



SELTEN-ERD-DAUERMAGNETE

VACODYM • VACOMAX

ADVANCED MAGNETIC SOLUTIONS

VAC
VACUUMSCHMELZE



DAS UNTERNEHMEN VACUUMSCHMELZE

ADVANCED MAGNETIC SOLUTIONS

VAC ist ein führender Hersteller von magnetischen Legierungen und daraus hergestellten Lösungen. Wir treiben die Technologien von heute und morgen mit Leidenschaft voran. Als zuverlässiger Partner entwickeln wir mit unseren Kunden Anwendungslösungen, die es ermöglichen, den ständig steigenden Anforderungen gerecht zu werden. Mit bahnbrechenden

Lösungen gehen wir an technische Grenzen. Der Einsatz unserer Materialien und ihre besonderen magnetischen Eigenschaften sind der Schlüssel, um die Lösungen unserer Kunden kleiner, leichter, effizienter und nicht zuletzt sicherer zu machen. Damit tragen wir wesentlich zur Ressourcenschonung und zum Schutz unserer Umwelt bei.

INHALTSVERZEICHNIS

Selten-Erd-Dauermagnete VACODYM und VACOMAX	Seite 3
Lieferprogramm	Seite 4
Anwendungen	Seite 8
Werkstoffe und magnetische Eigenschaften	Seite 12
Irreversible Verluste	Seite 16
Korrosionsverhalten und Beschichtungen	Seite 17
Kleben von Selten-Erd-Dauermagneten	Seite 22
Magnetsysteme	Seite 24
Technische Lieferbedingungen	Seite 28
Sicherheitshinweise	Seite 29
Qualitäts- und Umweltmanagement	Seite 30
Technische Grundlagen und Begriffe	Seite 31
Magnetische Größen und Einheiten	Seite 35

SELTEN-ERD-DAUERMAGNETE VACODYM UND VACOMAX

Das Gesamt-Lieferprogramm der VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG (VAC), umfasst neben Dauermagneten und daraus weiterveredelten Magnetsystemen auch weichmagnetische Halbzeuge und Teile, induktive Bauelemente, magnetische Abschirmungen, magnetokalorische und andere Werkstoffe mit speziellen physikalischen Eigenschaften. Das Spektrum der Magnete besteht neben den Selten-Erd-Dauermagneten aus verformbaren Dauermagneten und magnetisch halbharten Werkstoffen. Letztere zeichnen sich vor allem durch kostengünstige Formgebungsmöglichkeiten und einstellbare Dauermagneteigenschaften aus.

Mit magnetischen Eigenschaften metallischer Spezialwerkstoffe und ihren Anwendungen beschäftigen wir uns seit etwa 100 Jahren. Im Jahre 1973 haben wir die Fertigung pulvermetallurgisch hergestellter Dauermagnete auf Basis von Seltenen Erden (SE) und Kobalt aufgenommen, welche bis heute unter dem Markennamen VACOMAX® angeboten werden.

VACODYM®-Magnete produzieren wir seit 1986 im industriellen Maßstab. Sie werden auf der Basis von Neodym-Eisen-Bor-Legierungen hergestellt. Vom Herstellen des Pulvers bis zum Beschichten der fertig bearbeiteten Teile führen wir alle Schritte im eigenen Hause durch und stellen so optimale Werkstoffeigenschaften über den

gesamten Fertigungsablauf sicher. Als Marktführer in Europa zählen wir heute weltweit zu den führenden Herstellern von Selten-Erd-Dauermagneten.

Unsere Legierungen werden durch intensive Entwicklungsarbeiten ständig an die Marktanforderungen angepasst, zum Beispiel für Medizinanwendungen, Sensorapplikationen und Elektromobilität. Die bei VAC etablierten Einzelpressverfahren sind ressourcenschonend und zeichnen sich durch eine hohe Reproduzierbarkeit der magnetischen Eigenschaften aus.

Bei Bedarf hat VAC die Möglichkeit auf in Europa hergestellte Vorlegierungen zurückzugreifen. Auf Anfrage erhalten Sie hierzu von unseren Mitarbeitern weitere Informationen.

Wirtschaftliche Produktionsanlagen, moderne Prüftechniken und ein zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem sind für uns ebenso selbstverständlich wie die permanente Weiterbildung unserer Mitarbeiter und ein aktiver Arbeits- und Umweltschutz. Mit diesen Grundsätzen unserer Geschäftspolitik sind wir Ihr zuverlässiger und kompetenter Partner.

In den folgenden Kapiteln werden unsere Produkte näher beschrieben. Weiterführende Informationen finden Sie auf unserer Homepage.

LIEFERPROGRAMM

Das Lieferprogramm unserer Selten-Erd-Magnete umfasst optimierte Reihen von Werkstoffen mit unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften. Sie ermöglichen eine leichte, den individuellen Einsatzbedingungen angepasste, Werkstoffauswahl.

VACODYM ist der Dauermagnetwerkstoff mit den höchsten heute zur Verfügung stehenden Energiedichten. Verantwortlich für die hervorragenden magnetischen Eigenschaften dieses pulvermetallurgisch hergestellten Werkstoffes sind kristalline Körner, welche aus einer $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Phase mit hoher Sättigungspolarisation und hoher magnetischer Anisotropie bestehen. Eine Selten-Erd-reiche Phase zwischen den Körnern verleiht diesen Magneten eine gute Gegenfeldstabilität. Abhängig von der Anwendungstemperatur wird in den VACODYM-Legierungen ein gewisser Anteil von Neodym durch andere seltene Erden wie Dysprosium, Terbium oder Praseodym ersetzt, womit wir für Temperaturen von -270 °C bis $+240\text{ °C}$ immer den passenden Werkstoff zur Verfügung stellen können.

VACOMAX ist ein Dauermagnetwerkstoff aus Seltenen Erden und Kobalt. Diese Magnete besitzen eine hervorragende Temperatur- und Korrosionsstabilität, wodurch sich der Einsatzbereich dieser Dauermagnete auf Anwendungstemperaturen bis zu 350 °C erweitern lässt. Durch die geringe Abnahme der Remanenz mit steigender Temperatur lassen sich mit VACOMAX bereits oberhalb einer Einsatztemperatur von 150 °C höhere Energiedichten als mit VACODYM realisieren.

Einen Überblick über die erreichbaren Energiedichten $(BH)_{\text{max}}$ ausgewählter Dauermagnetlegierungen in Abhängigkeit der Einsatztemperatur zeigt Abb. 1.

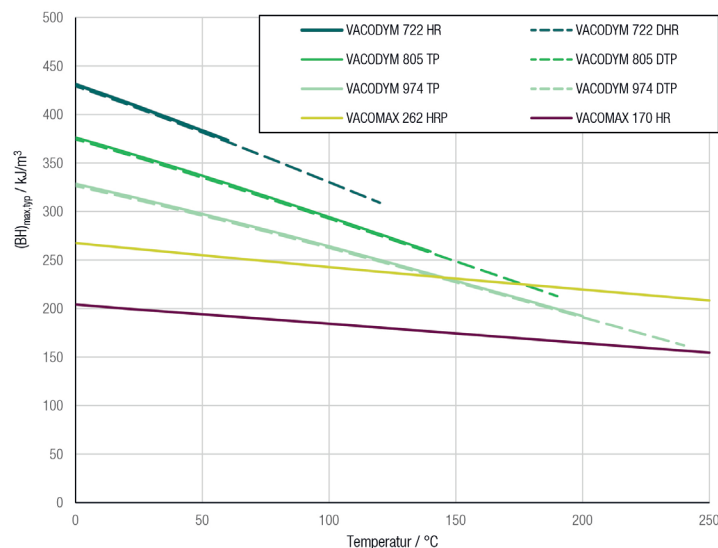


Abb. 1: Typische Energiedichten $(BH)_{\text{max}}$ ausgewählter VACODYM und VACOMAX Dauermagnetlegierungen in Abhängigkeit der Einsatztemperatur

Magnete aus VACODYM und VACOMAX werden pulvermetallurgisch hergestellt. Die wesentlichen Arbeitsschritte zur Herstellung sind in Abb. 2 aufgeführt. Die magnetischen Eigenschaften werden insbesondere durch die Legierungszusammensetzung und das Pressverfahren beeinflusst. In der VAC sind drei Pressverfahren etabliert. Diese drei Verfahren finden sich als Zusatz HR, TP und AP im Legierungsnamen wieder. Dabei bezeichnet HR (hoch-

remanent) die isostatisch gepressten Magnete. Bei den werkzeuggepressten Ausführungen wird unterschieden zwischen TP (transversal pressen) und AP (axial pressen). In der TP-Ausführung wird das starke Magnetfeld zur Ausrichtung der Pulverteilchen quer zur Pressrichtung angelegt und in der AP-Ausführung entlang der Pressrichtung. Isostatisch und im Querfeld gepresste Magnete weisen eine im Vergleich zur AP-Ausführung um 5–8 % höhere Remanenz auf.

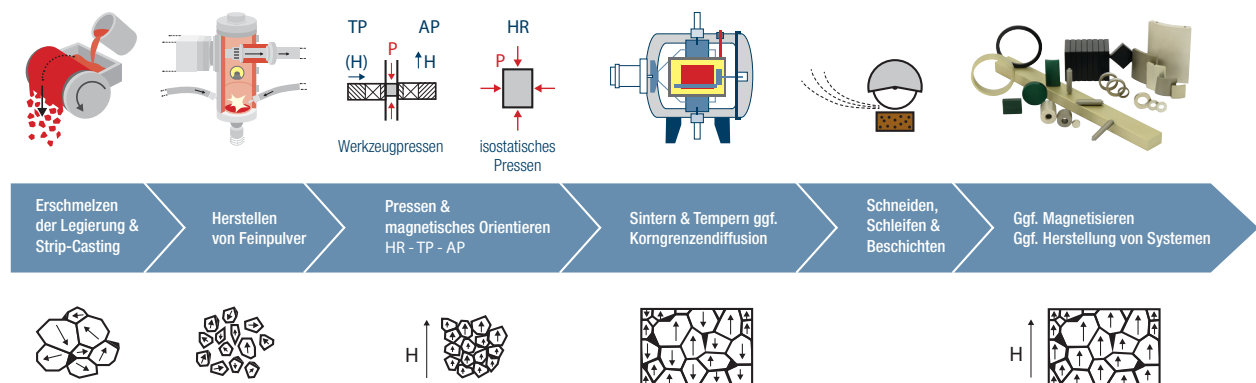


Abb. 2: Schematische Darstellung des pulvermetallurgischen Herstellprozesses von VACODYM und VACOMAX Sintermagneten

Eine besondere Kompetenz der VAC ist das Einzelteilpressverfahren. Im Gegensatz zum weit verbreiteten Werkzeugpressen von großen Magnetblöcken können mit diesem Verfahren selbst kleinste Magnete nahe der vom Kunden spezifizierten Abmessungen gefertigt werden. Somit können mechanische Bearbeitungsschritte entfallen, wodurch sich die Ressourceneffizienz deutlich erhöhen lässt. Zusätzlich ermöglicht das Einzelteilpressverfahren äußerst reproduzierbare magnetische Eigenschaften, welche sich je nach Kundenforderung noch mit speziellen Magnetisierungsrichtungen kombinieren lassen (Abb. 3). Im Einzelteilpressverfahren

lassen sich zum Beispiel Magnete herstellen, welche eine einseitige Erhöhung des magnetischen Flusses aufweisen und dadurch höhere Luftspaltinduktionen ermöglichen (Abb. 3b). Ein weiterer Vorteil der Einzelteilpresstechnik ist die definierte Einstellung der Magnetisierungsrichtung mit kleinsten teilespezifischen Abweichungen. Auf Kundenwunsch kann VAC selbst Magnete mit speziellen Magnetisierungsrichtungen wie zum Beispiel eine aus der mechanischen Symmetrieachse gekippte Magnetisierungsachse (Abb. 3c) in großen Stückzahlen herstellen.

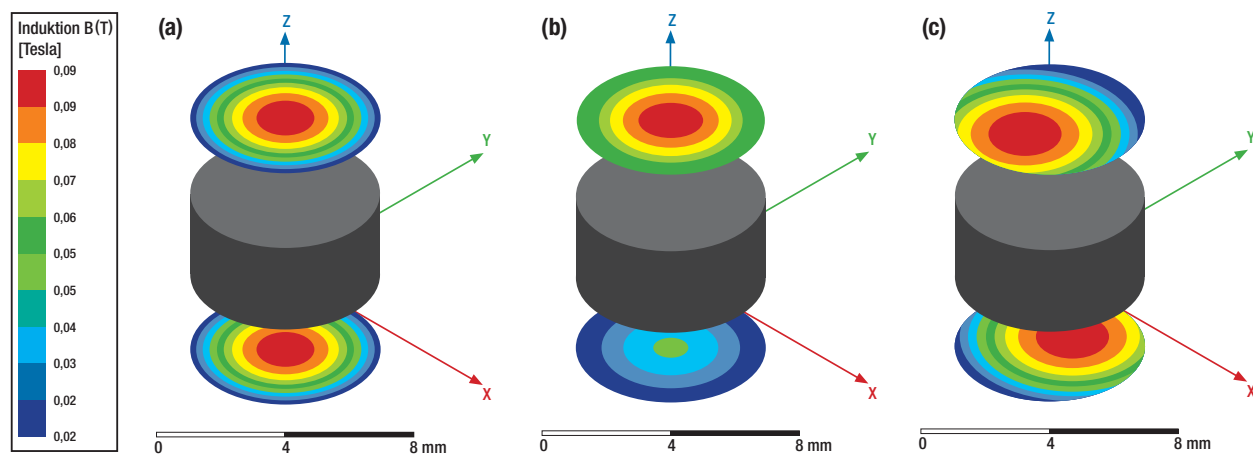


Abb. 3: Mikromagnetische Simulationen zu einem (a) homogenen Magneten, (b) Magneten mit einseitiger Flusserhöhung und (c) Magneten mit spezieller Magnetisierungsrichtung

Zum Thema Ressourceneffizienz wurde neben der Einzelteilpresstechnologie mit der Korngrenzendiffusion ein Prozessschritt etabliert, der einerseits die Koerzitivfeldstärke von VACODYM erhöht und andererseits gleichzeitig eine Einsparung der nur begrenzt verfügbaren schweren Selten-Erd-Metalle ermöglicht. Mit einem patentierten Verfahren wird Terbium oder Dysprosium in einer dünnen Schicht angereichert, welche die einzelnen Neodym-Eisen-Bor-Körner im Inneren des Magneten umhüllt (Abb. 4). Dieser Prozessschritt lässt sich prinzipiell auf alle allseitig geschliffenen VACODYM Sintermagnete anwenden und wird durch den Zusatz „D“ im Legierungsnamen gekennzeichnet. Ausgehend von der gewählten Basislegierung kann bis zu einer Teiledicke von 3 mm ein Zuwachs an Koerzitivfeldstärke um mehr als 520 kA/m (6,5 kOe) erzielt werden. Der Diffusionsprozess wird aber auch auf eine Vielzahl von Teilen mit Teiledicken deutlich größer als 3 mm angewendet und kann auf Kundenwunsch zielgerichtet auf ausgewählte Oberflächen angewendet werden. Aufgrund der charakteristischen

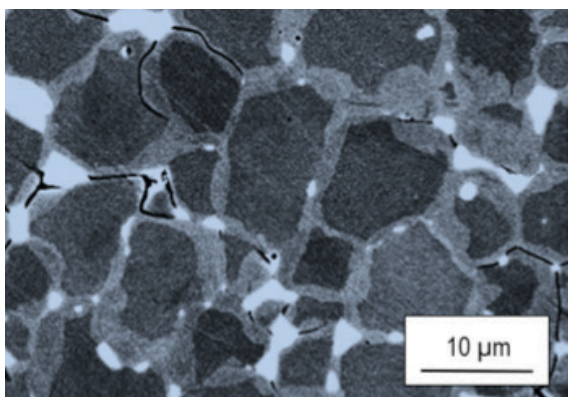


Abb. 4: Mikrostruktur eines VACODYM Magneten nach der Korngrenzendiffusion. Terbiumreiche Kornhüllen sind am helleren Kontrast erkennbar

Diffusionslänge von nur wenigen Millimetern ergeben sich hier allerdings Einschränkungen und es empfiehlt sich eine Beratung durch unsere Mitarbeiter.

Durch die langjährige Erfahrung mit der Herstellung von Dauermagneten können auch speziell auf Kundenwunsch zugeschnittene Sonderlegierungen rasch entwickelt und fertigungssicher im industriellen Maßstab angeboten werden. Darüber hinaus ermöglicht die beständige Weiterentwicklung der eigenen Produktionsverfahren die Einführung von immer weiter optimierten Legierungen. Insbesondere im Bereich VACOMAX geht der Trend zu neuen Materialqualitäten mit Energiedichten größer als 270 kJ/m³.

Neben einzelnen Magneten gehört auch eine zunehmend große Zahl an Magnetsystemen zum Fertigungsprogramm. Ausführliche Informationen zu diesem Thema finden Sie auf den Seiten 24 ff.

Als europäischer Hersteller von Selten-Erd-Dauermagneten sind die Themen Ressourceneffizienz und nachhaltige Verfügbarkeit von Rohstoffen selbstverständlich wesentliche Teile der Unternehmensphilosophie der VACUUMSCHMELZE. Beim Thema nachhaltige Verfügbarkeit von Rohstoffen setzen wir auf langjährig etablierte und qualifizierte Lieferketten.

ANWENDUNGEN

Auf Grund der hohen Energiedichte und Gegenfeldstabilität werden Selten-Erd-Dauermagnete in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt.

MOTOREN UND GENERATOREN

In Servoantrieben für die Automatisierungstechnik, Gleichstrommaschinen, Linearantrieben und Großmaschinen (z.B. Motoren für Bahn- und Schiffsantriebe oder Wind- und Wasserkraft-Generatoren) kommen überwiegend Magnete aus VACODYM zum Einsatz. Unsere finnische Tochtergesellschaft NEOREM Magnets Oy ist auf die Fertigung großer Magnete und daraus weiter veredelter Systeme spezialisiert (siehe auch www.neorem.fi).

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet liegt bei Klein- und Kleinstmotoren, z.B. Glockenanker- und Dentalmotoren. Bei speziellen Anforderungen, insbesondere im Bereich hoher Temperaturen, werden vorzugsweise VACOMAX-Magnete eingesetzt.

AUTOMOBILTECHNIK UND SENSORIK

Berührungsfreie Sensoren zur Erfassung vielfältiger Betriebsdaten, z.B. der Motor-, Getriebe- und Raddrehzahl (ABS-Systeme), Beschleunigungen (ESP, Airbag) oder Positionen (Drosselklappenstellung, Einspritzsysteme, Nockenwelle, Kurbelwelle, Tankanzeigen) werden je nach Anforderung an die Temperatur- und Korrosionsstabilität mit VACOMAX- oder VACODYM-Magneten aufgebaut.

In Elektro- und Hybridfahrzeugen werden als Hauptantriebe vorzugsweise permanenterregte Synchronmaschinen verwendet. Diese Motoren sind überwiegend mit Magneten aus VACODYM bestückt. Für Motorsportanwendungen stehen auch VACOMAX-Magnete für höchste thermische Anforderungen zur Verfügung.

Für Aktoren im Motormanagement, Getriebe, Hilfsmotoren (Lenkhilfe) und Generatoren kommen VACODYM-Magnete zum Einsatz.

Dank eines hohen Automatisierungsgrades können Großserien kostengünstig und mit gleichbleibend höchster Qualität gefertigt werden.



SCHNELLDREHENDE ROTOREN

Für schnelldrehende Rotoren, wie sie z.B. im Motorsport oder in elektrischen Turboladern zum Einsatz kommen, werden komplett mit Magneten aus VACODYM oder VACOMAX bestückte Rotoren inkl. Bandage und Wuchtung angeboten (siehe Seite 24 ff.). Als weichmagnetische Werkstoffe kommen hier vorzugsweise Kobalteisenwerkstoffe mit erhöhter Festigkeit, wie z.B. VACODUR®, zum Einsatz. Alle benötigten hart- und weichmagnetischen Werkstoffe gehören zum Lieferprogramm der VAC. Durch diese Produktvielfalt können wir Ihnen präzise an Ihre Anforderung angepasste Produkte liefern.

LUFTFAHRT UND RAUMFAHRT

Für die Entwicklung elektrischer Antriebe in der Luftfahrt kommen optimierte Magnete aus VACOMAX oder VACODYM zum Einsatz. Zur Erhöhung der Leistungsdichte werden typischerweise segmentierte Halbach-Anordnungen in Verbindung mit unseren weichmagnetischen Legierungen VACOFLEX® oder VACODUR eingesetzt. Dies ermöglicht den Bau von gewichtssparenden Antrieben. Diesen Zukunftstrend unterstützt die VAC im Rahmen von teils öffentlich geförderten Entwicklungsprojekten gemeinsam mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft.

Für sonstige Anwendungen, wie z.B. Hilfsantriebe, Aktuatoren und Gyroskope in der Luftfahrt- und Raumfahrtstechnik, liefern wir Magnete, je nach Anforderung, aus VACODYM und VACOMAX.



WISSENSCHAFTLICHE ANWENDUNGEN

Permanentmagnetische Strahlführungen sind praktisch wartungsfrei und benötigen keine Energiezufuhr. Systeme mit VACODYM- oder VACOMAX-Magneten haben sich daher in allen Fällen durchgesetzt, wo hohe Feldstärken bei begrenztem Platzbedarf erreicht werden müssen, z.B. in Undulatoren, Multipolen und Teilchendetektoren.

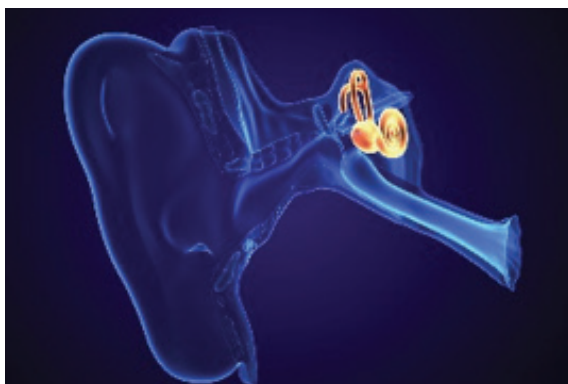
Für diese Anwendungen können definiert abgegliche, aufeinander abgestimmte Magnetsätze mit engen Toleranzen bezüglich der mechanischen und magnetischen Eigenschaften hergestellt werden. Durch die Einzelpresstechnologie werden besonders enge Verteilungen bzgl. Homogenität und Winkellage zwischen magnetischer Vorzugsrichtung und Teilegeometrie sichergestellt.



Namhafte wissenschaftliche Einrichtungen vertrauen auf die Kompetenz, Zuverlässigkeit und Qualität der VAC – wenn es zum Beispiel um den Aufbau und die Auslegung komplexer Undulatorstrukturen oder anspruchsvoller Halbach-Systeme geht.

Für Tieftemperaturanwendungen steht mit VACODYM 131 eine eigens entwickelte Legierung zur Verfügung.

MEDIZINTECHNIK



In Miniatursystemen wie z.B. Herzpumpen, Blutpumpen oder Cochlea-Implantaten kommen auf Grund der hohen Remanenzflussdichte VACODYM-Magnete und anspruchsvolle Magnetsysteme zum Einsatz. Eine weitere Anwendung stellen u.a. die Antriebe für Dentaltechnik oder Operations-Technik dar. Für diese werden Kleinstmotoren mit VACODYM-Magneten gefertigt.

Für bildgebende Untersuchungsverfahren wie z.B. Magnetresonanztomographie (MRT) werden in der Regel Komponenten in Form von Einzelmagneten, aber immer öfter auch komplexe Dauermagnetsysteme in Halbach-Anordnung aus

VACODYM nach Kundenspezifikation gefertigt. Solche Systeme kommen ohne potentiell schädliche, ionisierende Röntgenstrahlung aus. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Organe und Gewebearten grafisch besser dargestellt werden können.

DAUERMAGNETLAGER



Für Turbomolekularpumpen, Zentrifugen u.ä. stehen unterschiedliche magnetische Lagerprinzipien zur Verfügung. Bei passiven Magnetlagern kommen vorzugsweise axial magnetisierte Ringmagnete zum Einsatz. Die Wahl des Magnetmaterials ergibt sich aus den unterschiedlichen Kundenspezifikationen, so dass VACODYM oder VACOMAX angewendet werden kann. Bei Anwendungen in der Vakuumtechnik wird üblicherweise, auf Grund einer besseren Beständigkeit gegenüber den Umgebungseinflüssen, VACOMAX eingesetzt.

MAGNETKUPPLUNGEN



Magnetkupplungen werden in der Automatisierungstechnik und in der chemischen Verfahrenstechnik bevorzugt, da sie eine dauerhafte hermetische Trennung zwischen verschiedenen Medien gewährleisten. Aufgrund erhöhter Temperaturanforderungen werden für viele Anwendungen Magnete aus VACOMAX eingesetzt. Bei niedrigeren Einsatztemperaturen empfehlen wir VACODYM-Magnete.

MESSINSTRUMENTE



Hier erstreckt sich die Anwendungspalette von elektronischen Waagen über Impulszähler, Massenspektrometer bis hin zu NMR-Messsystemen (Nuclear Magnetic Resonance). Je nach gewähltem Konstruktionsprinzip kommen Systeme, Anker oder Rotoren mit VACODYM- bzw. VACOMAX-Magneten zum Einsatz.

WERKSTOFFE UND MAGNETISCHE EIGENSCHAFTEN

Die nachfolgend genannten Legierungen stellen nur einen Auszug aus allen verfügbaren Legierungen dar.
Diese können in vollem Umfang auf unserer Homepage eingesehen werden.

TABELLE 1: CHARAKTERISTISCHE EIGENSCHAFTEN VON VACODYM BEI RAUMTEMPERATUR (20 °C)

	REMANENZ		KOERZITIVFELDESTÄRKE						ENERGIEDICHTE	
	B _{r typ.}	B _{r min.}	H _{cB typ}		H _{cB min.}		H _{cJ min.}		(BH) _{max typ.}	
	T	T	kA/m	kOe	kA/m	kOe	kA/m	kOe	kJ/m³	MGOe
VACODYM 633 HR	1,35	1,29	1040	13,1	980	12,3	1275	16	350	44
VACODYM 655 HR	1,28	1,22	990	12,4	925	11,6	1670	21	315	40
VACODYM 722 HR	1,47	1,42	915	11,5	835	10,5	875	11	415	53
VACODYM 745 HR	1,44	1,40	1115	14,0	1065	13,4	1115	14	400	50
VACODYM 238 TP	1,37	1,33	1058	13,3	1008	12,7	1275	16	360	46
VACODYM 633 TP	1,32	1,28	1020	12,8	970	12,2	1275	16	335	42
VACODYM 688 TP	1,14	1,09	885	11,1	830	10,4	2625	33	250	32
VACODYM 745 TP	1,41	1,37	1090	13,7	1035	13,0	1115	14	385	48
VACODYM 776 TP	1,32	1,28	1020	12,8	970	12,2	1670	21	335	42
VACODYM 837 TP	1,37	1,33	1060	13,3	1010	12,7	1275	16	360	46
VACODYM 890 TP	1,19	1,15	915	11,5	865	10,9	2625	33	270	34
VACODYM 956 TP	1,35	1,32	1030	13,0	995	12,5	1670	21	350	44
VACODYM 992 TP	1,22	1,19	940	11,8	900	11,3	2385	30	285	36
VACODYM 801 TP	1,42	1,40	1060	13,3	980	12,3	1035	13	390	49
VACODYM 805 TP	1,37	1,35	1050	13,2	1020	12,8	1670	21	360	45
VACODYM 809 TP	1,24	1,22	965	12,1	930	11,7	2625	33	295	37
VACODYM 238 AP	1,30	1,26	995	12,5	946	11,9	1355	17	325	41
VACODYM 633 AP	1,26	1,22	965	12,1	915	11,5	1355	17	305	38
VACODYM 688 AP	1,08	1,03	830	10,4	770	9,7	2625	33	225	28
VACODYM 745 AP	1,34	1,31	1025	12,9	970	12,2	1115	14	340	43
VACODYM 776 AP	1,26	1,22	965	12,1	915	11,5	1670	21	305	38
VACODYM 837 AP	1,30	1,26	995	12,5	950	11,9	1355	17	325	41
VACODYM 890 AP	1,11	1,07	845	10,6	795	10,0	2625	33	235	29
VACODYM 956 AP	1,29	1,26	975	12,3	940	11,8	1670	21	315	40
VACODYM 992 AP	1,16	1,13	885	11,1	850	10,7	2385	30	255	32

	REMANENZ		KOERZITIVFELDSTÄRKE						ENERGIEDICHTE	
	$B_{r \text{ typ.}}$	$B_{r \text{ min.}}$	$H_{cB \text{ typ}}$		$H_{cB \text{ min.}}$		$H_{cJ \text{ min.}}$		$(BH)_{\text{max typ.}}$	
	T	T	kA/m	kOe	kA/m	kOe	kA/m	kOe	kJ/m ³	MGOe
VACODYM 722 DHR	1,47	1,41	1120	14,1	1060	13,3	1395	17,5	410	51
VACODYM 801 DTP	1,42	1,39	1090	13,7	1050	13,2	1550	19,5	390	49
VACODYM 805 DTP	1,37	1,34	1050	13,2	1015	12,7	2190	27,5	360	45
VACODYM 807 DTP	1,30	1,27	1005	12,6	965	12,1	2745	34,5	325	41
VACODYM 890 DTP	1,19	1,14	925	11,6	870	10,9	3145	39,5	275	35
VACODYM 902 TP	1,42	1,40	1088	13,67	1055	13,25	1190	15	386,4	48,5
VACODYM 909 TP *	1,24	1,22	962	12,09	933	11,72	2620	33	298,4	37,5
VACODYM 913 TP	1,41	1,39	1082	13,60	1051	13,20	1350	17	381,5	47,9
VACODYM 919 TP *	1,27	1,25	986	12,38	956	12,00	2620	33	313	39,3

* vorläufige Werte

TYPISCHE ENTMAGNETISIERUNGSKURVEN UND TEMPERATURABHÄNGIGKEITEN DER KOERZITIVFELDSTÄRKEN

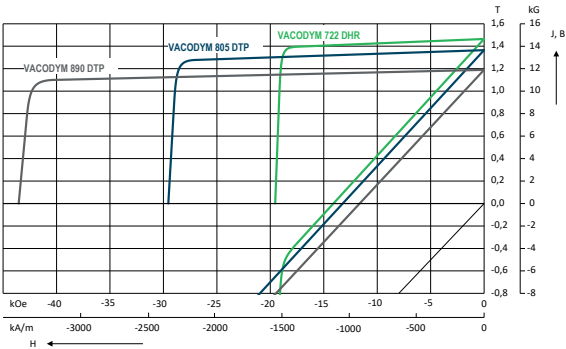


Abb. 5: Typische Entmagnetisierungskurven von exemplarischen VACODYM-Legierungen bei 20 °C

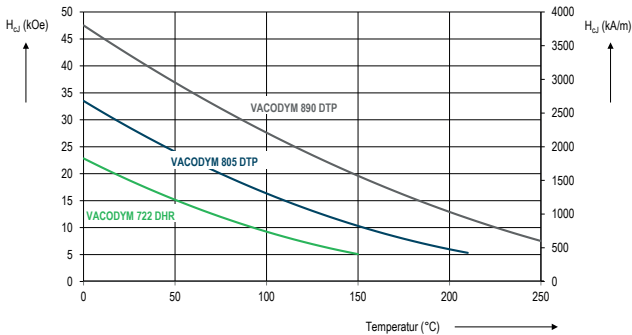


Abb. 6: Typische Temperaturabhängigkeit der Koerzitivfeldstärke exemplarischer VACODYM-Legierungen

TABELLE 2: CHARAKTERISTISCHE EIGENSCHAFTEN VON VACOMAX BEI RAUMTEMPERATUR (20 °C)

	REMANENZ		KOERZITIVFELDSTÄRKE						ENERGIEDICHTE	
	B_r typ.	B_r min.	H_{cB} typ		H_{cB} min.		H_{cJ} min.		$(BH)_{max}$ typ.	
	T	T	kA/m	kOe	kA/m	kOe	kA/m	kOe		
VACOMAX 262 HRP	1,19	1,17	880	11,1	860	10,8	1710	21,5	265	33
VACOMAX 262 HR	1,19	1,15	875	11,0	845	10,6	1750	22,0	262	33
VACOMAX 262 TP	1,17	1,12	865	10,9	780	9,8	1590	20,0	254	32
VACOMAX 240 HR	1,12	1,05	730	9,2	600	7,5	640	8,0	240	30
VACOMAX 225 HR	1,10	1,03	820	10,3	720	9,0	1590	20,0	225	28
VACOMAX 225 TP	1,07	1,03	790	9,9	720	9,0	1590	20,0	215	27
VACOMAX 225 AP	1,04	0,97	760	9,6	680	8,5	1590	20,0	200	25
VACOMAX 190 HR	1,06	1,01	830	10,4	755	9,5	1195	15,0	215	27
VACOMAX 170 HR	1,01	0,95	755	9,5	710	8,9	1195	15,0	200	25
VACOMAX 175 AP	1,00	0,95	780	9,8	680	8,5	1990	25,0	195	24,5
VACOMAX 145 S	0,90	0,85	660	8,3	600	7,5	1990	25,0	160	20

VACOMAX $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

VACOMAX SmCo_5

TYPISCHE ENTMAGNETISIERUNGSKURVEN UND TEMPERATURABHÄNGIGKEITEN DER KOERZITIVFELDSTÄRKEN

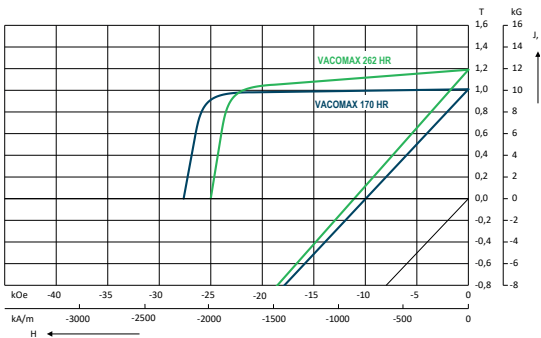


Abb. 7: Typische Entmagnetisierungskurven von exemplarischen VACOMAX-Legierungen bei 20 °C

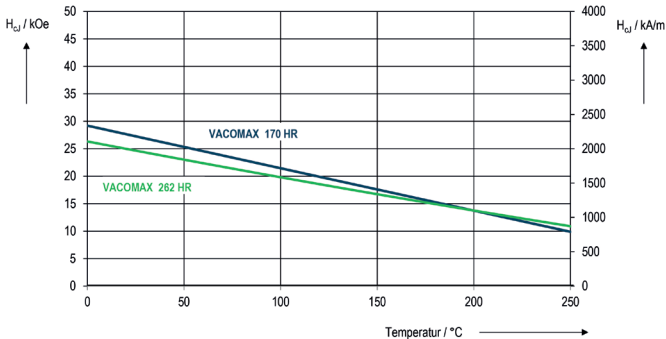


Abb. 8: Typische Temperaturabhängigkeit der Koerzitivfeldstärken exemplarischer VACOMAX-Legierungen

Voraussetzung zur Erreichung der für die einzelnen Werkstoffe in den obigen Tabellen angegebenen magnetischen Eigenschaften ist die vollständige Magnetisierung

der Magnete. Das Aufmagnetisierungsverhalten hängt maßgeblich vom verwendeten Werkstoff, der Einbauform und der Vorgeschichte der Magnete ab.

TABELLE 3: INNERE AUFMAGNETISIERUNGSFELDSTÄRKE FÜR VACODYM UND VACOMAX

WERKSTOFF	H _{mag min.}	
	kA/m	kOe
VACODYM	2500	31
VACOMAX 225/262	3650	46
VACOMAX 240	2000	25
VACOMAX 145/170	2000	25

Weiterführende Informationen zum Magnetisierungsverhalten findet man z.B. bei Hilzinger und Rodewald, "Magnetic Materials" (ISBN 978-3-89578-352-4) oder in IEC/TR 62517 "Magnetizing Behaviour of Permanent Magnets".

Vor dem Magnetisieren unserer Materialien aus VACODYM und VACOMAX empfehlen wir Kontakt mit unseren Spezialisten aufzunehmen.

IRREVERSIBLE VERLUSTE

Ein vollständig aufmagnetisierter Permanentmagnet verliert einen Teil seines magnetischen Moments, wenn er einem magnetischen Gegenfeld ausgesetzt wird. Hierbei muss man zwischen reversiblen und irreversiblen Verlusten unterscheiden. Die reversiblen Verluste verschwinden, wenn der Magnet dem Gegenfeld nicht mehr ausgesetzt ist. Sie rühren in erster Linie von der reversiblen Permeabilität des Magneten, der für Magnete auf Basis von NdFeB in der Größenordnung $\mu_{rev}=1,05$ liegt, her. Bei den irreversiblen Verlusten werden Teile des Magneten umgepolt und es verbleiben Verluste nach dem Wegfall des Gegenfeldes.

Um die irreversiblen Verluste zu spezifizieren und auch zu messen, sind nachfolgende drei Methoden möglich:

- Alterung des Magneten bei erhöhter Temperatur und Bestimmung der irreversiblen Verluste. Diese Methode ist sehr arbeits- und zeitintensiv und wird deshalb nur selten angewandt.
- Messung der J(H)-Kurve und Bestimmung der Feldstärke, bei der J um 10 % abgenommen hat. Diese Feldstärke wird als Kniefeldstärke $H_{K,90}$ bezeichnet. $H_{K,90}$ ist somit die Feldstärke bei der sich die J(H)-Kurve und die Parallele zur H-Achse, die durch $J = 0,9 \times B_r$ definiert ist, schneiden (siehe Abb. 9). Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass wegen der reversiblen Permeabilität von NdFeB-Magneten bei hohen Koerzitivfeldstärken H_{cJ} nicht die irreversiblen Verluste, sondern nur die reversiblen Verluste berücksichtigt werden.
- Nach Norm IEC 60404-8-1 Ed. 3 werden die irreversiblen Verluste für NdFeB-Magnete durch die Messgröße H_{D5} beschrieben.

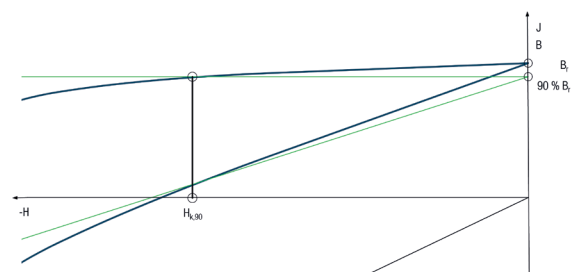


Abb. 9: B(H) und J(H) Entmagnetisierungskurve mit $H_{K,90}$ -Auswertung

Die Messung beruht auf der Bestimmung der J(H)-Kurve mit einem Hysteresegraphen (siehe Abb. 10). Um Effekte durch die Bearbeitung der Oberfläche auszuschließen, wird die reversible Permeabilität μ_{rev} dadurch bestimmt, dass im H-Feldbereich 20-70 % vom H_{cJ} ein linearer Fit an die J(H)-Kurve gelegt wird. Der Schnittpunkt der J/B-Achse ergibt dann $B_{r,lin}$. Dieser Wert kann dann wegen der Oberflächeneffekte unterhalb der Remanenz B_r des Magneten liegen. Danach wird diese Gerade um 5 % zu niedrigeren J-Werten verschoben (Schnittpunkt B_p mit der J/B-Achse bei 95 % von $B_{r,lin}$). Dann wird der Schnittpunkt dieser Geraden mit der J(H)-Kurve bestimmt und das entsprechende H-Feld abgelesen. Dieses Feld erhält den Namen H_{D5} und repräsentiert die Feldstärke, bei dem der Magnet einen irreversiblen Verlust von 5 % seines magnetischen Moments aufweist. Die VACUUMSCHMELZE weist auf Anfrage für alle VACODYM-Legierungen die H_{D5} -Werte bei 20 °C sowie auch bei höheren Anwendungstemperaturen aus.

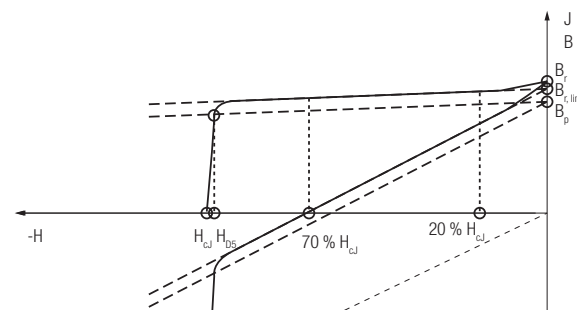


Abb. 10: B(H) und J(H) Entmagnetisierungskurve mit H_{D5} -Auswertung

KORROSIONSVERHALTEN UND BESCHICHTUNGEN

KORROSIONSVERHALTEN

Selten-Erd-Elemente (SE) werden aufgrund ihres stark negativen elektrochemischen Standardpotenzials ($E^0 = -2,2 \text{ V}$ bis $-2,5 \text{ V}$) zu den unedlen und damit sehr reaktionsfreudigen Elementen gerechnet.

Ihre chemische Reaktivität ähnelt der von Erdalkalimetallen wie z.B. Magnesium. So reagieren die SE-Metalle beispielsweise unter Normalbedingungen bereits langsam bzw. in der Wärme rasch mit Wasser oder Luftfeuchtigkeit unter Freisetzung von Wasserstoff zu Selten-Erd-Hydroxid. Der dabei freigesetzte Wasserstoff kann dann mit freiem SE-Metall unter Bildung von SE-Metallhydriden reagieren.

Dies kann bei NdFeB-Magneten zu einem intergranularen Zerfall führen. Durch Zulegieren ausreichender Mengen von edleren Elementen wie z.B. Kobalt kann diese Reaktion nahezu unterdrückt werden.

Anders sieht es mit der Rotrostbildung aus. Im Fall von kondensierter Feuchte beginnen alle VACODYM-Werkstoffe oberflächlich allmählich zu rosten. Der Einsatz von Kobalt hat hierauf keinen Einfluss. Bei den entstehenden Korrosionsprodukten handelt es sich in erster Linie um unmagnetische Metalloxide bzw. Hydroxide.

Da VACOMAX (SmCo_5 bzw. $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) von Haus einen hohen Kobaltgehalt aufweist, ist auch nach langer Auslagerung (z.B. $> 1000 \text{ h}$) unter hoher Luftfeuchtigkeit (z.B. $> 80 \%$ rel. Feuchte) und erhöhter Temperatur (z.B. $> 80 \text{ °C}$) kein signifikanter Abtrag von Korrosionsprodukten messbar.

OBERFLÄCHENPASSIVIERUNG

Für den Kurzzeitschutz unbeschichteter Magnete zum Zwecke des Transports oder der Lagerung haben wir Passivierverfahren entwickelt, die unsere SE-Dauermagnetwerkstoffe wirksam gegen Umwelteinflüsse, wie z.B. vorübergehend erhöhte Luftfeuchtigkeit, schützen. Bei der standardmäßig aufgetragenen Passivierung bildet sich eine sehr dünne NdFe-Phosphatschicht auf der Werkstückoberfläche.

Die Schichtdicke bei der Phosphatierung liegt im sub- μm -Bereich (typisch $< 0,5 \mu\text{m}$). Dies reicht aus, um die Magnete auch während einer längeren Lagerung unter normalen mitteleuropäischen Umgebungsbedingungen ($T \leq 30 \text{ °C}$, rel. Luftfeuchte $< 70 \%$) vor Rostbefall zu schützen.

Die Dicke der Phosphatschicht liegt im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichts, aus diesem Grund sind Farbschwankungen auf der Oberfläche vollkommen normal und unbedenklich.

OBERFLÄCHENSCHUTZ

Aufgrund ihrer geringen Schichtdicke bietet die Phosphatschicht in einer Reihe von Anwendungen keinen ausreichenden Langzeitschutz für VACODYM-Magnete. Um Magnete unter erschwerten Einsatzbedingungen wirksam vor Korrosionsschäden zu schützen, ist häufig eine Beschichtung notwendig.

Die Auswahl der Beschichtung sowie die Schichtdicke richten sich nach den Umgebungseinflüssen in der Anwendung. Der Korrosionsschutz in Form einer Beschichtung kann nach der Magnetherstellung und Reinigung direkt auf die Magnete aufgetragen werden.

Ebenso ist es möglich, dass der Anwender die Magnete nachträglich im fertigen System schützt. Erprobte Möglichkeiten sind z.B. Bandagierung mit nachträglicher Tränkung, Verguss oder Umspritzen der verbauten Magnete mit Kunstharz, eine dichte Edelstahlkapselung der Magnete sowie die Beschichtung der fertigen Magnetsysteme mit Korrosionsschutzlacken.

Neben dem Korrosionsschutz kann es, je nach Anwendung, weitere Gründe für eine Oberflächenbeschichtung geben:

SCHUTZ VOR MAGNETPARTIKELN

VACODYM und VACOMAX sind Sinterwerkstoffe, bei denen das Auftreten loser Magnetpartikel und Magnetstäube auf der Oberfläche nicht auszuschließen ist. Bei bestimmten Anwendungen (z.B. Systemen mit engen Arbeitsluftspalten) können freie Magnetteilchen zur Funktionsbeeinträchtigung bzw. zur Zerstörung des Magnetsystems führen. Daher sollte die Beschichtung eine rückstandsfreie Reinigung der Magnete ermöglichen.

HANDLINGSSCHUTZ

Häufig treten bei der Montage oder beim Einsatz von Magneten in Systemen mechanische Belastungen der Werkstoffe auf. Diese können unter Umständen zum Ausbrechen von Magnetteilchen, insbesondere im Bereich scharfer Kanten, führen. Bei jedem Anwendungsfall von VACODYM und VACOMAX ist deshalb zu prüfen, ob und wie die Oberfläche zu schützen ist. Wir haben das Verhalten unserer Dauermagnete unter den verschiedensten Einsatzbedingungen getestet und beraten Sie gerne bei der Auswahl des richtigen Oberflächenschutzes für Ihren Anwendungsfall.

BESCHICHTUNGEN

Die Beschichtungen lassen sich in metallische und organische Beschichtungen untergliedern. Für besondere Korrosionsanforderungen können auch Doppelbeschichtungen Metall/Metall oder Metall/Lack angeboten werden. Außerdem stehen auf Anfrage Spezialbeschichtungen wie z.B. Nickel/Gold für medizinische Anwendungen zur Verfügung.

Die überwiegende Zahl aller Anwendungsfälle wird aber durch unsere VACCOAT®-Sprühlackierungen sowie die Beschichtung „Galvanisch-Zinn“ abgedeckt. Die Beschichtungen ergänzen sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften.

Die VAC führt alle galvanischen Beschichtungen sowie die Sprühlackierungen im eigenen Hause durch, um mit Hilfe modernster Automatisierungstechnik kostengünstig und mit hoher Reproduzierbarkeit die Qualität der Beschichtungen sicherzustellen. Die beschriebenen Eigenschaften werden nur im sorgfältig aufeinander abgestimmten Zusammenspiel von Magnetgefüge, dessen mechanischer Bearbeitung sowie Reinigung und Beschichtung erzielt.

Sonderbeschichtungen wie beispielsweise Titanitrid werden über Unterlieferanten bereitgestellt, die von VAC sorgfältig ausgewählt und qualifiziert wurden. Durch geeignete Qualitätssicherungsmaßnahmen wird ein gleichbleibend hohes Qualitätsniveau bei der Serienfertigung erreicht.

EPOXYSPRÜHLACKIERUNG VACCOAT

Diese im eigenen Hause entwickelte Beschichtung setzt Maßstäbe hinsichtlich der Kombination aus Korrosionsschutz, Temperaturbeständigkeit, Lackapplikation sowie der späteren Weiterverarbeitung der beschichteten Magnete zu Systemen.

VACCOAT 20011 bewirkt im ausgehärteten Zustand einen hochwertigen Korrosionsschutz auf VACODYM. Der unausgehärtete Lackfilm kann gleichzeitig als hochfester Klebstoff zwischen Magneten dienen. Es bildet sich beim Einbrennen der Lackierung eine hochfeste Klebeverbindung mit Scherfestigkeitswerten von typischerweise $> 15 \text{ N/mm}^2$ aus. Gleichzeitig wird das System durch den Lacküberzug wirksam vor Korrosion geschützt. Der eingebrannte Lackfilm weist eine Bleistift Härte von mindestens 4H auf und ist bis ca. 200°C thermisch belastbar. Es können in einem Arbeitsgang Schichten zwischen $10 \mu\text{m}$ und $20 \mu\text{m}$ von hoher optischer Güte erzeugt werden (gemessen Mitte Polfläche). Die Farbe der Lackierung ist einstellbar (Standardfarbe: schwarz). Die Beschichtung ist abriebfest und weist ein sehr gutes elektrisches Isolationsverhalten auf. Die Schichten werden in einem automatisierten Batch-Prozess auf die Magnete aufgebracht.

VACCOAT 20021 wird durch das kostengünstige Schüttgutverfahren aufgebracht. Diese Lackierung ist für Magnete innerhalb eines bestimmten Aspektverhältnisses mit einem Gewicht $< 8 \text{ g}$ geeignet. Nähere Informationen erhalten Sie bei unseren Mitarbeitern.

Abhängig von der Magnetgröße sind zur vollständigen Bedeckung Radien an den Kanten vorzusehen.

Für den höchsten Korrosionsschutz bieten wir die Lackierung VACCOAT 30033 an. VACODYM-Magnete, die mit dieser Einbrennlackierung geschützt sind, zeigen sowohl im Salzsprüh-test nach DIN EN ISO 9227 als auch im Autoklaventest bei 130°C / 100 % Feuchte / 2,7 bar und Auslagerungszeiten von mehr als 1.000 Stunden keine Korrosion. Die anderen Eigenschaften (z. B. mechanische Kennwerte, Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit) sind vergleichbar zu VACCOAT 20011.

Sowohl VACCOAT 30033, als auch VACCOAT 20011 können nur durch den automatisierten Batch-Prozess aufgetragen werden. Hierbei können auch flache oder andere ungünstige Geometrien beschichtet werden, die im Schüttgutverfahren nicht möglich sind. Das minimale Teilengewicht beträgt 1 g.



Abb. 11: Kantenbedeckung mit VACCOAT im Schliffbild

ALUMINIUMSPRÜHLACKIERUNG VACCOAT 10047

Die mit Aluminiumflakes gefüllte Einbrennlackierung weist ähnlich gute Klima- und Salzsprühbeständigkeit wie die Epoxysprühlacke VACCOAT 200XX auf. Schon ab 10 µm Schichtdicke werden Langzeitautoklaven- und Salznebeltests problemlos bestanden.

Die Lackmatrix ist für Anwendungen mit Einsatztemperaturen bis ca. 200 °C geeignet und weist eine sehr gute Chemikalienbeständigkeit auf.

Aufgrund der hohen Härte der Lackierung (typisch 6H - 8H Bleistifthärte) ist die Beschichtung unempfindlich in Hinblick auf mechanische Beschädigungen.

Als besonders vorteilhaft erweist sich diese Beschichtung im Hinblick auf die Schüttgutlackierung von Kleinteilen. Durch die eingebauten Aluminiumflakes wird eine sehr gute Kantenbedeckung erreicht. In Verbindung mit ausgezeichneter Substrathaftung werden Kantenschäden während des Lackierprozesses wirksam verhindert.

GALVANISCH-ZINN

Galvanisch aufgebrachte Zinnschichten sind ein guter Korrosionsschutz gegen Einflüsse der Atmosphäre, Feuchtigkeit sowie von schwachen Säuren und Laugen. Die aufgebrachten Zinnschichten sind dicht und frei von durchgängigen Poren. Der typische Schichtdickenbereich bei Magneten beträgt 15 µm – 30 µm. Die Zinnschichten sind in ihrem äußeren Erscheinungsbild silberweiß und schwach glänzend.

Im Temperaturbereich von -40 °C bis zum Schmelzpunkt des Zinns (232 °C) werden keine Phasenumwandlungen beobachtet. Durch den bei VAC speziell für SE-Magnete entwickelten Abscheideprozess kommt es zu keiner Was-

serstoffschädigung der Magneto­berfläche während der Beschichtung, wie sie zum Beispiel bei einer Nickelbeschichtung häufig auftritt.

Die Beschichtung kann für Kleinteile in Form von Schüttware kostengünstig in der Trommel vorgenommen werden. Für große Teile wird im Gestell galvanisiert, wobei der Übergang Trommel-Gestell durch das Teilgewicht bzw. die Teilegeometrie vorgegeben ist (typischer Richtwert: < 25 g Trommel, > 25 g Gestell).

Die galvanischen Zinnschichten zeichnen sich insbesondere durch ihre hohe Klimabeständigkeit im Feucht-Warm-Klima (z.B. 85 °C / 85 % rel. Feuchte) aus, wie sie in der Regel für Elektronikanwendungen gefordert wird. Zinn weist eine hohe Duktilität auf und ist in einem breiten Schichtdickenbereich nahezu frei von inneren Spannungen und mit hoher Fertigungssicherheit abscheidbar. Es besteht keine Gefahr des Aufreißens oder Abblätterns der Schicht.

Zinnschichten lassen sich rückstandsfrei reinigen und bilden für viele Klebstoffe einen idealen Haftgrund.

TITANNITRID

Für UHV-Anwendungen, bei denen auf kürzeste Abpumpzeiten Wert gelegt wird, ist die Titan­nitrid­beschichtung (TiN) ideal geeignet. Diese Beschichtung wird in dünner Schicht (2 µm - 6 µm) im Sputterverfahren nach einem von VAC patentierten Prozess auf den Magneten abgeschieden. Die TiN-Beschichtung ermöglicht die Fertigung von Magneten mit extrem engen Toleranzen. Der speziell für VACODYM-Magnete sowie für weichmagnetische Flussleitstücke, z.B. aus VACOFLUX, entwickelte Prozess führt zu festhaftenden, dichten Schutzschichten mit hoher Verschleißfestigkeit. Auf Wunsch reinigen und verpacken wir die Teile in einem zusätzlichen Prozess UHV-tauglich.

EIGENSCHAFTSPROFIL VERSCHIEDENER BESCHICHTUNGEN

Tabelle 4 zeigt einen Eigenschaftsvergleich der wichtigsten Beschichtungen und soll als Leitfaden bei der Auswahl des Oberflächenschutzes dienen. Aufgeführt ist jeweils die typische Schichtdicke der Beschichtungen, die gewährleistet bei den meisten Anwendungen einen ausreichenden Korrosionsschutz. Für höhere Korrosionsschutzanforderungen muss die Schichtdicke entsprechend angepasst werden. Weiterhin ist zu beachten, dass durch unsachgemäße Handhabung die Integrität der Beschichtung beeinträchtigt werden kann.

TABELLE 4: TYPISCHE EIGENSCHAFTEN VERSCHIEDENER BESCHICHTUNGEN

Beschichtung	Verfahren	typische Schichtdicke	Farbe	Härte	Beständigkeit				Einsatztemperatur
					Feuchtigkeit	Salzsprühtest	Schadgastest	elektrische Isolierwirkung	
VACCOAT 20011	Lackierautomat	> 10 µm	schwarz	> 4H ¹⁾	+	+	+	++	< 200 °C
VACCOAT 20021	Lackierautomat	> 10 µm	schwarz	> 4H ¹⁾	0	+	+	++	< 200 °C
VACCOAT 30033	Lackierautomat	> 10 µm	grün	> 4H ¹⁾	++	++	+	++	< 200 °C
VACCOAT 10047	Lackierautomat	> 10 µm	gelb halbgläzend	> 4H ¹⁾	+	++	+	0	< 200 °C
Zinn (Sn)	Galvanik	> 15 µm	silber glänzend	HV 10 ²⁾	+	0	0	-	< 160 °C
TiN	Sputtern	> 2 µm	goldfarben	HV > 500 ²⁾	UHV-Anwendung				< 200 °C

¹⁾ Bleistift Härte

²⁾ Vickers Härte (Richtwerte)

Die überwiegende Anzahl der bei VAC gefertigten SE-Dauermagnete wird zum Aufbau von Magnetsystemen klebtechnisch fixiert. Für ein Magnetsystem sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- European Scheme for the Education and Qualification of Welding, Joining and Cutting Personnel*

Aufgrund unserer langjährigen Erfahrung beim Aufbau von SE-Dauermagnetsystemen können wir Ihnen folgende Hinweise zum Kleben von Magneten geben:

a) Säurehaltige Klebstoffe dürfen in Verbindung mit SE-Magneten, insbesondere VACODYM, nicht eingesetzt werden. Die sauren Bestandteile führen, unterstützt durch Feuchtigkeit, zu einer Zersetzungsreaktion des Magnetwerkstoffes an der Grenzfläche Klebstoff-Magnet und können damit ein Versagen der Klebung auslösen. Selbst bei beschichteten Magneten, insbesondere lackierten Magneten, ist der Einsatz solcher Klebstoffe nicht zu empfehlen.

b) Bei großflächigen Verklebungen mit Eisen oder anderen Substraten sind die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der SE-Magnetwerkstoffe zu berücksichtigen. Speziell in Verbindung mit VACODYM, welches einen negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ($-1 \times 10^{-6}/K$) senkrecht zur Magnetisierungsrichtung (und damit in der Regel parallel zur Klebefläche) besitzt, kommt es bei Temperaturwechselbelastung zum Aufbau von Spannungen, die der Klebstoff aufnehmen muss. Unsere Fachleute beraten Sie hierbei gerne.

c) Bei der Vorbereitung der Klebung sollte auf Sandstrahlen zur Vorbehandlung des SE-Magneten verzichtet werden. Durch diesen Fertigungsschritt kann es zu Gefügeauflockerungen an der Oberfläche des Sintermagneten kommen.

Unsere Dauermagnete werden klebefähig ausgeliefert. Die nach dem Reinigen aufgebrachte Passivierung ist ein geeigneter Haftgrund für die meisten Klebstoffe. Falls dennoch auf eine Vorbehandlung unmittelbar vor der Verklebung Wert gelegt wird, ist eine Reinigung der Klebefläche mit Lösemitteln wie Aceton oder Waschbenzin zu empfehlen.

d) Die Auswahl eines Klebstoffes für einen unbeschichteten Magneten ist nicht zwangsläufig auf einen beschichteten Magneten anwendbar. Bei lackierten Magneten ist darauf zu achten, dass der Klebstoff den Lack nicht chemisch angreift oder anquillt. Bei VAC liegen umfangreiche Erfahrungen mit einer Vielzahl an Klebstoffen und mit den meisten gebräuchlichen Oberflächen vor. Wir unterstützen Sie gerne bei der Auswahl des richtigen Klebstoffes oder bei der Auslegung eines kompletten Magnetsystems.

Unsere besondere Kompetenz liegt im Fügen von magnetisierten Magneten, wodurch wir höchste Anforderungen, wie z.B. die Herstellung von Halbach-Systemen erfüllen. Unsere Produktqualität wird durch speziell ausgebildetes Fachpersonal sichergestellt, darunter vom IFAM zertifizierte Klebpraktiker und Klebefachkräfte. Damit erfüllen wir im Wesentlichen die Anforderungen aus der DIN 2304.

MAGNETSYSTEME

Die Herstellung von Magnetsystemen ist äußerst anspruchsvoll. Die Umsetzung von kundenspezifischen Anforderungen bis hin zum individuellen Magnetsystem umfasst die ausführliche Beratung, Planung, Konstruktion und schließlich die Fertigung von Magneten, Teilen und/oder kompletten Systemen. Durch unsere jahrzehntelange Erfahrung in der Entwicklung und Fertigung von dauer- und weichmagnetischen Werkstoffen, daraus weiter veredelten Komponenten jeder Größe und Komplexität sowie zertifizierten Fertigungseinrichtungen sind wir eine der wenigen Firmen, die alle Arbeitsschritte aus einer Hand anbietet. Dabei werden wir allerhöchsten Ansprüchen an Präzision und Zuverlässigkeit ebenso gerecht, wie auch der Erfüllung zahlreicher Normen.

Anhand der Kundenspezifikation, dem Anforderungsprofil mit der gewünschten Funktion des Magnetsystems, den erlaubten Abmessungen sowie den thermischen, mechanischen, klimatischen und elektrischen Randbedingungen erarbeiten wir gemeinsam Lösungen für Ihr Design. Auf dieser Basis erstellen wir ein Rahmenkonzept mit einer Richtkalkulation für die Umsetzung des Systems.

Wir begleiten den Designprozess mit Grundlagen, Daten und unserem Experten-Know-how. Außerdem begleiten wir die Kundenprojekte mit mehreren technischen Methoden, wie:

- numerischen und analytischen Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Feldprofile und der wirkenden Kräfte und Drehmomente
- Finite-Elemente-Verfahren in zwei und drei Dimensionen
- besonderen Prüfverfahren zur Messung magnetischer Eigenschaften
- besonderen elektrischen/mechanischen Prüfungen an magnetisierten Systemen
- gängigen CAD Systemen (STP-, IGES-, DXF-Files)

MAGNETSYSTEME IN JEDER GRÖSSE UND KOMPLEXITÄT:

HALBACH-ANORDNUNG AUCH FÜR HOCHLEISTUNGSMOTOREN

Durch unsere Presstechnik und Auslegungskompetenz können wir Magnete mit eingepprägten speziellen Feldprofilen herstellen, die eine Teil-Halbach-Anordnung darstellen. Das dabei entstehende konvergierende Feld führt zu einer Flusskonzentration im Luftspalt, was zur Leistungssteigerung einer elektrischen Synchronmaschine beiträgt. Man bezeichnet solche Magnete auch als Magnete mit einem ausgeprägten Nord/Süd-Effekt (engl. hot-side/cold-side effect (h-c effect)). Abbildung 12 zeigt einen Rotor mit vergrabenen Magneten mit einem hohen Nord/Süd-Effekt, der zu einer Steigerung des Drehmoments von 6 % führen kann.

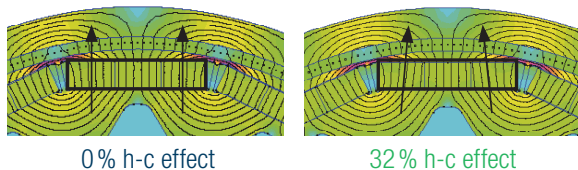
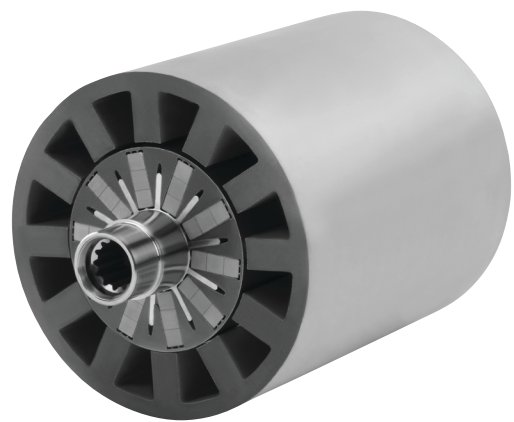
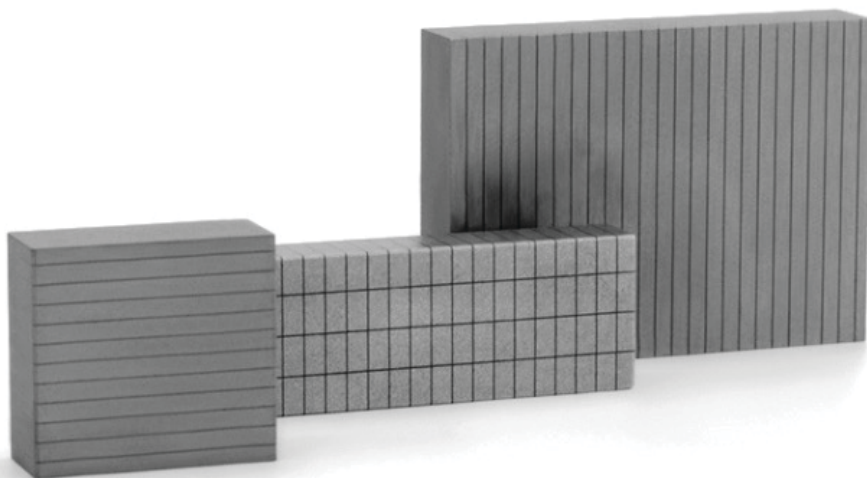


Abb. 12: Die Luftspalt-Flussdichte kann durch die Verwendung eingebetteter magnetisch profilierter und ausgerichteter Magneten erhöht werden. Dies kann gezeigt werden durch die Verwendung von Magneten mit hot-side/cold-side effect.



Während eine Teil-Halbach-Anordnung im optimierten Werkzeugpressen realisierbar ist, ist eine vollständige Halbach-Anordnung nur durch die Montage von Magneten mit verschiedenen Orientierungen realisierbar. Die hierfür notwendige Montage im aufmagnetisierten Zustand erfolgt durch eigens entwickelte Vorrichtungen und Verfahren.



SEGMENTIERTE MAGNETE

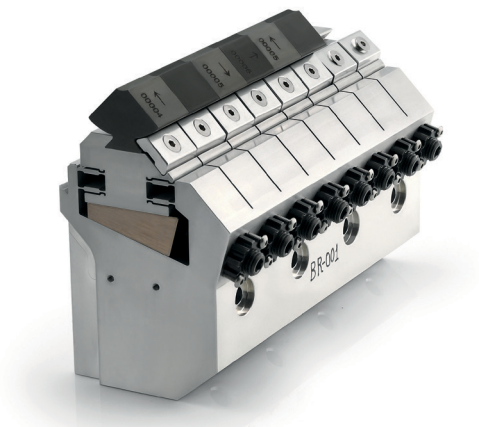
Ein hoher Wirkungsgrad und niedrige Wirbelstromverluste erfordern segmentierte Magnete, die speziell elektrisch isolierend gefertigt werden. Mit Segmentdicken von unter 1 mm und einem Klebespalt von unter 15 µm sichern wir die elektrische Isolierung bei gleichzeitiger hoher Packungsdichte.

Bandagierte Rotorbaugruppen, bestehend aus mit Magneten bestückten Rotoren, kommen überwiegend in der Luft- und Raumfahrt, Automobil, Motorsport und Industrieanwendungen zum Einsatz. Bandagen aus Verbundwerkstoffen (z.B. CFK, GFK) oder Hülsen aus Metall-Legierungen sichern die Konstruktion von schnelldrehenden elektrischen Maschinen mit Drehzahlen von über 100.000 U/min.

Wir haben Erfahrung im Aufschrumpfen von Metallhülsen aus beispielsweise Inconel 718 oder im Bandagieren von Verbundwerkstoffen. Auch das Einschrumpfen von Wellen sowie das Wuchten und ggf. Schleudern von gesamten Rotoren gehören zum Lieferprogramm.



PRÄZISIONS-BAUGRUPPEN



In naturwissenschaftlichen Anwendungen wie Undulatoren kommen Baugruppen bestehend aus NdFeB (VACODYM) oder SmCo (VACOMAX) Magneten mit Flußleitstücken aus beispielsweise CoFe (VACOFLUX) zum Einsatz. Die Fertigung erfolgt mit höchster Präzision, so dass Magnetsysteme mit unter 1 % Abweichung im magnetischen Moment und einer magnetischen Winkelabweichung kleiner 1 ° mit gleichzeitigem Nord-Süd-Effekt kleiner 1 % realisierbar sind.

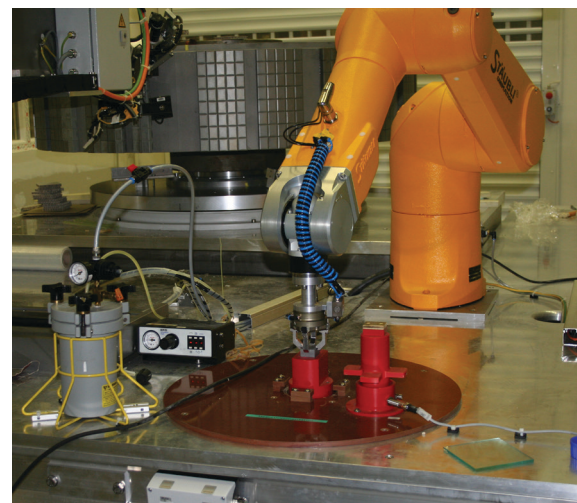
AUTOMATISIERTE-BAUGRUPPEN-MONTAGE

Magnetsysteme für die Automobilindustrie oder Medizintechnik mit hohen Jahresmengen werden im Haus in speziell dafür entwickelten Fertigungslinien automatisiert gefertigt.

Das automatisierte Bestücken von magnetisierten Magneten auf Groß-Rotoren für Generatoren oder elektrische Maschinen ist bis zur Serienreife umgesetzt.

KLEINSERIEN-SONDERBAUGRUPPEN-MONTAGE:

Magnetsysteme mit kleinen Jahresmengen können flexibel auf Einzelarbeitsplätzen entsprechend der Kundenanforderungen montiert werden. Bei Bedarf kann die Endmontage direkt beim Kunden durchgeführt werden.



TECHNISCHE LIEFERBEDINGUNGEN

Gesinterte Magnete aus SE-Legierungen sind wie die meisten anderen Dauermagnetwerkstoffe spröde. Es kann bei diesen Werkstoffen nicht ausgeschlossen werden, dass Magnete feine Haarrisse, mikroskopische Poren oder Kantenabbrüche aufweisen. Die magnetischen und mechanischen Eigenschaften der Teile entsprechen den üblichen Spezifikationen und werden dadurch nicht nennenswert beeinflusst.

Falls keine besonderen Vereinbarungen mit unseren Kunden vorliegen, sind bei der Qualitätsprüfung mechanische Oberflächenbeschädigungen (Abplatzer, Kanten- und Eckenabbrüche) bis zu einer Summe von max. 2 % je Polfläche zulässig. Für Kleinmagnete und für Magnete, deren Polfläche die kleinste Teiloberfläche darstellt sowie für diametrale Ronden sind die zulässigen Grenzen in Abstimmung mit dem Kunden festzulegen. Bei besonderen Anforderungen hat sich zur Prüfung und Festlegung der visuellen Beschaffenheit der Magnete der Austausch von Grenzmustern bewährt. Feine Haarrisse werden bis zu einem Drittel der betroffenen Querschnittsfläche nicht beanstandet, soweit Einschränkungen der mechanischen

Stabilität des Magneten hieraus nicht zu erwarten sind. An unbeschichteten und besonders an aufmagnetisierten Teilen können geringfügige magnetische Staub- und Materialreste haften. Bei höheren Anforderungen an die Sauberkeit können geeignete Maßnahmen angeboten werden.

Die Endprüfung unserer Magnete und Magnetsysteme wird üblicherweise auf der Basis genormter Stichprobensysteme durchgeführt. Soweit kundenspezifisch keine anderen Vereinbarungen getroffen wurden, erfolgt die Festlegung der Stichprobenumfänge für die mechanische und magnetische Prüfung gemäß DIN ISO 2859-1 mit Annahmehzahl $c = 0$. Durch konsequenten Einsatz moderner Qualitätssicherungstechniken können wir in vielen Fällen auf Wunsch des Kunden wesentlich höhere Qualitätsanforderungen vereinbaren.

Abnahmebedingungen, die spezielle magnetische Eigenschaften betreffen, setzen abgestimmte Prüfverfahren oder Referenzmuster voraus. Oft ist dazu Voraussetzung, dass die Teile aufmagnetisiert geliefert werden.

SICHERHEITSHINWEISE

Aufmagnetisierte Seltenerd-Magnete aus VACODYM und VACOMAX weisen in ihrer Nähe hohe magnetische Feldstärken und starke anziehende Kräfte auf Eisen und andere magnetische Teile auf. Sie müssen daher vorsichtig von qualifizierten und geschulten Mitarbeitern gehandhabt werden, um Beschädigungen zu vermeiden. Aufgrund der starken Magnetkräfte besteht beim Umgang mit größeren Magneten Verletzungsgefahr. Sie sind daher einzeln oder mit Abstandhalten zu handhaben. Es wird empfohlen, ebenso wie beim Umgang mit unbeschichtetem VACOMAX und vernickelten Teilen, geeignete persönliche Schutzausrüstung zu tragen. Dies gilt insbesondere für Personen mit Metallallergien.

In der Nähe befindliche elektronische Geräte und Messinstrumente können durch die hohen Feldstärken ihre Kalibrierung verändern oder beschädigt werden. Insbesondere sind aufmagnetisierte Magnete in sicherer Entfernung (z.B. größer 2 m) von Computern, Bildschirmen und allen magnetischen Datenträgern (z.B. Disketten, Scheckkarten, Audio- und Videobändern usw.) sowie von Herzschrittmachern zu halten. Beim Anschlag von SE-Magneten

können kräftige Schlagfunken entstehen. Diese Magnete dürfen daher nie in explosiver Atmosphäre gehandhabt werden.

Der Einsatz von ungeschütztem VACODYM und VACOMAX in Wasserstoff ist unbedingt zu vermeiden. Wasserstoffeinlagerungen zerstören die Gefügestruktur und führen zur Auflösung des Magneten. Den einzig wirksamen Schutz bietet in diesen Fällen eine gasdichte Kapselung der Magnete. Falls Magnete weiterbearbeitet werden sollen, sind besondere Vorsichtsmaßnahmen im Umgang mit dem anfallenden Schleifschlamm zu beachten. Insbesondere bei VACOMAX sind die gesetzlichen Vorschriften hinsichtlich des Umgangs mit kobalthaltigen Stäuben zu berücksichtigen. Des Weiteren bestehen die VACOMAX-Legierungen aus Samarium, welches eine geringe natürliche Radioaktivität aufweist.

Weitergehende wichtige Informationen zum sicheren Umgang mit VACODYM- bzw. VACOMAX-Magneten erhalten Sie in unseren legierungsspezifischen Sicherheitsdatenblättern. Diese finden Sie im Downloadbereich unserer Homepage.

QUALITÄTS- UND UMWELTMANAGEMENT

Qualität ist ein wesentlicher Gesichtspunkt unserer Unternehmenspolitik. Auf der Grundlage eines nach ISO 9001, IATF 16949 sowie AS/EN 9100 zertifizierten Qualitätsmanagementsystems legen wir größten Wert auf eine enge Zusammenarbeit aller Funktionsbereiche, um die hohe Qualität unserer Produkte und Dienstleistungen zuverlässig zu verwirklichen.

Grundlage unseres Integrierten Managementsystems sind folgende Regelwerke in ihrer jeweils aktuellen Fassung:

- **ISO 9001**
- **IATF 16949**
- **EN 9100**
- **ISO 14001**
- **ISO 45001**
- **ISO 50001 / EN 16247**

Wichtigstes Ziel aller unserer Maßnahmen zum Qualitätsmanagement ist die Erfüllung aller Kundenerwartungen und eine hohe Kundenzufriedenheit, sowohl extern als auch intern.

Durch die Festlegung und Einführung gezielter QM-Maßnahmen während der Produkt- und Prozessplanung, streng

kontrollierte Rohmaterialbeschaffung und im Prozess integrierte Prüfabläufe – mittels statistischer Prozesskontrolle – erzeugen wir die vom Kunden geforderte Produktqualität. Die Einhaltung entsprechender Prozessfähigkeiten (C_{pk} -Werte) ist für uns so selbstverständlich wie die Dokumentation der wesentlichen magnetischen und geometrischen Eigenschaften. Bei komplexen Aufgabenstellungen bzw. besonders hohen Anforderungen legen wir in Zusammenarbeit mit unseren Kunden gemeinsam abgestimmte Qualitätssicherungsprogramme fest. Wir helfen durch qualifizierte technische Beratung qualitätsgerechte, kostengünstige Produkte und Dienstleistungen zu konzipieren und zu realisieren und schließen auf Kundenwunsch auch Qualitätssicherungsvereinbarungen ab.

Wir sehen unsere Kernkompetenz in der Erzeugung von Materialien mit speziellen hochwertigen magnetischen Eigenschaften. Deshalb erachten wir es als wichtig, auch auf dem Gebiet der magnetischen Messtechnik unsere magnetischen Kenngrößen entsprechend abzusichern, indem wir uns aktiv an der nationalen und internationalen Normung der einschlägigen Messverfahren, wie z.B. der Norm IEC 60404-5 zur Messung der Entmagnetisierungskurven im Hysteresegraphen, beteiligen.

TECHNISCHE GRUNDLAGEN UND BEGRIFFE

HYSTERESESCHLEIFE

Das Verhalten eines Magnetwerkstoffs im Magnetfeld wird durch den Zusammenhang zwischen magnetischer Flussdichte (Induktion) B bzw. magnetischer Polarisation J und magnetischer Feldstärke H , den so genannten $B(H)$ - bzw. $J(H)$ -Hystereseschleifen (Abb. 13), charakterisiert. Die Induktion B und die Polarisation J sind verknüpft durch die Beziehung

$$B = \mu_0 H + J$$

Der 1. Quadrant der Hystereseschleife beschreibt das Aufmagnetisierungsverhalten des Werkstoffs: Bei Anlegen eines Magnetfeldes H ändert sich die Induktion B eines unmagnetisierten Werkstoffs entlang der Neukurve (vgl. Abb. 13).

Wenn alle magnetischen Momente parallel zum äußeren Magnetfeld ausgerichtet sind, hat die Polarisation J ihren Maximalwert, die Sättigungspolarisation J_s , angenommen ($J = J_s = \text{const.}$). Die Induktion B steigt jedoch weiter linear mit der Feldstärke H an.

Die Mindestfeldstärke, die aufgebracht werden muss, um die Sättigungspolarisation zu erreichen, wird als Sättigungsfeldstärke H_s bezeichnet. Wird – ausgehend vom aufmagnetisierten Zustand – die Magnetfeldstärke reduziert, so ändert sich die Induktion gemäß der Hystereseschleife und erreicht bei $H = 0$ die Remanenzinduktion (Remanenz) B_r (Schnittpunkt der Hystereseschleife mit der Ordinate).

Bei den hier beschriebenen stark anisotropen SE-Dauermagneten liegt die Remanenz B_r in der Größenordnung der Sättigungspolarisation J_s :

$$B_r \approx J_s$$

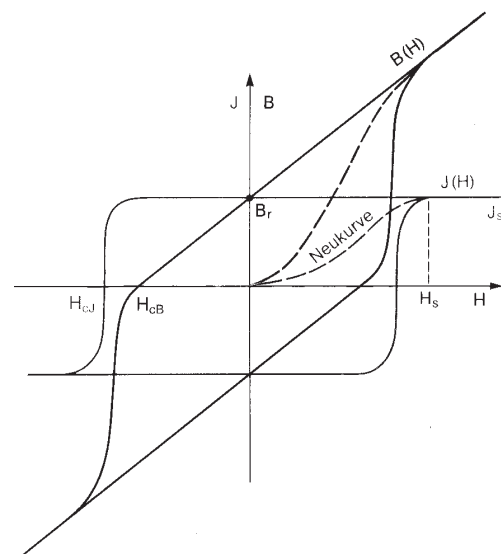


Abb. 13: $B(H)$ und $J(H)$ -Kurve eines Dauermagneten

ENTMAGNETISIERUNGSKURVE:

Der 2. Quadrant der Hystereseschleife beschreibt das Entmagnetisierungsverhalten des Werkstoffs. Für Dauermagnete, die in der Praxis ausschließlich im Gegenfeld betrieben werden (siehe weitere Erläuterungen „Arbeitspunkt“), werden die wichtigsten Kenngrößen aus der Entmagnetisierungskurve bestimmt.

Die wichtigsten Kenngrößen eines Dauermagneten sind:

Remanenz

Sie ergibt sich, wie oben beschrieben, aus dem Schnittpunkt der Hystereseschleife mit der Ordinate (bei $H = 0$ ist $B_r = J_r$).

Koerzitivfeldstärke

Diejenigen Feldstärken, bei denen die Induktion B bzw. die Polarisation J den Wert Null erreichen, werden als Koerzitivfeldstärken der Induktion H_{cB} bzw. der Polarisation H_{cJ} bezeichnet (Schnittpunkte der Hystereseschleifen $B(H)$ und $J(H)$ mit der Abszisse).

Energiedichte

Zu jedem Punkt der Entmagnetisierungskurve kann man das Produkt aus den zusammengehörigen Werten von Induktion B und Feldstärke H bilden (siehe Abb. 14). Dieses Produkt stellt eine Energiedichte dar und durchläuft zwischen Remanenz und Koerzitivfeldstärke einen Höchstwert, die maximale Energiedichte $(BH)_{\max}$. Dieser Wert wird üblicherweise zur Bewertung von Dauermagnetwerkstoffen verwendet.

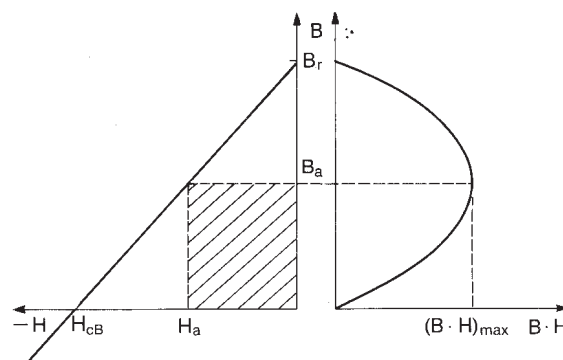


Abb. 14: schematische Darstellung der maximalen Energiedichte unter der B-H-Kurve

Arbeitspunkt

Das von den eigenen Polen eines Dauermagneten ausgehende Magnetfeld wirkt entmagnetisierend, da es der Polarisation J entgegengerichtet ist. Der Betriebszustand eines Dauermagneten liegt daher stets im Bereich der Entmagnetisierungskurve. Das zum jeweiligen Betriebszustand gehörende Wertepaar (B_a, H_a) wird als Arbeitspunkt P bezeichnet. Die Lage von P hängt von der Magnetgeometrie bzw. in Magnetkreisen mit weichmagnetischen Flussleitstücken vom Verhältnis Luftspaltlänge zu Magnetlänge ab. P ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Arbeits- oder Scherungsgeraden mit der $B(H)$ -Kurve (siehe Abb. 15).

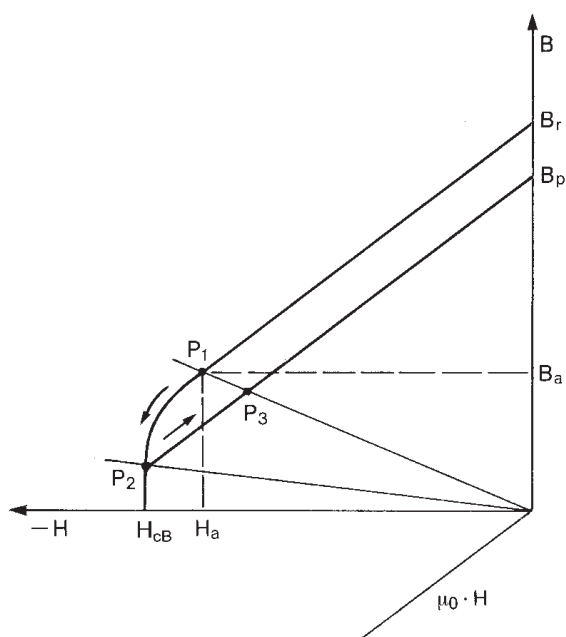


Abb. 15: Darstellung des Arbeitspunktes sowie der irreversiblen Verluste bei zu großer Scherung

Ein Dauermagnet wird in statischen Systemen optimal ausgenutzt, wenn der Arbeitspunkt P im $(BH)_{max}$ -Punkt liegt. In der Praxis sollte die Scherung im Magnetkreis so gewählt werden, dass der Arbeitspunkt eben dort oder besser knapp oberhalb, d.h. bei etwas kleineren Gegenfeldstärken liegt.

In dynamischen Systemen mit sich ändernden Arbeitsgeraden (z.B. Motoren) sollte die Scherung so gewählt werden, dass der Arbeitspunkt des Dauermagneten stets im geradlinigen Bereich der Entmagnetisierungskurve bleibt, um eine hohe Stabilität gegen Fremdfeld- und Temperatureinflüsse sicherzustellen.

Wird der Luftspalt in einem Magnetsystem vergrößert, so verschiebt sich der Arbeitspunkt zu höheren Gegenfeldstärken hin, z.B. von P_1 nach P_2 . Wird die Änderung wieder rückgängig gemacht, so wird der ursprüngliche Arbeitspunkt P nur dann wieder erreicht, wenn P im geradlinigen Teil der Entmagnetisierungskurve liegt.

Befindet sich P_2 jedoch, wie in Abb. 15 dargestellt, unterhalb des „Knies“ in der Entmagnetisierungskurve, so treten irreversible Verluste auf. Der Arbeitspunkt verschiebt sich auf einer inneren Rücklaufkurve bis zum Punkt P_3 mit einer entsprechenden niedrigeren Induktion. Die Steigung dieser Rücklaufkurve wird als permanente Permeabilität bezeichnet.

TEMPERATUREINFLUSS

Die Entmagnetisierungskurven von Dauermagneten sind temperaturabhängig.

Diese Abhängigkeit wird durch die Temperaturkoeffizienten der Remanenzflussdichte $TK(B_r)$ und der Koerzitivfeldstärke $TK(H_{cJ})$ gekennzeichnet:

$$TK(B_r) = \frac{1}{B_r} \times \frac{dB_r}{dT} \times 100 \text{ (\%/K)}$$

$$TK(H_{cJ}) = \frac{1}{H_{cJ}} \times \frac{dH_{cJ}}{dT} \times 100 \text{ (\%/K)}$$

Eine Temperaturänderung bewirkt eine Verschiebung des Arbeitspunktes auf der Arbeitsgeraden (siehe Abb. 16). Solange der Arbeitspunkt dabei im linearen Bereich der Entmagnetisierungskurve bleibt, ändert sich die Induktion reversibel, d.h. nach Abkühlung kehrt die Induktion in den ursprünglichen Wert zurück. Anderenfalls ist die Änderung der Induktion irreversibel (irreversible magnetische Verluste) und ist nur durch erneutes Aufmagnetisieren rückgängig zu machen.

Um irreversible Änderungen der Induktion bei Temperaturänderungen zu vermeiden, muss sich der Arbeitspunkt bei allen Temperaturen, in dem der Magnet eingesetzt wird, im linearen Abschnitt der Entmagnetisierungskurve befinden.

Durch Erwärmen auf Temperaturen oberhalb der Curie-Temperatur T_c lässt sich ein Dauermagnet völlig entmagnetisieren. Nach Abkühlung auf die Ausgangstemperatur kann der alte Magnetisierungszustand durch erneutes Aufmagnetisieren wiederhergestellt werden, wenn bei der Erwärmung keine Gefügeänderungen aufgetreten sind. Generell empfehlen wir vor dem thermischen Entmagnetisieren Rücksprache mit uns zu halten.

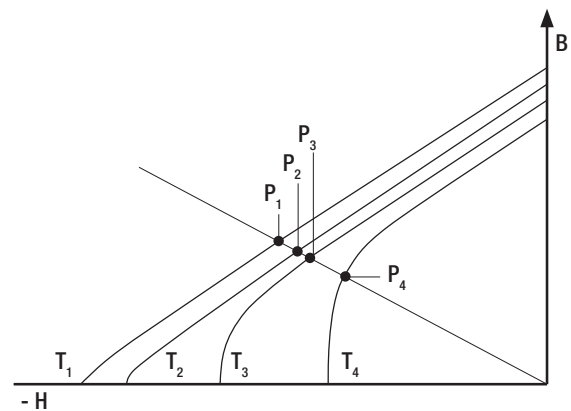


Abb. 16: Einfluss der Temperatur auf die B-H-Kurve und den Arbeitspunkt

MAGNETISCHE GRÖSSEN UND EINHEITEN

Die wichtigsten magnetischen Größen, ihre Einheiten sowie Umrechnungshinweise sind nachstehender Tabelle zu entnehmen:

GRÖSSE UND FORMELZEICHEN	SI-Einheiten ¹⁾	Umrechnungshinweise
Flussdichte B	T (Tesla)	1 T = 1 Vs/m ² = 10 kG Induktion (Kilogauss)
Polarisation J	T (Tesla)	s. Flussdichte B
Magnetische Feldstärke H	A/m	1 A/cm = 0,4 π Oe $\approx$ 1,257 Oe (Oersted)
Energiedichte (BH) _{max} (Güteprodukt)	kJ/m ³	1 kJ/m ³ = 0,126 MGOe
Magnetischer Fluss Φ	Wb (Weber)	1 Wb = 1 Vs = 10 ⁸ Mx (Maxwell)

¹⁾ Grundeinheiten im SI-System:

Meter, Kilogramm, Sekunde, Ampere. Die Einheiten Gauss, Oersted bzw. Maxwell in den Umrechnungshinweisen beziehen sich auf das CGS- bzw. Gaußsche System mit den Grundeinheiten Zentimeter, Gramm und Sekunde.

VACUUMSCHMELZE GMBH & CO. KG

Grüner Weg 37
D 63450 Hanau / Germany
Phone +49 6181 380
Fax +49 6181 382645
info@vacuumschmelze.com
www.vacuumschmelze.com

VACUUMSCHMELZE CHINA MAGNETICS

Shanghai Sales Office
Room 06, 19F
Zhongrong Hengrui International Plaza
620 Zhangyang Road, Pudong District
Shanghai, PRC 200122
Phone +86 21 5831 9837
Fax +86 21 5831 9937
vac_china@vacuumschmelze.com

VAC MAGNETICS LLC

2935 Dolphin Drive
Suite 103
Elizabethtown, KY 42701
Phone +1 270 769 1333
Fax +1 270 769 3118
info-usa@vacmagnetics.com

Published by VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG, Hanau, Juni 2025
© VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG 2024. All rights reserved.

® is a Registered Trademark of VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG

**ADVANCED MAGNETIC SOLUTIONS**