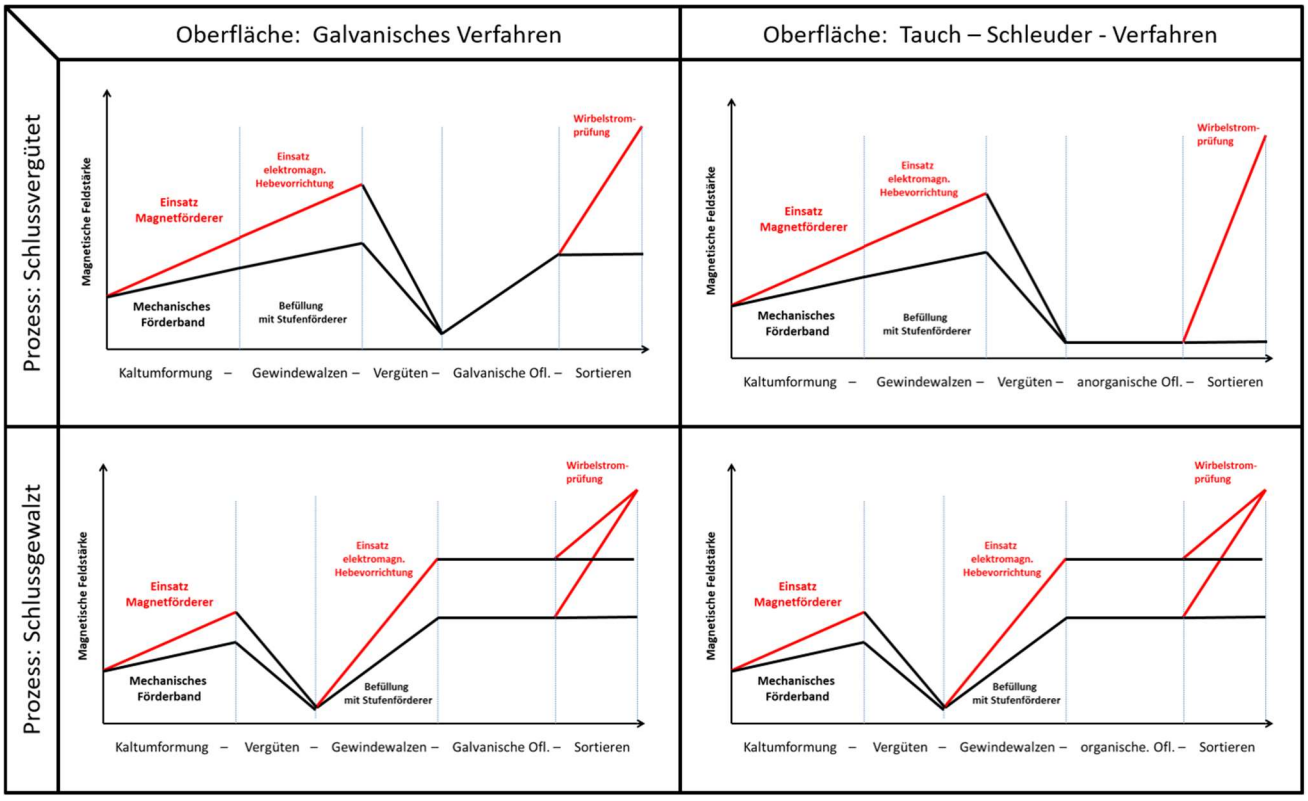

Bild 8: Schematische Darstellung der Magnetisierung von Produkten im Produktionsprozess sowie prozessbedingte Einflüsse.

5. Lagerung und Transport

Einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Magnetisierung von Bauteilen bei der Lagerung und beim Transport können starke elektromagnetische Felder haben. Typische Quellen dieser Felder sind Hochspannungsleitungen, Transformatoren und Gleichrichter. Jedes äußere Magnetfeld hat Einfluss auf ferromagnetische Materialien, welche zunächst nach außen hin unmagnetisch wirken. Bei der Überschreitung bestimmter Potenzialschwellen wird eine bleibende Magnetisierung induziert. Dieser zurückbleibende Magnetismus wird Remanenz oder auch Restmagnetismus genannt. Unterschiedliche Einflussfaktoren können während des Transportes und der Lagerung von Bauteilen zu einer Remanenz führen.

Beim Transport und bei der Lagerung ist darauf zu achten, Bauteile mit Anforderungen an den Restmagnetismus von hohen Strömen und starken Magnetfeldern fern zu halten.

6. Grenzwerte

Welche Grenzwerte sind möglich? Diese Frage ist nicht so einfach zu beantworten, denn hier spielt nicht nur das Produkt und der Stoff aus dem es hergestellt wurde eine Rolle, sondern auch die Verpackung, die verfügbaren Anlagen und nicht zuletzt die akzeptablen Kosten.

Bei regulären Prozessen zur Herstellung von Verbindungselementen ist nach Abschluss der Fertigungskette einschließlich Logistik und Verpackung bezüglich des Restmagnetismus mit großen Streuungen zu rechnen.

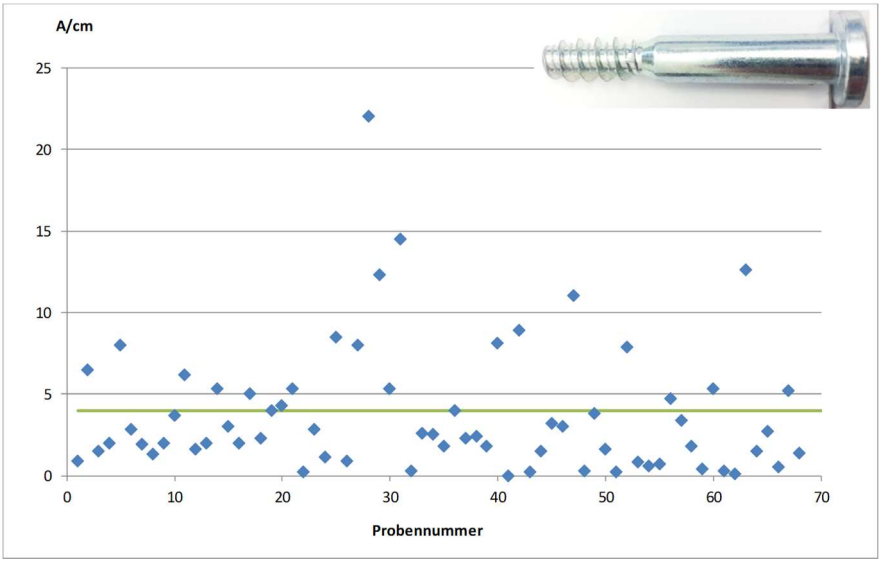

Bild 9: Streuung des Restmagnetismus nach einem üblichen Fertigungsprozess (Beispiel)

Soll ein oberer Grenzwert nicht überschritten werden, so sind Maßnahmen zur Entmagnetisierung notwendig. Hierbei ist in vielen Fällen ein oberer Grenzwert von 4 A/cm realisierbar. Ein geringerer Grenzwert ist praktisch nicht mehr prozesssicher darzustellen.

Der Aufwand zur Entmagnetisierung hängt von verschieden Faktoren ab:

- Zulässiger Grad des Restmagnetismus
- Bauteilgröße (der Aufwand zur Entmagnetisierung nimmt mit zunehmender Bauteilabmessung regulär zu)
- Losgröße (mit der Verpackungsgröße steigt ebenfalls der Aufwand zur Entmagnetisierung)
- usw.

Es ist zu empfehlen, vor einer definitiven Festlegung von Grenzwerten entsprechende Versuche durchzuführen. Als oberer Grenzwert sollte dann nicht der daraus ermittelte Wert zugrunde gelegt werden, sondern besser ein um mindestens den Faktor zwei höherer Wert. Der vertraglich vereinbarte Wert kann regulär nur ab Werk gelten, da auf dem weiteren Transportweg und dem nachfolgenden Handling bis zum Einsatz des Produkts eine erneute Magnetisierung nicht auszuschließen ist.

Wird bezüglich Restmagnetismus keine Festlegung getroffen, so ist von einem nicht entmagnetisierten Zustand der Ware auszugehen.

7. Kostenbetrachtung

Grenzwerte hinsichtlich des Restmagnetismus sind ausschließlich durch einen zusätzlichen Prozessschritt „Entmagnetisierung“ prozesssicher darstellbar. Dies ist mit zusätzlichen, vom Aufwand abhängigen, Kosten verbunden.

8. Literatur

/1/ Hornbogen, E; Warlimont, H.
Metalle, Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen
Springer, 5. Auflage 2006

/2/ Gottstein, G.
Physikalische Grundlagen der Materialkunde
Springer, 3. Auflage 2007

/3/ Meschede, D.
Gerthsen Physik
Springer, 25. Auflage 2015

ENDE DES DOKUMENTS

Bei Fragen oder Anregungen zu dieser Richtlinie wenden Sie sich bitte an

- Dipl.-Ing. Jürgen Böttner (E-Mail: jboettner@ejot.com; Tel.: +49 2752 109 137)
- Dr.-Ing. Stefan Beyer (E-Mail: sbeyer@schraubenverband.de; Tel.: +49 2331 9588 45)

An dieser Richtlinie haben folgende Personen mitgewirkt:

- Dipl.-Ing. Jürgen Böttner, Fa. EJOT GmbH & Co. KG
- Dr.-Ing. Stefan Beyer, Deutscher Schraubenverband e.V.
- Dipl.-Ing. Horst Dieterle, KAMAX Automotive GmbH
- Dipl.-Ing. Christian Schomaker, LISI Automotive KNIPPING Verbindungstechnik GmbH
- Dipl.-Ing. Ulrich Halter, ARNOLD UMFORMTECHNIK GmbH & Co. KG
- M.Sc. Lukas Franz, ARNOLD UMFORMTECHNIK GmbH & Co. KG