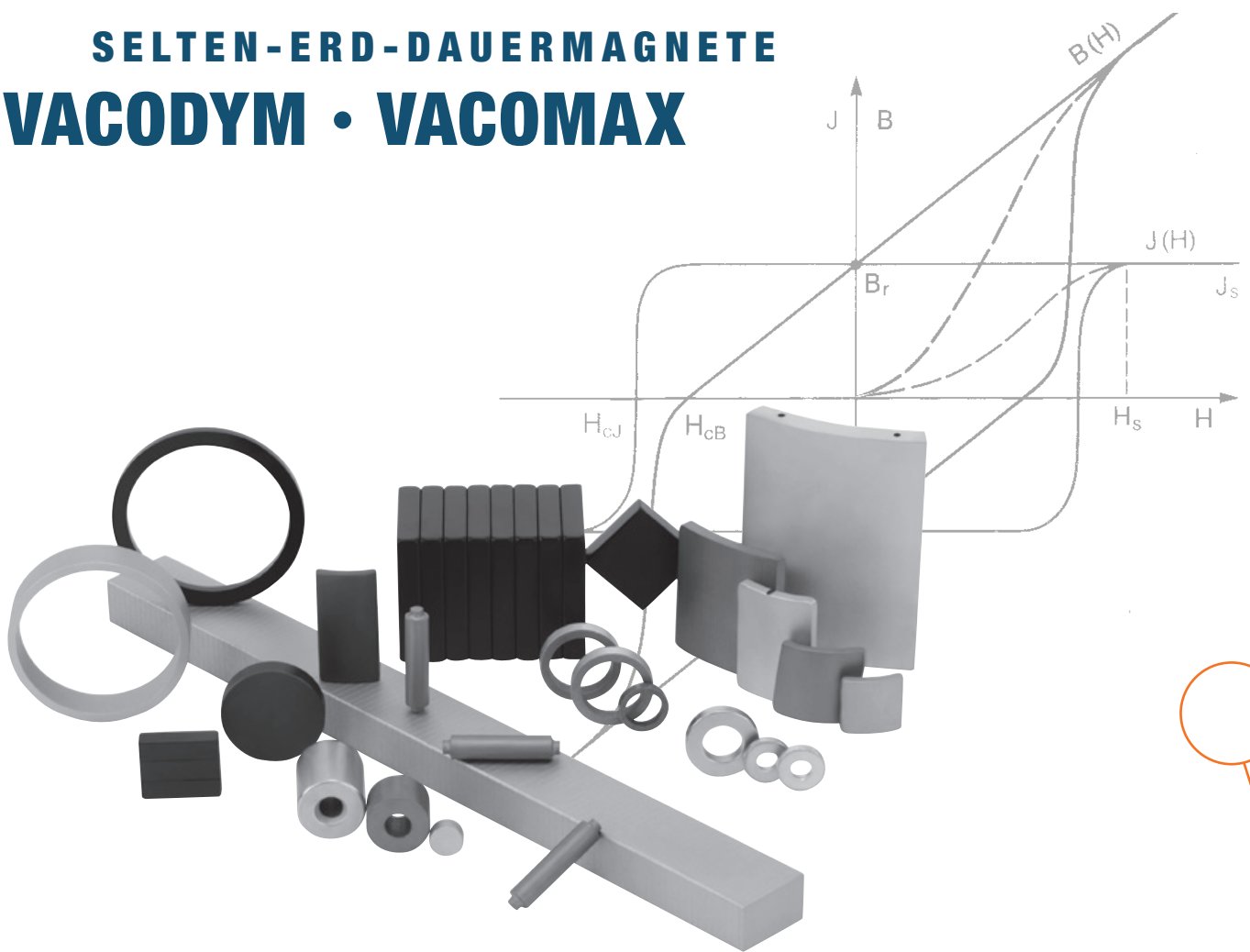


SELTEN-ERD-DAUERMAGNETE VACODYM • VACOMAX



DER FORTSCHRITT BEGINNT BEIM WERKSTOFF

VAC[®]
VACUUMSCHMELZE



DAS UNTERNEHMEN VACUUMSCHMELZE

Die VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG (VAC) ist weltweit einer der führenden Hersteller metallischer Spezialwerkstoffe mit besonderen physikalischen Eigenschaften und daraus weiter veredelten Produkten. Mit ca. 4.100 Mitarbeitern weltweit ist unser Unternehmen in 50 Ländern präsent und erzielt dabei einen Umsatz von ca. 400 Millionen Euro. Hauptstandort und Sitz der Firmenzentrale ist Hanau, weitere Fertigungsstandorte befinden sich in der Slowakei, in Finnland, Malaysia und China.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----------|
| 1. Selten-Erd-Dauermagnete VACODYM und VACOMAX | Seite 4 |
| 2. Lieferprogramm | Seite 6 |
| 3. Korngrenzendiffusion | Seite 8 |
| 4. Anwendungen | Seite 10 |
| 5. Werkstoffe und magnetische Eigenschaften | Seite 14 |
| 6. Begrenzung von irreversiblen Verlusten des magnetischen Moments (H_{D5} -Werte) | Seite 52 |
| 7. Korrosionsverhalten, Oberflächenschutz und Beschichtungen | Seite 54 |
| 8. Lieferformen | Seite 61 |
| 9. Kleben von SE-Dauermagneten | Seite 65 |
| 10. Integriertes Managementsystem | Seite 66 |
| 11. Sicherheitshinweise VACODYM- und VACOMAX-Magnete | Seite 68 |
| 12. Anhang – Technische Grundlagen und Begriffe | Seite 69 |

1. SELTEN-ERD-DAUERMAGNETE

VACODYM UND VACOMAX

Das Gesamt-Lieferprogramm der VAC umfasst neben Dauermagneten auch weichmagnetische Halbzeuge und Teile, induktive Bauelemente, magnetische Abschirmungen und andere Werkstoffe mit speziellen physikalischen Eigenschaften. Das Spektrum der Magnete besteht neben den Selten-Erd-Dauermagneten aus verformbaren Dauermagneten und magnetisch halbhartem Werkstoffen. Letztere zeichnen sich vor allem durch kostengünstige Formgebungsmöglichkeiten und einstellbare Dauermagneteigenschaften aus.

Mit magnetischen Eigenschaften metallischer Spezialwerkstoffe und ihren Anwendungen beschäftigen wir uns bereits seit über 70 Jahren. Im Jahre 1973 haben wir die Fertigung pulvermetallurgisch hergestellter Dauermagnete auf Basis von Seltenen Erden (SE) und Kobalt aufgenommen. Durch optimale Problemlösungen ist es uns gelungen, gemeinsam mit unseren Kunden entscheidend zur breiten Anwendung dieser neuen Werkstoffgruppe mit dem Markennamen VACOMAX® beizutragen.

VACODYM®^{*)}-Magnete produzieren wir seit 1986 im industriellen Maßstab. Sie werden auf der Basis von Neodym-Eisen-Bor-Legierungen hergestellt und besitzen die höchsten heute zur Verfügung stehenden Energiedichten. Vom Erschmelzen der Legierung im Vakuum bis zum Beschichten der fertig bearbeiteten Teile können wir alle Schritte im eigenen Hause durchführen und so optimale Werkstoffeigenschaften über den gesamten Fertigungsablauf sicherstellen. Als Marktführer in Europa zählen wir heute weltweit zu den führenden Herstellern von Selten-Erd-Dauermagneten.

Die magnetischen Eigenschaften von gesinterten Magneten werden durch die Legierungszusammensetzung sowie das Pressverfahren beeinflusst. Magnete können mit drei unterschiedlichen Verfahren hergestellt werden. Diese drei Verfahren finden sich als Zusatz HR, TP bzw. AP im Legierungs-

namen wieder. Dabei bezeichnet HR (Hoch-Remanente Ausführung) die isostatisch gepressten Magnete. Bei den werkzeuggepressten Ausführungen wird unterschieden zwischen TP (Transversal Pressed, querfeldgepresst) und AP (Axial Pressed, axialfeldgepresst). Einzelheiten zu den verfügbaren Lieferformen gibt Kapitel 8.

Unser Angebot der VACODYM-Legierungen wird durch intensive Entwicklungsarbeiten ständig an die Marktanforderungen angepasst, zum Beispiel für elektrische Antriebe in Hybrid- oder reinen Elektrofahrzeugen im Hinblick auf das Thema eMobility. In permanent erregten Synchronmaschinen kommen Magnete sowohl im beschichteten als auch im unbeschichteten Zustand als „vergrabene“ (embedded) Magnete oder Oberflächenmagnete zum Einsatz. Das spezielle Orientierungsprofil unserer im Axialfeld gepressten Magnete (AP) kann hier bei geeigneter Ausnutzung zu Leistungssteigerungen beitragen.

Neben unseren bereits seit Jahren erfolgreich am Markt etablierten VACODYM 6er- und 8er-Reihen, die insbesondere bei Motoranwendungen unter normalen Umgebungsbedingungen ohne zusätzliche Oberflächenbeschichtung einsetzbar sind, haben wir mit den 2er- und 9er-Reihen eine Vielzahl an neuen Legierungen in den Markt eingeführt. Hierbei stellen VACODYM 238 und 247 keine neue Leistungsklasse dar, sondern sind frei von Dysprosium und reduzieren so die Abhängigkeit von volatilen schweren Selten-Erd-Metallen. Die Anwendungsgebiete dieser neuen VACODYM-Legierungsreihe liegen insbesondere bei Synchronmotoren mit Einsatztemperaturen von bis zu 130 °C wie beispielsweise Aktuatoren und Lenkhilfemotoren.

Für Hochtemperaturanwendungen von 160 - 240 °C haben wir die 9er-Reihe bestehend aus VACODYM 956, 965, 974, 983 und 992 entwickelt, die sich im Vergleich zur 8er-Reihe durch eine erhöhte Koerzitivfeldstärke, insbesondere bei den hohen Anwendungstemperaturen, auszeichnet.

® = eingetragenes Warenzeichen der VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG

*) = Lizenzgeber Hitachi Metals Ltd. (Japan)

Bei Temperaturen unterhalb von ca. 140 Kelvin erfolgt bei herkömmlichen VACODYM-Magneten eine Reduktion der maximalen Energiedichte um bis zu 25%. Daher sind herkömmliche Nd-Fe-B-Magnete in der Regel nur bis hinab zu 140 Kelvin in vollem Umfang einsetzbar. Für tiefere Temperaturen haben wir mit VACODYM 131 TP und 131 DTP zwei neue Legierungen entwickelt, die sich dadurch auszeichnen, dass sie auch bei Temperaturen weit unterhalb der des flüssigen Stickstoffs (77 Kelvin) das volle Potenzial von Nd-Fe-B-Magneten entfalten. Auf Anfrage schicken wir Ihnen hierzu gerne weiteres Informationsmaterial zu.

Zur Erhöhung der Koezitivfeldstärken kann für alle VACODYM-Legierungen auch das neu entwickelte Korngrenzendiffusionsverfahren eingesetzt werden. Nähere Einzelheiten dazu finden Sie in Kapitel 3 auf Seite 8.

Für Systeme mit einer Einsatztemperatur von bis zu 150 °C fertigen wir weiterhin die Magnete der „7er-Reihe“, die sich durch hohe Remanenzinduktion auszeichnen.

Wirtschaftliche Produktionsanlagen, moderne Prüftechniken und ein nach ISO 9001, ISO/TS 16949 und ISO 14001 zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem sind für uns ebenso selbstverständlich wie die permanente Weiterbildung unserer Mitarbeiter und ein aktiver Umweltschutz. Mit diesen bewährten Grundsätzen unserer Geschäftspolitik sind wir auch weiterhin Ihr zuverlässiger und kompetenter Partner.

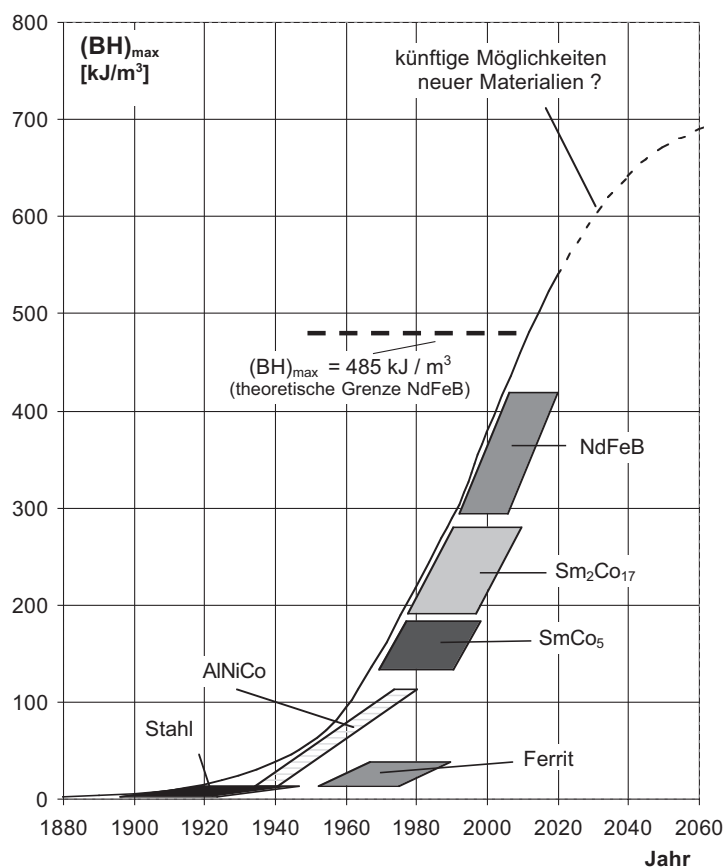


Abb. 1: Entwicklung der Energiedichten $(BH)_{max}$ von Dauermagneten und deren Potenzial

2. LIEFERPROGRAMM

Das Lieferprogramm unserer Selten-Erd-Magnete umfasst abgestimmte 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 dieser Werkstoffgruppe ist die stark magnetische Matrixphase $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ mit einer sehr hohen Sättigungspolarisation und hoher magnetischer Anisotropie. Eine zähe neodymreiche Binderphase an den Korngrenzen verleiht diesen Magneten gute mechanische Eigenschaften. Eine vergleichende Übersicht der Eigenschaften bei 150 °C unserer VACODYM-Magnete gibt Abb. 2.

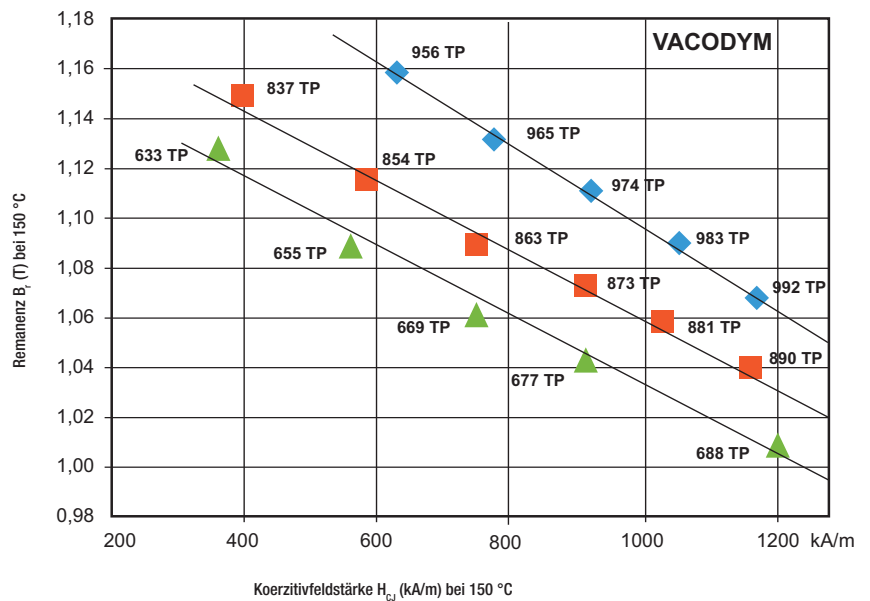


Abb. 2: Remanenz B_r und Koerzitivfeldstärke H_{cJ} im Transversalfeld gepresster VACODYM-Magnete bei 150 °C

VACOMAX ist unser Dauermagnetwerkstoff aus Seltenen Erden und Kobalt. Diese Magnete besitzen besonders hohe Koerzitivfeldstärken bei gleichzeitig hoher Sättigungspolarisation und hervorragender Temperatur- und Korrosionsstabilität. Die typischen Entmagnetisierungskurven von VACODYM und VACOMAX sind in Abb. 3 im Vergleich zu den altbekannten Dauermagnetwerkstoffen AlNiCo und Hartferrit dargestellt.

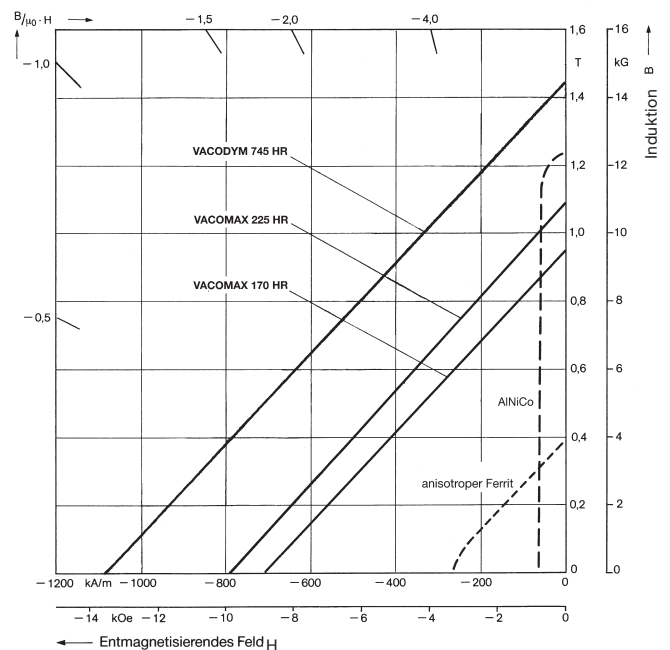


Abb. 3: Typische Entmagnetisierungskurven von VACODYM und VACOMAX im Vergleich zu AlNiCo und Ferrit bei Raumtemperatur.

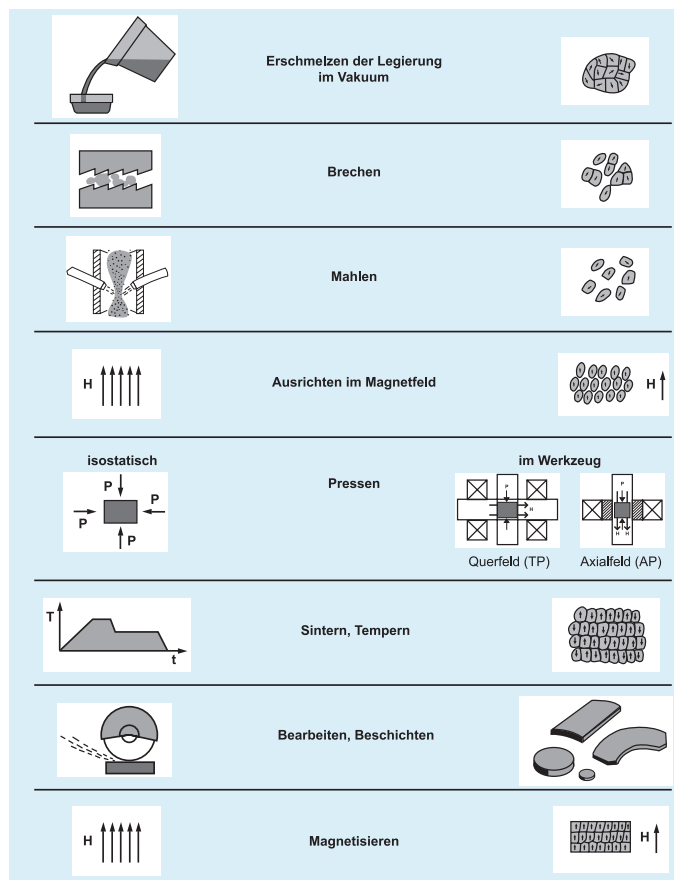


Abb. 4: Herstellung

Die VAC verfügt über eine langjährige Erfahrung in der Herstellung von Dauermagneten und in der Auslegung von Magnetkreisen. Neben analytischen Verfahren nutzen wir leistungsfähige Rechenprogramme, die zur Analyse und Auslegung von Magnetsystemen herangezogen werden. Dazu gehören z.B. 2D- und 3D-Feldberechnungen nach der Methode der finiten Elemente. Ihr Einsatz trägt mit dazu bei, die Entwicklungszeiten von Systemen entscheidend zu verkürzen. Neben einzelnen Magneten liefern wir daher zunehmend auch komplette Magnetsysteme nach Kundenspezifikation.

Ausführliche Informationen hierüber finden Sie in unserer Firmenschrift „Magnetsysteme“.

Durch den Einsatz von weichmagnetischen Werkstoffen als Systemkomponenten, wie z.B. VACOFLEX® und VACOFER®, können kundenspezifische Anforderungen in besonderem Maße erfüllt werden. Die sachgerechte Montage und die Magnetisierung der Systeme ist in vielen Fällen zudem nur

möglich, wenn die Magnete und andere Systembauteile direkt beim Magnethersteller zusammengebaut werden.

Magnete aus VACODYM und VACOMAX werden pulvermetallurgisch durch Sintern hergestellt. Die wesentlichen Arbeitsschritte der Herstellung sind in Abb. 4 aufgeführt. Je nach Größe, Form, Toleranzen, Stückzahl und magnetischen Anforderungen werden die Magneteile entweder aus isostatisch gepressten Blöcken geschnitten oder im Werkzeug gepresst. Die Ausrichtung der Pulverteilchen durch starke Magnetfelder kann beim Werkzeugpressen abhängig von der Teilegeometrie parallel (Axialfeld bei AP-Qualitäten) oder senkrecht (Querfeld bei TP-Qualitäten) zur Pressrichtung erfolgen. Isostatisch bzw. im Querfeld gepresste Teile weisen im Vergleich zu im Axialfeld gepressten Magneten um ca. 5-8 % höhere Remanenzwerte auf.

Die typischen Entmagnetisierungskurven unserer Seltenerd-Magnete für verschiedene Temperaturen sind bei den führenden FEM-Programmerstellern hinterlegt.

® = eingetragenes Warenzeichen der VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG

3. KORNGRENZENDIFFUSION

Die Koerzitivfeldstärke von Dauermagneten aus VACODYM kann durch den Korngrenzendiffusionsprozess deutlich erhöht werden. Bei diesem neu eingeführten Fertigungsverfahren werden gesinterte Dauermagnete mit schweren Seltenen Erden (HRE) beschichtet und anschließend einer speziellen Wärmebehandlung unterzogen. Während der Wärmebehandlung diffundiert das aufgebrauchte Material entlang der Korngrenzen in das Innere des Magneten und es bilden sich NdFeB-Körner mit HRE-reichen Hüllen aus, welche je nach Teiledicke zu einer Steigerung der Koerzitivfeldstärke ΔH_{cJ} bei Raumtemperatur um 400 kA/m (5 kOe) bis maximal 550 kA/m (7 kOe) führen (in Abb. 5 beispielhaft dargestellt für VACODYM 956 TP). Durch den effizienten Einsatz von HRE ist die Abnahme der Remanenz dabei kleiner als 0,01 T (0,1 kG).

Im Vergleich zu konventionell gefertigten Magnetqualitäten gleicher Koerzitivfeldstärke lassen sich mit dem Diffusionsprozess zusätzliche Magnetqualitäten herstellen, welche einen um ca. 2 % geringeren Anteil an Dysprosium und eine um 0,04 T (0,4 kG) höhere Remanenz B_r aufweisen.

Dieser Veredelungsschritt lässt sich prinzipiell auf alle allseitig geschliffenen VACODYM Sintermagnete anwenden und wird durch den Zusatz „D“ im Legierungsnamen (z.B. 956 DTP) gekennzeichnet. Ausgehend vom Basismaterial kann bis zu einer Teiledicke < 5 mm ein Zuwachs von $H_{cJ,min}$ um 400 kA/m (5 kOe) ohne wesentliche Abnahme der Remanenz garantiert werden. Aufgrund der charakteristischen Diffusionslänge von nur wenigen Millimetern (Abb. 6) ergeben sich allerdings Einschränkungen, falls die Teiledicke 5 mm übersteigt. Hier empfiehlt sich eine Beratung durch unsere Mitarbeiter.

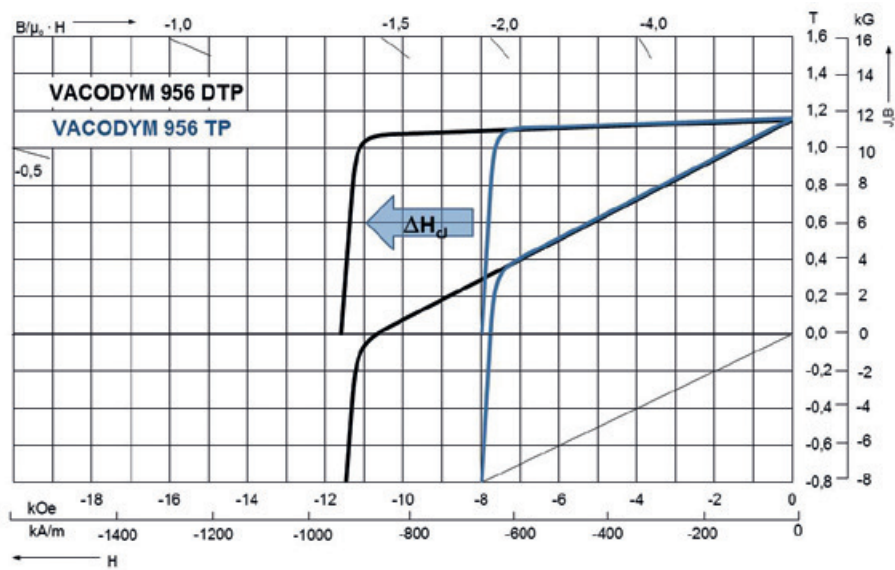


Abb. 5: Entmagnetisierungskurven von VACODYM 956 TP und VACODYM 956 DTP bei 150 °C

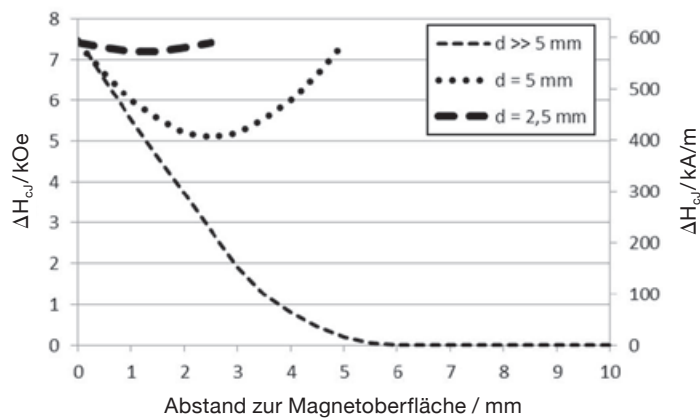


Abb. 6: Charakteristische Abhängigkeit des Zuwachses an Koerzitivfeldstärke ΔH_{c_j} bei Raumtemperatur vom Abstand zur Magnetoberfläche für beidseitig beschichtete Magnete unterschiedlicher Dicke d

4. ANWENDUNGEN

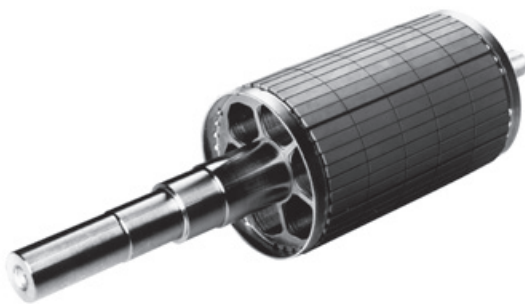


Sekundärteil eines Linearmotors

Magnete aus VACODYM und VACOMAX besitzen im Vergleich zu herkömmlichen Magnetwerkstoffen, wie z.B. ALNICO oder Hartferrit, eine Reihe von herausragenden magnetischen Eigenschaften.

DURCH IHREN EINSATZ ERGEBEN SICH FÜR DIE ANWENDER ERHEBLICHE VORTEILE:

- Die gegenüber AlNiCo- und Ferrit-Magneten bis zu zehnfach höheren Energiedichten erlauben nicht nur das Verkleinern des Magnetvolumens (siehe Abb. 7), sondern auch die Miniaturisierung von Systemen und ganzen Baugruppen. Dadurch können Kosten für Rückschlussteile, Spulen etc. eingespart werden.
- Vorhandene Magnetsysteme können in vielen Fällen verbessert werden. In den meisten Fällen empfiehlt sich bei Einsatz von VACODYM und VACOMAX eine Umdimensionierung der Systeme.
- Neue Konstruktionsprinzipien werden realisiert und damit neue Anwendungsgebiete erschlossen.



Rotor eines Servomotors

MOTOREN UND GENERATOREN

Für Servoantriebe, Gleichstrommaschinen, Linearantriebe und Großmaschinen (z.B. Motoren für Bahn- und Schiffsantriebe oder Wind- und Wasserkraft-Generatoren) kommen überwiegend Magnete aus VACODYM zum Einsatz. Darüber hinaus ist unsere finnische Tochtergesellschaft NEOREM-Magnets spezialisiert auf die Fertigung großvolumiger Magnete und daraus weiter veredelter Systeme (siehe auch www.neorem.fi). Bei speziellen Anforderungen, insbesondere im Bereich hoher Temperaturen, werden weiterhin VACOMAX-Magnete eingesetzt. Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet liegt bei Klein- und Kleinstmotoren, z.B. Glockenanker- und Dentalmotoren.

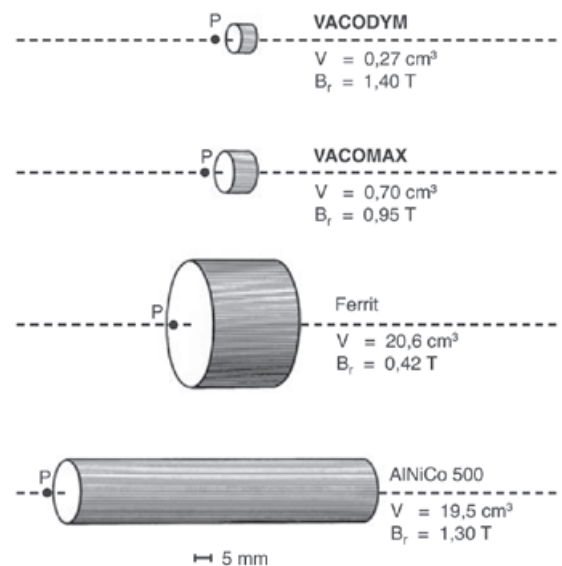


Abb. 7: Anschauliches Beispiel für die Volumenreduzierung bei Verwendung von VACODYM und VACOMAX: Die Magnete sind jeweils so dimensioniert, dass im Abstand von 5 mm von der Polfläche ein Feld von 100 mT erzeugt wird.

AUTOMOBILTECHNIK UND SENSORIK

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 bezüglich der Temperatur- und Korrosionsstabilität mit VACOMAX- oder VACODYM-Magneten aufgebaut.

Synchronmotoren als Hauptantrieb in Elektro- und Hybridfahrzeugen werden mit Magneten aus VACODYM bestückt.

Für Aktoren im Motormanagement, Hilfsmotoren (Lenkhilfe), und Generatoren kommen ebenfalls insbesondere VACODYM-Magnete in Betracht.

MRI (MAGNET RESONANCE IMAGING)

Für bildgebende Systeme in der Medizintechnik werden neben supraleitenden und elektrisch erregten Systemen Dauermagnetsysteme mit hochremanenten VACODYM-Sorten eingesetzt. Hauptvorteile sind der sehr geringe Energieverbrauch, Gewichtseinsparungen sowie ein wartungsfreier Aufbau und die Möglichkeit, offene, patientenfreundliche Systeme zu bauen.



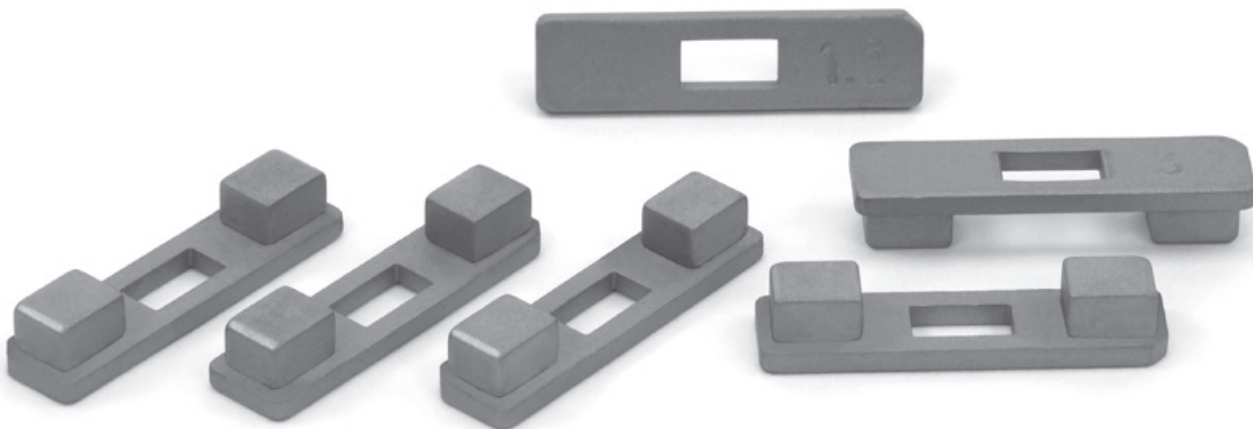
Zentraldrehkupplung mit VACODYM-Magneten

DAUERMAGNETLAGER

Für Turbo-Molekular-Pumpen, Zentrifugen u.ä. wurden unterschiedliche magnetische Lagerprinzipien entwickelt. In der Regel kommen axial magnetisierte Ringmagnete zum Einsatz. Die Wahl des Magnetmaterials richtet sich nach den jeweiligen Kundenspezifikationen.

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 auch Magnete aus VACOMAX eingesetzt. Bei niedrigeren Einsatztemperaturen empfehlen wir VACODYM-Magnete.



Sensormodule mit VACOMAX-Magneten für Doppelkupplungsgetriebe (mit freundlicher Genehmigung der Volkswagen AG)

STRAHLFÜHRUNGSSYSTEME, WIGGLER UND UNDULATOREN

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 Wigglern, Undulatoren, Multipolen und Teilchendetektoren.

Für diese Anwendungen können definiert abgegliche, aufeinander abgestimmte Magnetsätze mit engen Toleranzen bezüglich der magnetischen Eigenschaften, wie Homogenität und Winkellage zwischen magnetischer Vorzugsrichtung und Teilegeometrie, hergestellt werden. Für großvolumige Teile ergeben sich wirtschaftliche Herstellungsverfahren, insbesondere durch die Fertigungsmöglichkeiten großer Magnetquerschnitte mit Polflächen bis ca. 100 cm².



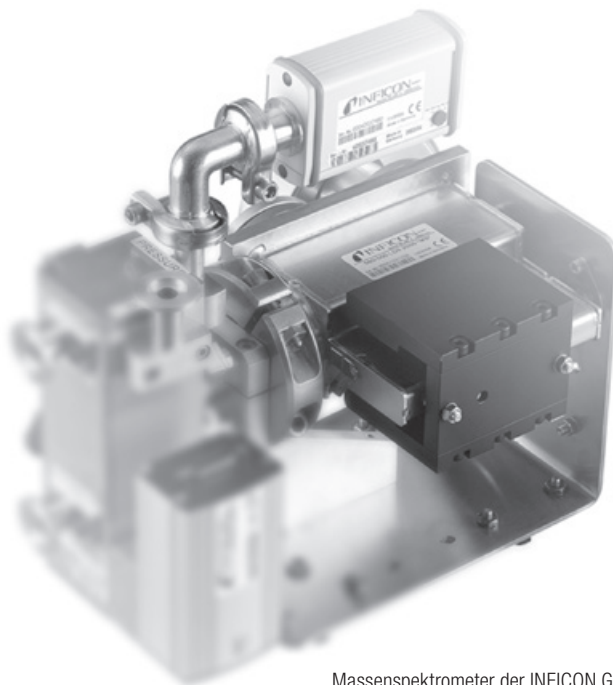
Undulatorstruktur mit VACODYM-Magneten

SCHALTER UND RELAIS

Im Falle der recht unterschiedlichen Konstruktionen von Hall-Schaltern, polarisierten Relais, Drehzahlmessern usw. werden je nach Spezifikationen Magnete bzw. Magnet-systeme mit VACODYM oder VACOMAX verwendet.

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.



Massenspektrometer der INFICON GmbH mit Magnetsystem aus VACOMAX

5. WERKSTOFFE UND MAGNETISCHE EIGENSCHAFTEN

5.1 CHARAKTERISTISCHE EIGENSCHAFTEN

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

| Pressrichtung | Werkstoffsorte | Kennzahl ¹⁾ | siehe Seite | Remanenz | | | | Koerzitivfeldstärke | |
|----------------|----------------|------------------------|-------------|---------------------|------|---------------------|------|----------------------|------|
| | | | | B _r typ. | | B _r min. | | H _{cb} typ. | |
| | | | | Tesla | kG | Tesla | kG | kA/m | kOe |
| HR* | VACODYM 510 HR | 360/95,5 | 21 | 1,41 | 14,1 | 1,38 | 13,8 | 980 | 12,3 |
| | VACODYM 633 HR | 315/127,5 | 22 | 1,35 | 13,5 | 1,29 | 12,9 | 1040 | 13,1 |
| | VACODYM 655 HR | 280/167 | 23 | 1,28 | 12,8 | 1,22 | 12,2 | 990 | 12,4 |
| | VACODYM 677 HR | 240/223 | 24 | 1,18 | 11,8 | 1,12 | 11,2 | 915 | 11,5 |
| | VACODYM 722 HR | 380/87,5 | 25 | 1,47 | 14,7 | 1,42 | 14,2 | 915 | 11,5 |
| | VACODYM 745 HR | 370/111,5 | 26 | 1,44 | 14,4 | 1,40 | 14,0 | 1115 | 14,0 |
| TP* | VACODYM 238 TP | 335/127 | 27 | 1,37 | 13,7 | 1,33 | 13,3 | 1058 | 13,3 |
| | VACODYM 247 TP | 330/143 | 28 | 1,36 | 13,6 | 1,32 | 13,2 | 1051 | 13,2 |
| | VACODYM 633 TP | 305/127,5 | 22 | 1,32 | 13,2 | 1,28 | 12,8 | 1020 | 12,8 |
| | VACODYM 655 TP | 280/167 | 23 | 1,26 | 12,6 | 1,22 | 12,2 | 970 | 12,2 |
| | VACODYM 669 TP | 255/200 | 29 | 1,22 | 12,2 | 1,17 | 11,7 | 940 | 11,8 |
| | VACODYM 677 TP | 240/223 | 24 | 1,18 | 11,8 | 1,13 | 11,3 | 915 | 11,5 |
| | VACODYM 688 TP | 225/262,5 | 30 | 1,14 | 11,4 | 1,09 | 10,9 | 885 | 11,1 |
| | VACODYM 745 TP | 355/111,5 | 26 | 1,41 | 14,1 | 1,37 | 13,7 | 1090 | 13,7 |
| | VACODYM 764 TP | 335/127,5 | 31 | 1,37 | 13,7 | 1,33 | 13,3 | 1060 | 13,3 |
| | VACODYM 776 TP | 305/167 | 32 | 1,32 | 13,2 | 1,28 | 12,8 | 1020 | 12,8 |
| | VACODYM 837 TP | 335/127,5 | 33 | 1,37 | 13,7 | 1,33 | 13,3 | 1060 | 13,3 |
| | VACODYM 854 TP | 310/167 | 34 | 1,32 | 13,2 | 1,28 | 12,8 | 1020 | 12,8 |
| | VACODYM 863 TP | 295/200 | 35 | 1,29 | 12,9 | 1,25 | 12,5 | 995 | 12,5 |
| | VACODYM 872 TP | 280/223 | 36 | 1,25 | 12,5 | 1,21 | 12,1 | 965 | 12,1 |
| | VACODYM 881 TP | 265/238,5 | 37 | 1,22 | 12,2 | 1,18 | 11,8 | 945 | 11,9 |
| | VACODYM 890 TP | 250/263 | 38 | 1,19 | 11,9 | 1,15 | 11,5 | 915 | 11,5 |
| | VACODYM 956 TP | 330/167 | 39 | 1,35 | 13,5 | 1,32 | 13,2 | 1030 | 13,0 |
| | VACODYM 965 TP | 310/187 | 40 | 1,31 | 13,1 | 1,28 | 12,8 | 1000 | 12,6 |
| | VACODYM 974 TP | 295/207 | 41 | 1,28 | 12,8 | 1,25 | 12,5 | 980 | 12,3 |
| | VACODYM 983 TP | 280/223 | 42 | 1,25 | 12,5 | 1,22 | 12,2 | 960 | 12,1 |
| VACODYM 992 TP | 270/238,5 | 43 | 1,22 | 12,2 | 1,19 | 11,9 | 940 | 11,8 | |

*Pressrichtungsdarstellungen siehe Seite 16 und 17

¹⁾ Kennzeichnung nach IEC 60404-8-1, die Magnetwerte übertreffen i. Allg. die Werte der IEC

| | | | | Energiedichte | | | | Temperaturkoeffizienten | | | | Dichte Q typ. g/cm ³ | maximale Anwendungs- temperatur | |
|------|------|------|------|---------------------------------|-----|---------------------------------|-----|--|--------|--|--------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | | | | | | | | 20-100 °C | | 20-150 °C | | | T _{max} ²⁾ | |
| | | | | H _{CB} min. kA/m | kOe | H _{cJ} min. kA/m | kOe | (BH) _{max} typ. kJ/m ³ | MG0e | (BH) _{max} min. kJ/m ³ | MG0e | | TK (B _r) typ. %/°C | TK (H _{cJ}) typ. %/°C |
| 915 | 11,5 | 955 | 12 | 385 | 48 | 360 | 45 | -0,115 | -0,790 | | | 7,5 | 60 | 140 |
| 980 | 12,3 | 1275 | 16 | 350 | 44 | 315 | 40 | -0,095 | -0,650 | -0,105 | -0,550 | 7,7 | 110 | 230 |
| 925 | 11,6 | 1670 | 21 | 315 | 40 | 280 | 35 | -0,09 | -0,610 | -0,100 | -0,550 | 7,7 | 150 | 300 |
| 850 | 10,7 | 2230 | 28 | 270 | 34 | 240 | 30 | -0,085 | -0,550 | -0,095 | -0,500 | 7,7 | 190 | 370 |
| 835 | 10,5 | 875 | 11 | 415 | 53 | 380 | 48 | -0,115 | -0,770 | | | 7,6 | 50 | 120 |
| 1065 | 13,4 | 1115 | 14 | 400 | 50 | 370 | 47 | -0,115 | -0,730 | | | 7,6 | 70 | 160 |
| 1008 | 12,7 | 1273 | 16 | 363 | 46 | 335 | 42 | -0,111 | -0,679 | -0,120 | -0,573 | 7,6 | 120 | 250 |
| 1000 | 12,6 | 1432 | 18 | 357 | 45 | 330 | 42 | -0,111 | -0,654 | -0,120 | -0,563 | 7,6 | 130 | 270 |
| 970 | 12,2 | 1275 | 16 | 335 | 42 | 305 | 39 | -0,095 | -0,650 | -0,105 | -0,570 | 7,7 | 110 | 230 |
| 925 | 11,6 | 1670 | 21 | 305 | 39 | 280 | 35 | -0,090 | -0,610 | -0,100 | -0,550 | 7,7 | 150 | 300 |
| 875 | 11,0 | 2000 | 25 | 290 | 36 | 255 | 32 | -0,085 | -0,570 | -0,095 | -0,510 | 7,7 | 170 | 340 |
| 860 | 10,8 | 2230 | 28 | 270 | 34 | 240 | 30 | -0,085 | -0,550 | -0,095 | -0,500 | 7,7 | 190 | 370 |
| 830 | 10,4 | 2625 | 33 | 250 | 32 | 225 | 28 | -0,080 | -0,510 | -0,090 | -0,460 | 7,8 | 220 | 430 |
| 1035 | 13,0 | 1115 | 14 | 385 | 48 | 355 | 45 | -0,115 | -0,730 | | | 7,6 | 70 | 160 |
| 1005 | 12,6 | 1275 | 16 | 360 | 46 | 335 | 42 | -0,115 | -0,700 | -0,125 | -0,590 | 7,6 | 100 | 210 |
| 970 | 12,2 | 1670 | 21 | 335 | 42 | 310 | 39 | -0,110 | -0,610 | -0,120 | -0,550 | 7,6 | 140 | 280 |
| 1010 | 12,7 | 1275 | 16 | 360 | 46 | 335 | 42 | -0,110 | -0,620 | -0,120 | -0,540 | 7,6 | 110 | 230 |
| 970 | 12,2 | 1670 | 21 | 335 | 42 | 310 | 39 | -0,105 | -0,600 | -0,115 | -0,530 | 7,7 | 150 | 300 |
| 950 | 11,9 | 2000 | 25 | 315 | 40 | 295 | 37 | -0,100 | -0,560 | -0,110 | -0,510 | 7,7 | 170 | 340 |
| 915 | 11,5 | 2230 | 28 | 300 | 38 | 280 | 35 | -0,095 | -0,530 | -0,105 | -0,490 | 7,7 | 190 | 370 |
| 900 | 11,3 | 2385 | 30 | 290 | 36 | 265 | 34 | -0,093 | -0,510 | -0,103 | -0,470 | 7,7 | 200 | 390 |
| 865 | 10,9 | 2625 | 33 | 270 | 34 | 250 | 31 | -0,090 | -0,500 | -0,100 | -0,460 | 7,7 | 220 | 430 |
| 995 | 12,5 | 1670 | 21 | 350 | 44 | 330 | 41 | -0,100 | -0,570 | -0,108 | -0,531 | 7,6 | 160 | 320 |
| 965 | 12,1 | 1870 | 23,5 | 330 | 41 | 310 | 39 | -0,096 | -0,530 | -0,104 | -0,498 | 7,6 | 180 | 360 |
| 945 | 11,9 | 2070 | 26 | 315 | 39 | 295 | 37 | -0,094 | -0,500 | -0,102 | -0,467 | 7,7 | 200 | 390 |
| 925 | 11,6 | 2230 | 28 | 300 | 38 | 280 | 35 | -0,091 | -0,470 | -0,099 | -0,445 | 7,7 | 210 | 410 |
| 900 | 11,3 | 2385 | 30 | 285 | 36 | 270 | 34 | -0,088 | -0,450 | -0,097 | -0,431 | 7,7 | 230 | 440 |

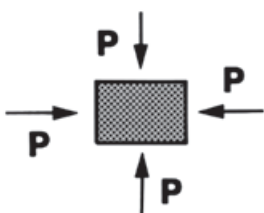
²⁾ Die maximale Anwendungstemperatur hängt entscheidend von der Dimensionierung des Systems ab. Die angegebenen Richtwerte beziehen sich auf Magnete, die im Arbeitspunkt $B/\mu_{eff} = -1$ (maximales Energieprodukt) betrieben werden. Bei Anwendungen von VACODYM oberhalb 150 °C empfehlen wir generell eine Beratung durch unsere Mitarbeiter.

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

| Pressrichtung | Werkstoffsorte | Kennzahl ¹⁾ | siehe Seite | Remanenz | | | | Koerzitivfeldstärke | |
|---------------|----------------|------------------------|-------------|---------------------------|------|---------------------------|------|---------------------------|------|
| | | | | B _r typ. Tesla | kG | B _r min. Tesla | kG | H _{cb} typ. kA/m | kOe |
| | | | | | | | | | |
| AP* | VACODYM 238 AP | 303/135,5 | 27 | 1,30 | 13,0 | 1,26 | 12,6 | 995 | 12,5 |
| | VACODYM 247 AP | 298/151 | 28 | 1,29 | 12,9 | 1,25 | 12,5 | 987 | 12,4 |
| | VACODYM 633 AP | 280/135,5 | 22 | 1,26 | 12,6 | 1,22 | 12,2 | 965 | 12,1 |
| | VACODYM 655 AP | 255/167 | 23 | 1,20 | 12,0 | 1,16 | 11,6 | 915 | 11,5 |
| | VACODYM 669 AP | 225/200 | 29 | 1,16 | 11,6 | 1,12 | 11,2 | 885 | 11,1 |
| | VACODYM 677 AP | 215/223 | 24 | 1,13 | 11,3 | 1,08 | 10,8 | 860 | 10,8 |
| | VACODYM 688 AP | 200/262,5 | 30 | 1,08 | 10,8 | 1,03 | 10,3 | 830 | 10,4 |
| | VACODYM 745 AP | 325/111,5 | 26 | 1,34 | 13,4 | 1,31 | 13,1 | 1025 | 12,9 |
| | VACODYM 764 AP | 305/135,5 | 31 | 1,30 | 13,0 | 1,27 | 12,7 | 995 | 12,5 |
| | VACODYM 776 AP | 280/167 | 32 | 1,26 | 12,6 | 1,22 | 12,2 | 965 | 12,1 |
| | VACODYM 837 AP | 300/135,5 | 33 | 1,30 | 13,0 | 1,26 | 12,6 | 995 | 12,5 |
| | VACODYM 854 AP | 275/167 | 34 | 1,26 | 12,6 | 1,21 | 12,1 | 965 | 12,1 |
| | VACODYM 863 AP | 250/200 | 35 | 1,21 | 12,1 | 1,17 | 11,7 | 925 | 11,6 |
| | VACODYM 872 AP | 235/223 | 36 | 1,17 | 11,7 | 1,13 | 11,3 | 890 | 11,2 |
| | VACODYM 881 AP | 230/238,5 | 37 | 1,14 | 11,4 | 1,10 | 11,0 | 875 | 11,0 |
| | VACODYM 890 AP | 210/263 | 38 | 1,11 | 11,1 | 1,07 | 10,7 | 845 | 10,6 |
| | VACODYM 956 AP | 295/167 | 39 | 1,29 | 12,9 | 1,26 | 12,6 | 975 | 12,3 |
| | VACODYM 965 AP | 280/187 | 40 | 1,25 | 12,5 | 1,22 | 12,2 | 945 | 11,9 |
| | VACODYM 974 AP | 265/207 | 41 | 1,22 | 12,2 | 1,19 | 11,9 | 925 | 11,6 |
| | VACODYM 983 AP | 250/223 | 42 | 1,19 | 11,9 | 1,16 | 11,6 | 905 | 11,4 |
| | VACODYM 992 AP | 240/238,5 | 43 | 1,16 | 11,6 | 1,13 | 11,3 | 885 | 11,1 |

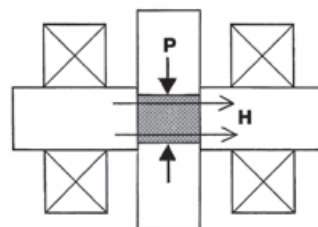
* Pressrichtung

HR



* Pressrichtung

TP

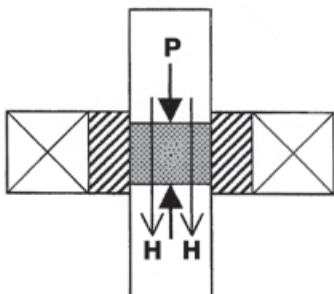


¹⁾ Kennzeichnung nach IEC 60404-8-1, die Magnetwerte übertreffen i. Allg. die Werte der IEC

| | | | | Energiedichte | | | | Temperaturkoeffizienten | | | | Dichte | | maximale Anwendungstemperatur | |
|---------------|------|---------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|--|
| H_{cB} min. | | H_{cJ} min. | | $(BH)_{max}$ typ. | | $(BH)_{max}$ min. | | TK (B_r) typ. | TK (H_{cJ}) typ. | TK (B_r) typ. | TK (H_{cJ}) typ. | ρ typ. | $T_{max}^{2)}$ | | |
| kA/m | kOe | kA/m | kOe | kJ/m^3 | MGOe | kJ/m^3 | MGOe | %/°C | %/°C | %/°C | %/°C | g/cm^3 | °C | °F | |
| 946 | 11,9 | 1353 | 17 | 323 | 41 | 298 | 37 | -0,111 | -0,667 | -0,120 | -0,568 | 7,6 | 120 | 250 | |
| 938 | 11,8 | 1512 | 19 | 318 | 40 | 293 | 37 | -0,111 | -0,642 | -0,120 | -0,557 | 7,6 | 130 | 270 | |
| 915 | 11,5 | 1355 | 17 | 305 | 38 | 280 | 35 | -0,095 | -0,640 | -0,105 | -0,570 | 7,7 | 120 | 250 | |
| 865 | 10,9 | 1670 | 21 | 275 | 35 | 255 | 32 | -0,090 | -0,610 | -0,100 | -0,550 | 7,7 | 160 | 320 | |
| 820 | 10,3 | 2000 | 25 | 255 | 32 | 225 | 28 | -0,085 | -0,570 | -0,095 | -0,510 | 7,7 | 180 | 360 | |
| 805 | 10,1 | 2230 | 28 | 240 | 30 | 215 | 27 | -0,085 | -0,550 | -0,095 | -0,500 | 7,7 | 200 | 390 | |
| 770 | 9,7 | 2625 | 33 | 225 | 28 | 200 | 25 | -0,080 | -0,510 | -0,090 | -0,460 | 7,8 | 230 | 440 | |
| 970 | 12,2 | 1115 | 14 | 340 | 43 | 325 | 41 | -0,115 | -0,730 | | | 7,6 | 80 | 180 | |
| 955 | 12,0 | 1355 | 17 | 325 | 41 | 305 | 38 | -0,115 | -0,690 | -0,125 | -0,580 | 7,6 | 110 | 230 | |
| 915 | 11,5 | 1670 | 21 | 305 | 38 | 280 | 35 | -0,110 | -0,610 | -0,120 | -0,550 | 7,6 | 150 | 300 | |
| 950 | 11,9 | 1355 | 17 | 325 | 41 | 300 | 37 | -0,110 | -0,620 | -0,120 | -0,540 | 7,6 | 120 | 250 | |
| 905 | 11,4 | 1670 | 21 | 305 | 38 | 275 | 35 | -0,105 | -0,600 | -0,115 | -0,530 | 7,7 | 160 | 320 | |
| 875 | 11,0 | 2000 | 25 | 280 | 35 | 250 | 32 | -0,100 | -0,560 | -0,110 | -0,510 | 7,7 | 180 | 360 | |
| 845 | 10,6 | 2230 | 28 | 260 | 33 | 235 | 30 | -0,095 | -0,530 | -0,105 | -0,490 | 7,7 | 200 | 390 | |
| 830 | 10,4 | 2385 | 30 | 250 | 32 | 230 | 29 | -0,093 | -0,510 | -0,103 | -0,470 | 7,7 | 210 | 410 | |
| 795 | 10,0 | 2625 | 33 | 235 | 29 | 210 | 26 | -0,090 | -0,500 | -0,100 | -0,460 | 7,7 | 230 | 440 | |
| 940 | 11,8 | 1670 | 21 | 315 | 40 | 295 | 37 | -0,100 | -0,573 | -0,108 | -0,531 | 7,6 | 160 | 320 | |
| 910 | 11,5 | 1870 | 23,5 | 295 | 37 | 280 | 35 | -0,096 | -0,531 | -0,104 | -0,498 | 7,6 | 180 | 360 | |
| 890 | 11,2 | 2070 | 26 | 280 | 35 | 265 | 33 | -0,094 | -0,496 | -0,102 | -0,467 | 7,7 | 210 | 410 | |
| 870 | 10,9 | 2230 | 28 | 270 | 34 | 250 | 32 | -0,091 | -0,473 | -0,099 | -0,445 | 7,7 | 220 | 430 | |
| 850 | 10,7 | 2385 | 30 | 255 | 32 | 240 | 30 | -0,088 | -0,453 | -0,097 | -0,430 | 7,7 | 240 | 460 | |

¹ Pressrichtung

AP



²⁾ Die maximale Anwendungstemperatur hängt entscheidend von der Dimensionierung des Systems ab. Die angegebenen Richtwerte beziehen sich auf Magnete, die im Arbeitspunkt $B/\mu_{oH} = -1$ (maximales Energieprodukt) betrieben werden. Bei Anwendungen von VACODYM oberhalb 150 °C empfehlen wir generell eine Beratung durch unsere Mitarbeiter.

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

| Werkstoffsorte Kennzahl ¹⁾ | siehe Seite | Remanenz | | | | Koerzitiv- feldstärke | | | | | | |
|--|----------------|------------------------|------|------------------------|------|--------------------------|------|-------------------------|-----|-------------------------|------|--|
| | | B _r typ. | | B _r min. | | H _{cB} typ. | | H _{cB} min. | | H _{cJ} min. | | |
| | | Tesla | kG | Tesla | kG | kA/m | kOe | kA/m | kOe | kA/m | kOe | |
| VACOMAX 240 HR 200/64 | 44 | 1,12 | 11,2 | 1,05 | 10,5 | 730 | 9,2 | 600 | 7,5 | 640 | 8,0 | |
| VACOMAX 225 HR 190/159 | 45 | 1,10 | 11,0 | 1,03 | 10,3 | 820 | 10,3 | 720 | 9,0 | 1590 | 20,0 | |
| VACOMAX 225 TP 190/159 | 45 | 1,07 | 10,7 | 1,03 | 10,3 | 790 | 9,9 | 720 | 9,0 | 1590 | 20,0 | |
| VACOMAX 225 AP 170/159 | 45 | 1,04 | 10,4 | 0,97 | 9,7 | 760 | 9,6 | 680 | 8,5 | 1590 | 20,0 | |
| VACOMAX 170 HR 170/120 | 46 | 1,01 | 10,1 | 0,95 | 9,5 | 755 | 9,5 | 710 | 8,9 | 1195 | 15,0 | |
| VACOMAX 145 S 140/200 | 47 | 0,90 | 9,0 | 0,85 | 8,5 | 660 | 8,3 | 600 | 7,5 | 1990 | 25,0 | |

¹⁾ Kennzeichnung nach IEC 60404-8-1, die Magnetwerte übertreffen i. Allg. die Werte der IEC

**Tabelle 3: SONSTIGE CHARAKTERISTISCHE PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN
VON VACODYM UND VACOMAX BEI RAUMTEMPERATUR (20 °C)**

| Werkstoff | Curie- temperatur | spez. elektr. Widerstand | Wärme- kapazität | Wärme- leitfähigkeit | therm. Ausdehnungs- koeffizient 20-100 °C | | E-Modul | Biege- festigkeit |
|---|----------------------|---|---------------------|-------------------------|---|---------------------|--------------------|----------------------|
| | | | | | c ³⁾ | ⊥ c ³⁾ | | |
| | °C | Ωmm ² /m | J/(kg·K) | W/(m·K) | 10 ⁻⁶ /K | 10 ⁻⁶ /K | kN/mm ² | N/mm ² |
| VACODYM | 310-370 | 1,4-1,6 (c) ³⁾ 1,2-1,4 (⊥ c) ³⁾ | 350-550 | 5-15 | 4-9 | -2-0 | 140-170 | 120-400 |
| VACOMAX Sm ₂ Co ₁₇ | 800-850 | 0,65-0,95 | 300-500 | 5-15 | 8-12 | 10-14 | 140-170 | 80-150 |
| VACOMAX SmCo ₅ | 700-750 | 0,4-0,7 | 300-500 | 5-15 | 4-10 | 10-16 | 100-130 | 90-180 |

³⁾ || c: parallel zur magnetischen Vorzugsrichtung
⊥ c: senkrecht zur magnetischen Vorzugsrichtung

Die in der obigen Tabelle angegebenen Bereiche sind als typisch anzusehen und sollen nicht als Toleranzgrenze verstanden werden.

| Energiedichte | | | | Temperaturkoeffizienten | | | | Dichte | maximale Anwendungstemperatur | |
|--------------------|------|--------------------|------|-------------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|
| $(BH)_{\max}$ typ. | | $(BH)_{\max}$ min. | | TK (B_r) typ. | TK (H_{cJ}) typ. | TK (B_r) typ. | TK (H_{cJ}) typ. | | Q typ. | $T_{\max}^{2)}$ |
| kJ/m^3 | MG0e | kJ/m^3 | MG0e | %/°C | %/°C | %/°C | %/°C | g/cm^3 | | °C |
| 240 | 30 | 200 | 25 | -0,030 | -0,15 | -0,035 | -0,16 | 8,4 | 300 | 570 |
| 225 | 28 | 190 | 24 | -0,030 | -0,18 | -0,035 | -0,19 | 8,4 | 350 | 660 |
| 215 | 27 | 190 | 24 | -0,030 | -0,18 | -0,035 | -0,19 | 8,4 | 350 | 660 |
| 200 | 25 | 170 | 21 | -0,030 | -0,18 | -0,035 | -0,19 | 8,4 | 350 | 660 |
| 200 | 25 | 170 | 21 | -0,040 | -0,21 | -0,045 | -0,22 | 8,4 | 250 | 480 |
| 160 | 20 | 140 | 18 | -0,040 | -0,14 | -0,045 | -0,15 | 8,4 | 250 | 480 |

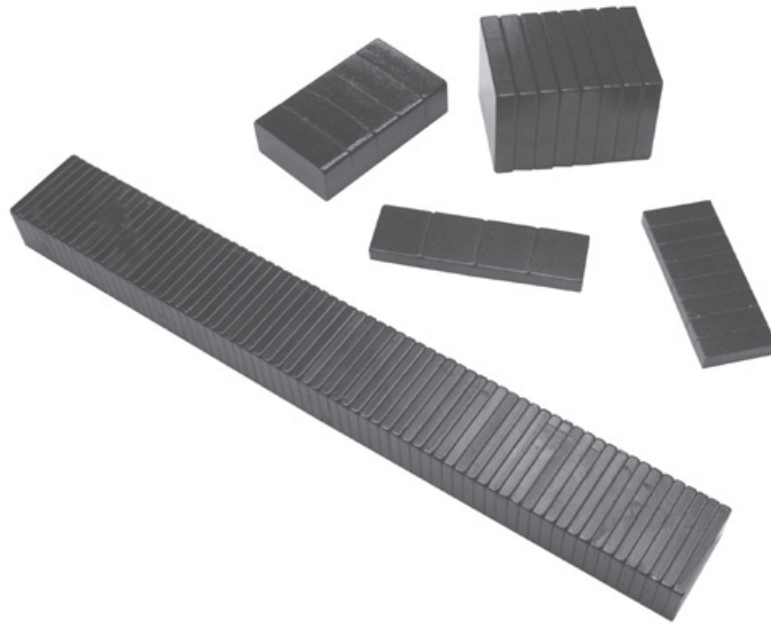
²⁾ Bei Anwendung von VACOMAX oberhalb 200 °C empfehlen wir generell eine Beratung durch unsere Mitarbeiter.

| Druckfestigkeit | Vickershärte | Risszähigkeit |
|-----------------|--------------|---------------------------------|
| N/mm^2 | HV | K_{Ic} $\text{N/mm}^{3/2}$ |
| 600-1250 | 500-700 | 80-180 |
| 400-900 | 500-750 | 30-60 |
| 600-1100 | 500-700 | 40-80 |

Tabelle 4: INNERE AUFMAGNETISIERUNGSFELDSTÄRKE FÜR VACODYM UND VACOMAX

| Werkstoff | $H_{\text{mag min.}}$ | |
|-----------------|-----------------------|-----|
| | kA/m | kOe |
| VACODYM | 2500 | 31 |
| VACOMAX 225 | 3650 | 46 |
| VACOMAX 240 | 2000 | 25 |
| VACOMAX 145/170 | 2000 | 25 |

Weitere Informationen zum Aufmagnetisieren finden Sie ab Seite 49.



5.2 WERKSTOFFSORTEN

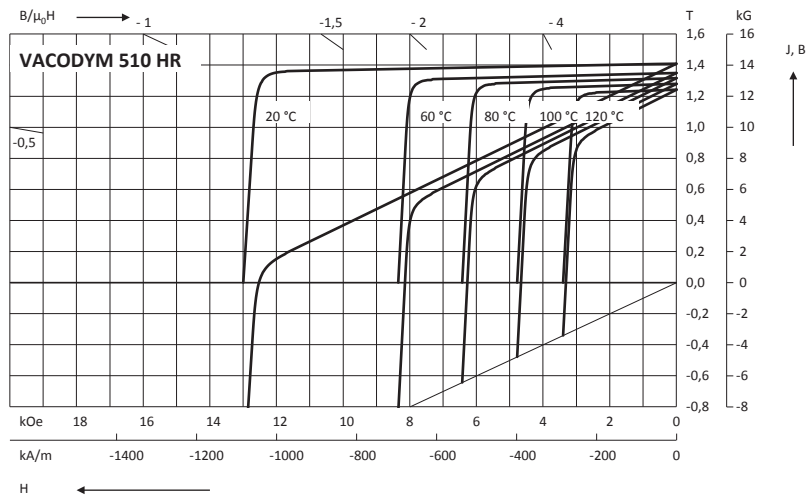
VACODYM und VACOMAX sind anisotrope Werkstoffe, deren reversible Permeabilität im Arbeitspunkt $\mu_{\text{rev}} < 1,1$ beträgt. Der genaue Wert ist von der Werkstoffsorte und der Magnetgeometrie abhängig. VACODYM und VACOMAX besitzen keine offene Porosität, d.h. die Poren sind nicht untereinander verbunden, daher können beide Werkstoffe in Vakuum-Anwendungen eingesetzt werden. Auf den folgenden Seiten sind Entmagnetisierungskurven bei verschiedenen Temperaturen für die unterschiedlichen Werkstoffsorten dargestellt. Zusätzlich sind jeweils die typischen irreversiblen Verluste in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Arbeitspunkte angegeben. Zugrunde gelegt sind jeweils die HR- oder TP-Qualitäten. Für im Axialfeld gepresste Teile ergeben sich bei sonst gleichen Bedingungen geringfügig kleinere Verluste. In den Diagrammen der typischen irreversiblen Verluste ist die so genannte thermische Nachwirkung berücksichtigt (in den dargestellten

Entmagnetisierungskurven $J(H)$ und $B(H)$ ist diese naturgemäß nicht enthalten). Das sich daraus ergebende zeit- und temperaturabhängige Gegenfeld ist bei der Magnetauslegung zusätzlich zu dem vom jeweiligen Arbeitspunkt vorgegebenen entmagnetisierenden Feld zu berücksichtigen (s. dazu Anhang 12, S. 70). Für praktische Anwendungen kann davon ausgegangen werden, dass sich diese zusätzlichen Gegenfelder in der Größenordnung von ca. 150 kA/m bewegen. Für eine Magnetdimensionierung unter Einbeziehung der Langzeitstabilität sollten daher die Diagramme der im Folgenden dargestellten irreversiblen Verluste zugrunde gelegt werden. Die magnetischen Daten und Messkurven beziehen sich auf Magnete, deren Minimalabmessungen 10 mm senkrecht zur Vorzugsrichtung und 5 mm parallel dazu betragen. Bei kleineren Abmessungen sind Abweichungen von den angegebenen Kurvenverläufen möglich.

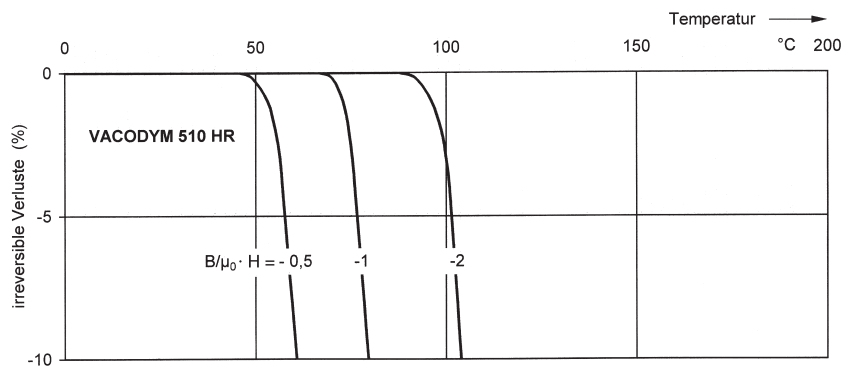
5.2.1 GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 510

Typische Entmagnetisierungskurven $B(H)$ und $J(H)$ bei verschiedenen Temperaturen



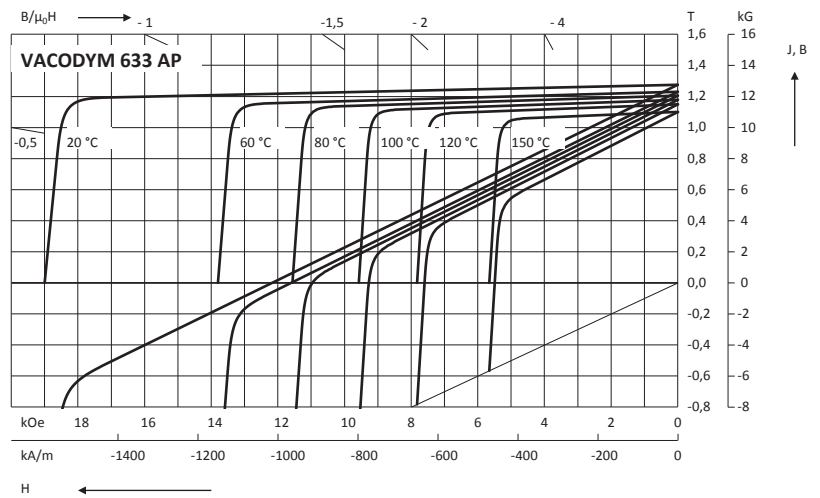
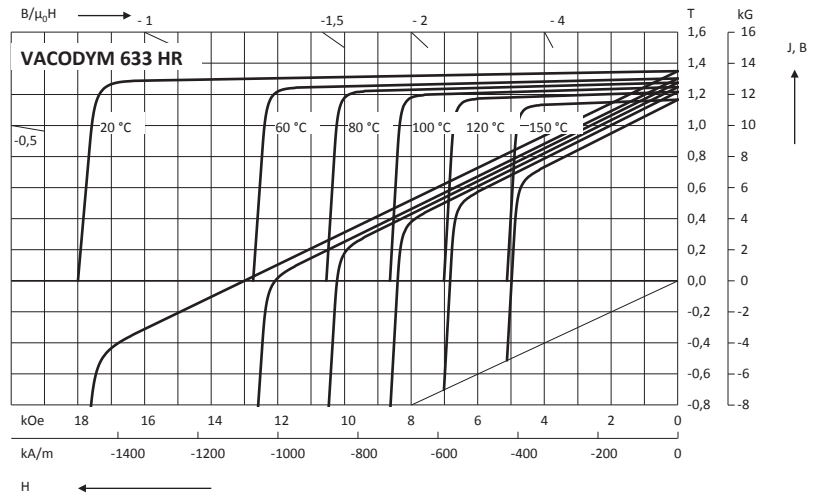
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



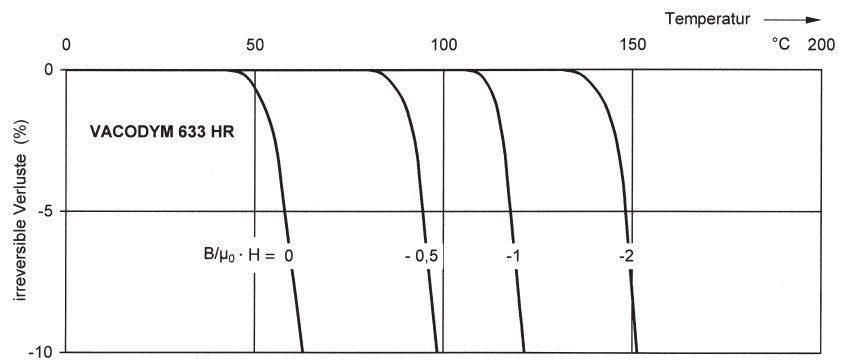
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 633

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



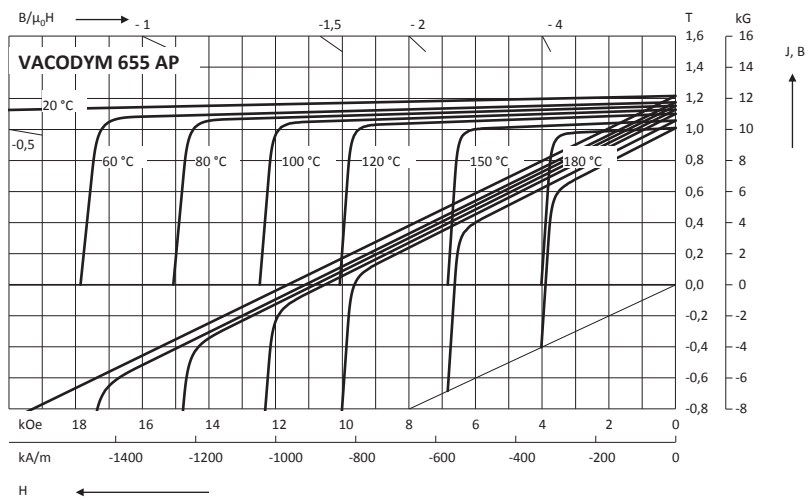
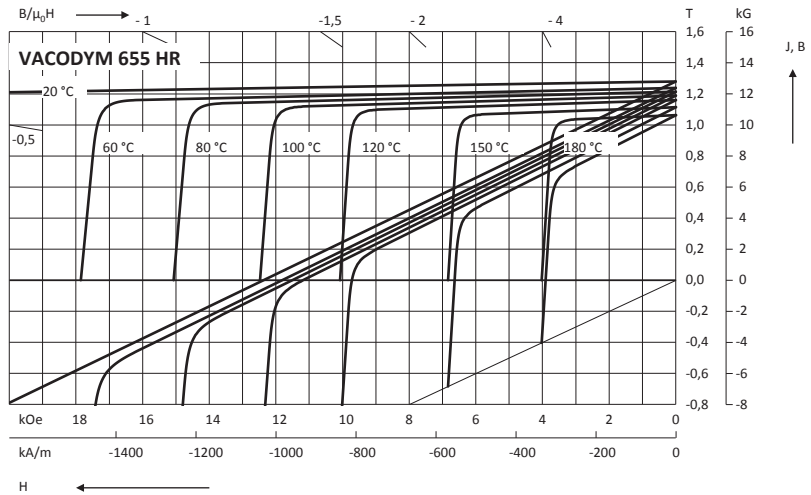
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



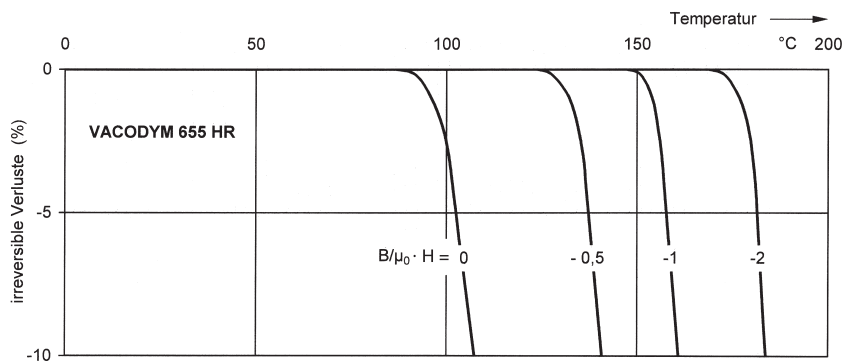
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 655

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



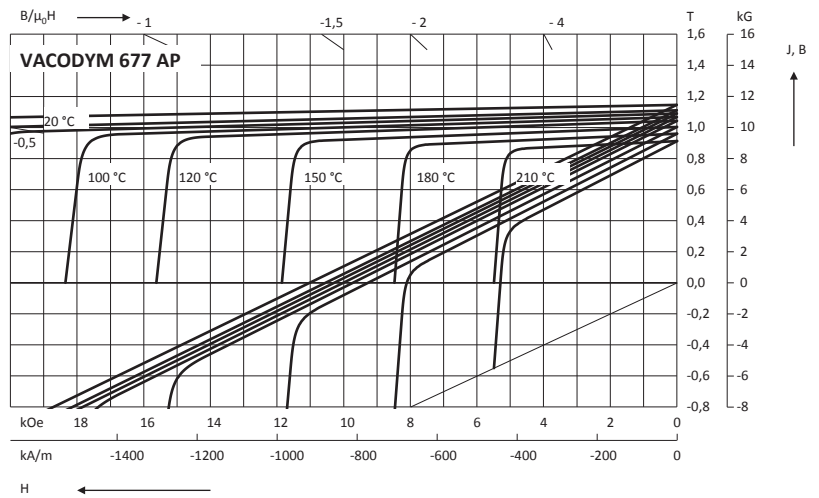
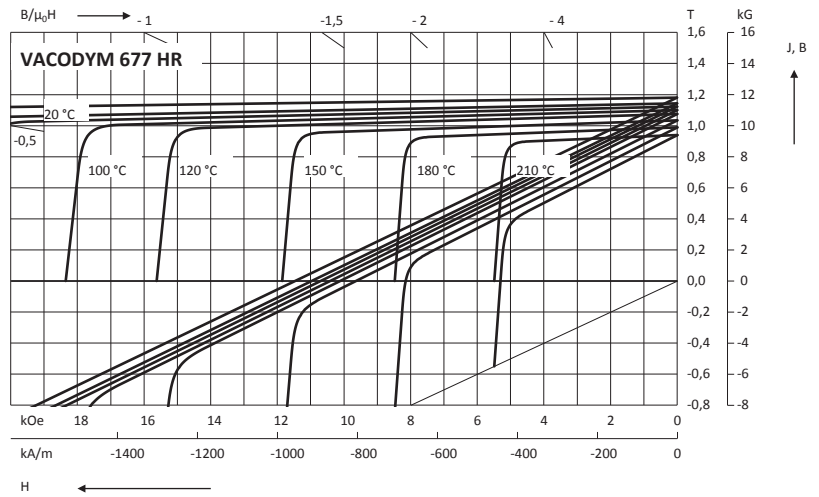
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



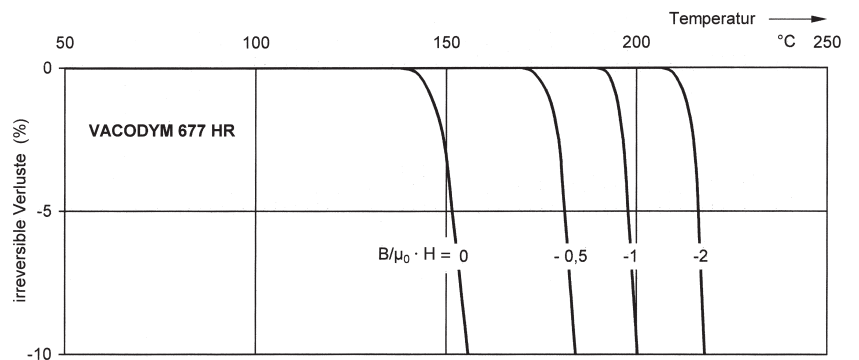
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 677

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



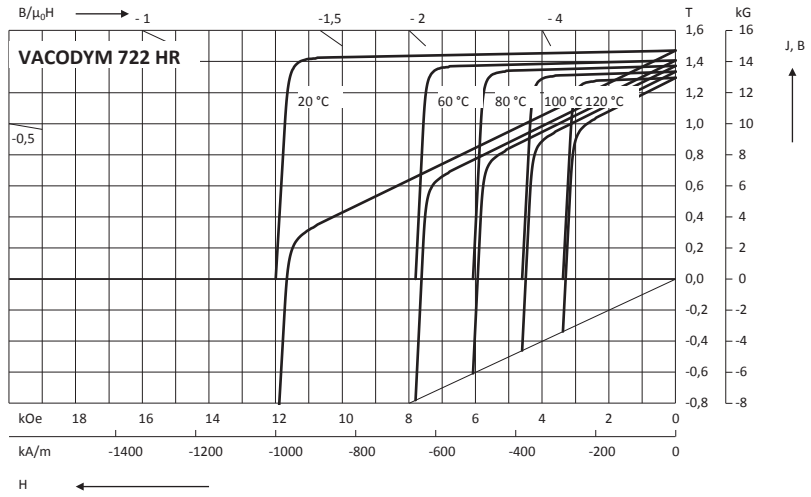
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



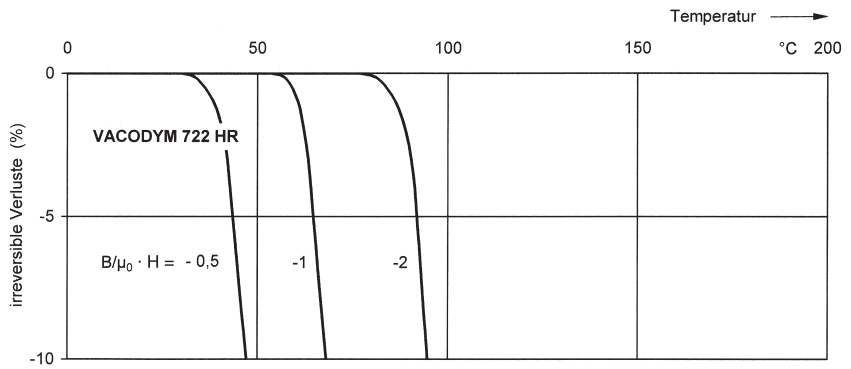
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 722

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



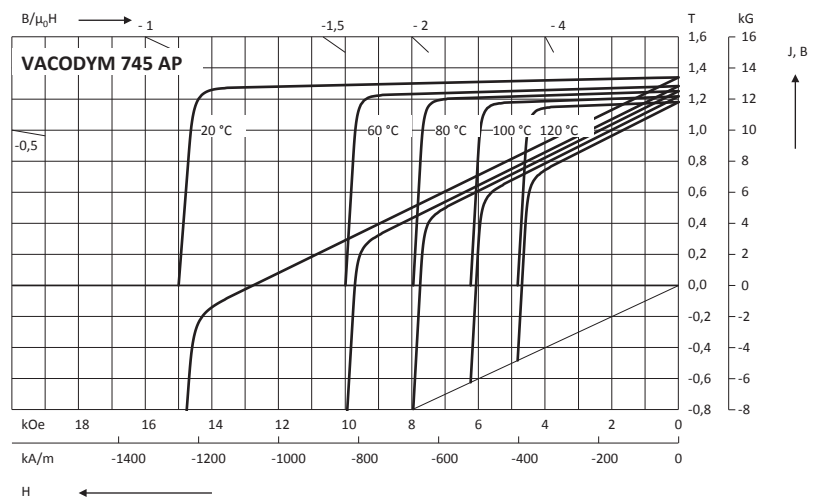
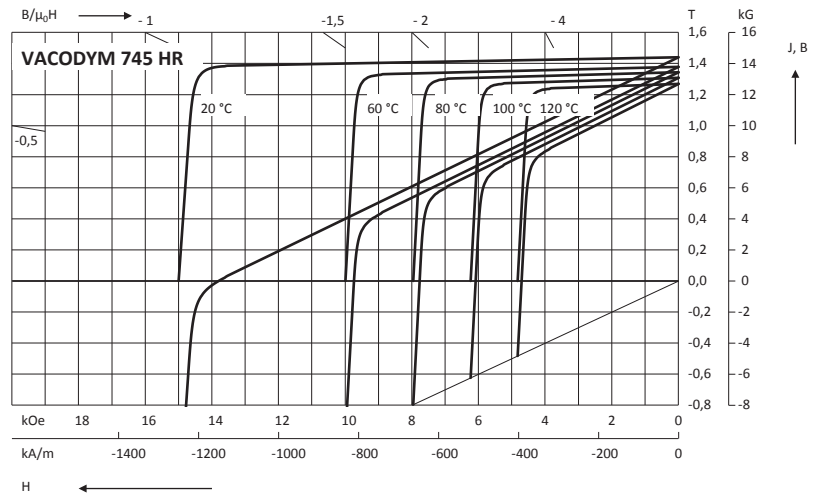
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



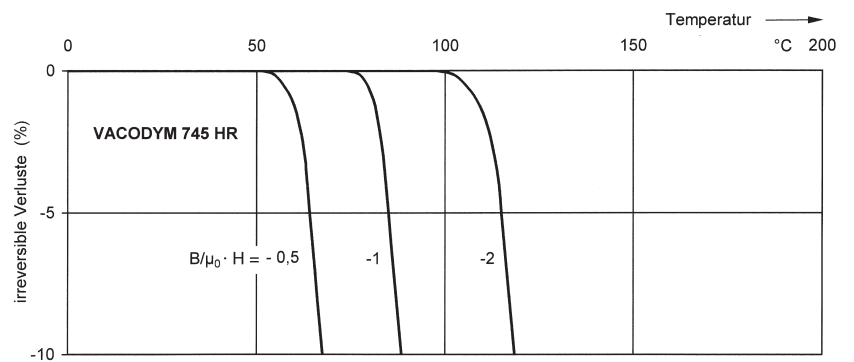
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 745

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



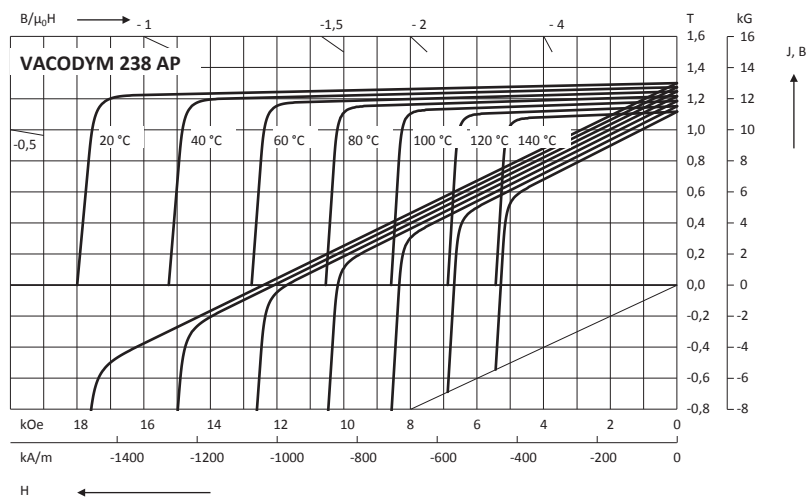
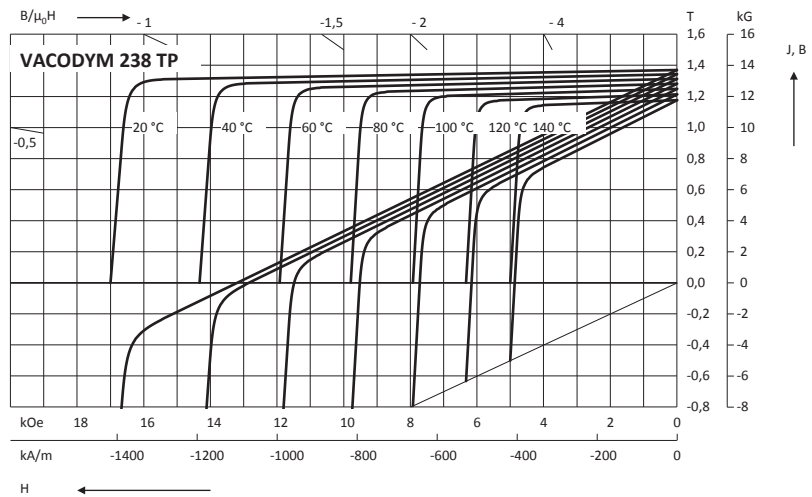
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



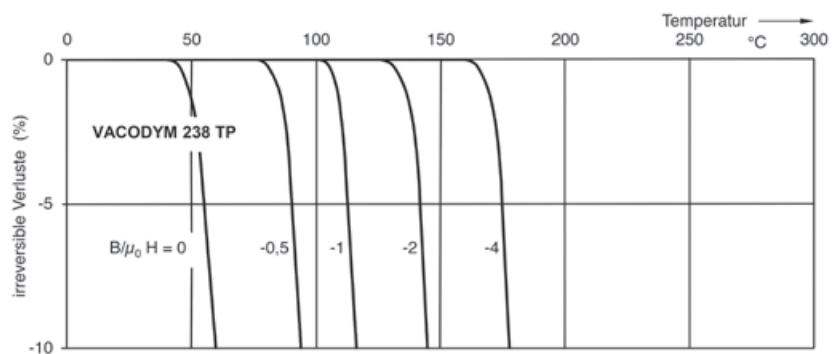
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 238

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



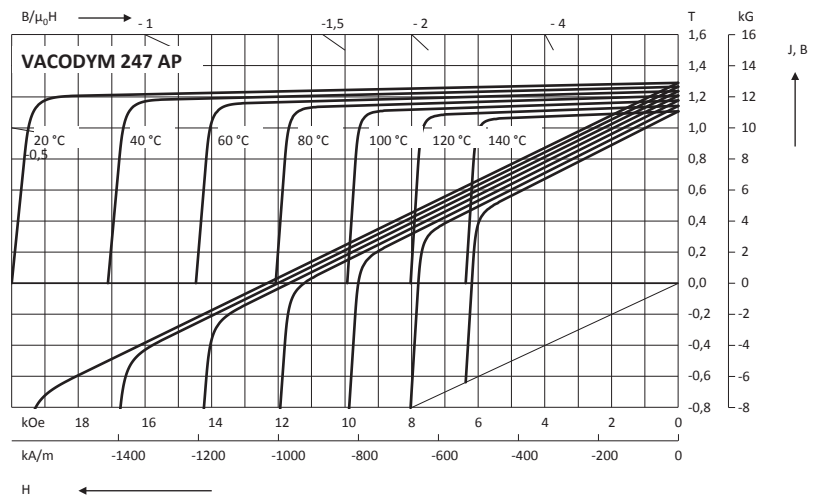
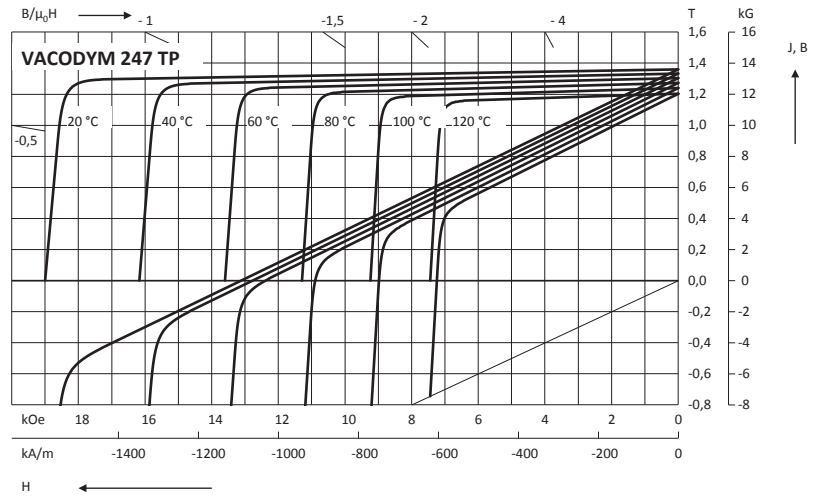
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



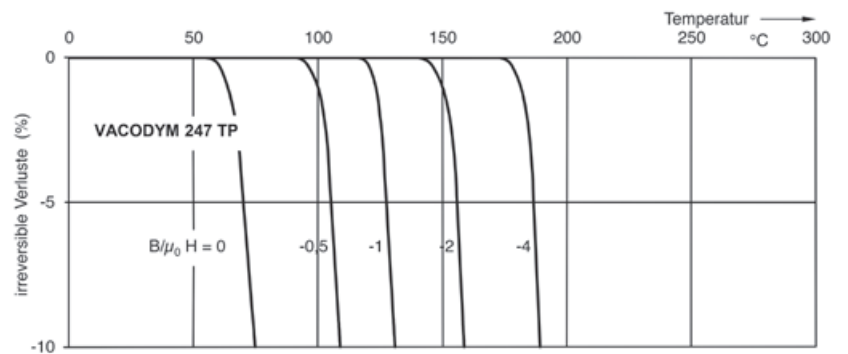
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 247

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



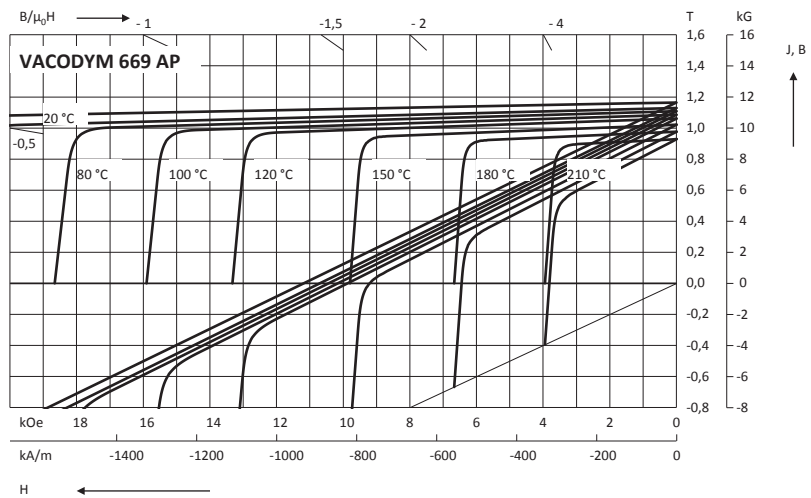
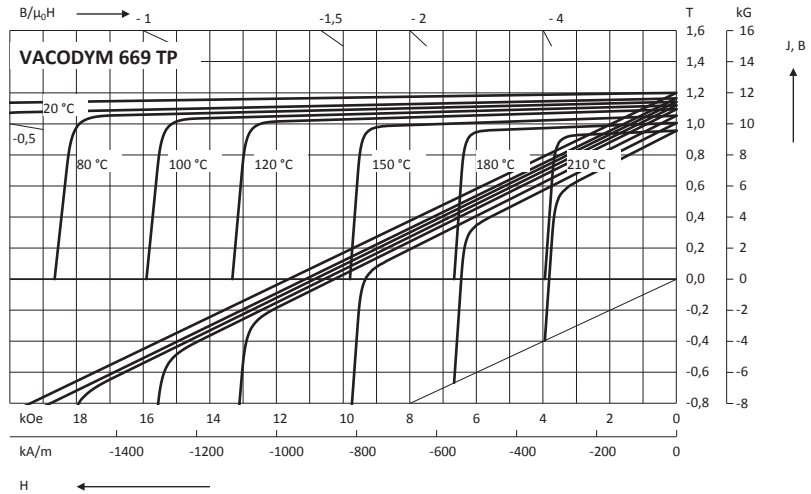
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



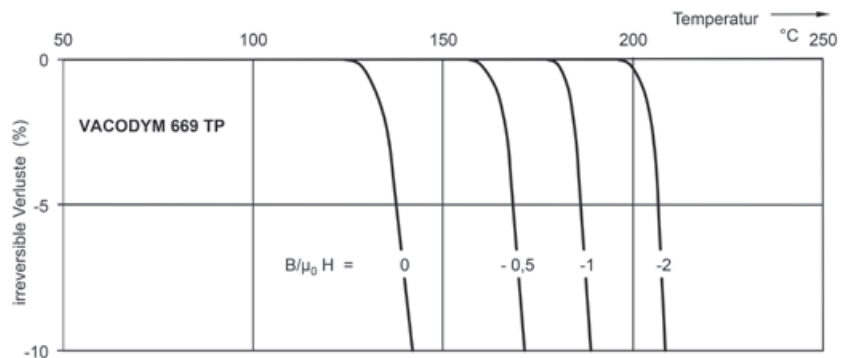
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 669

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



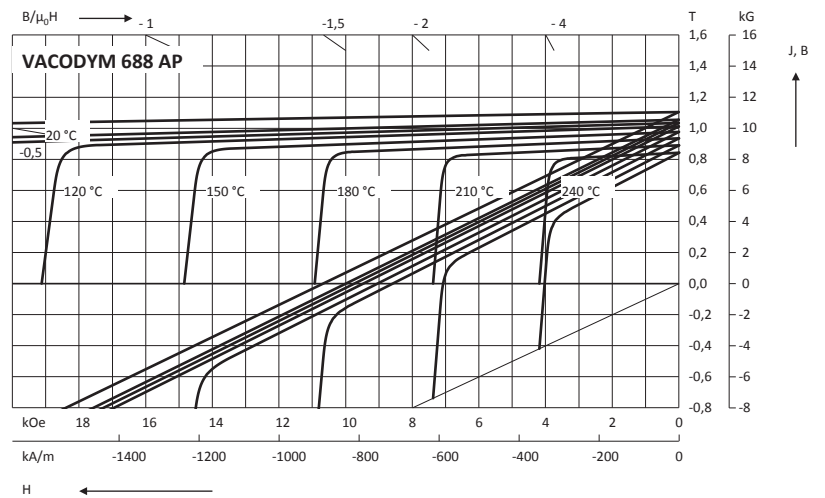
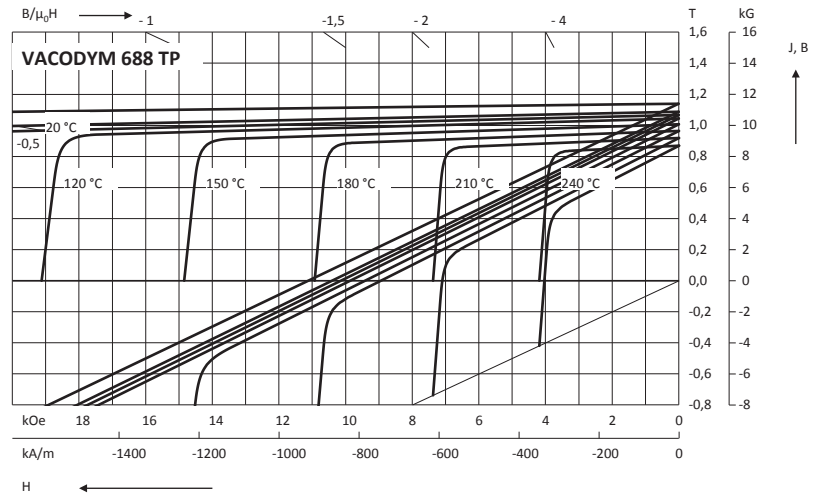
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



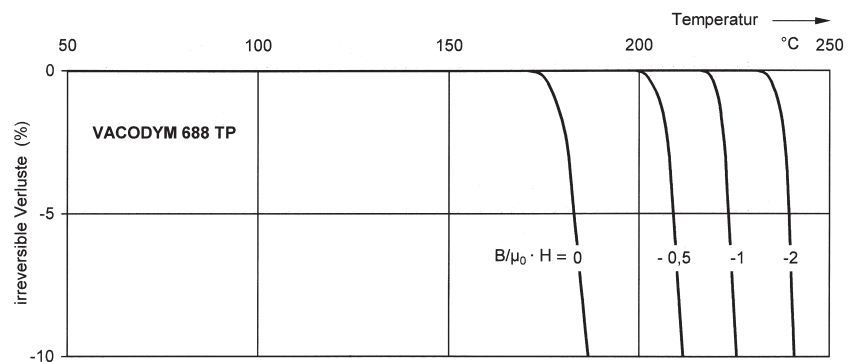
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 688

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



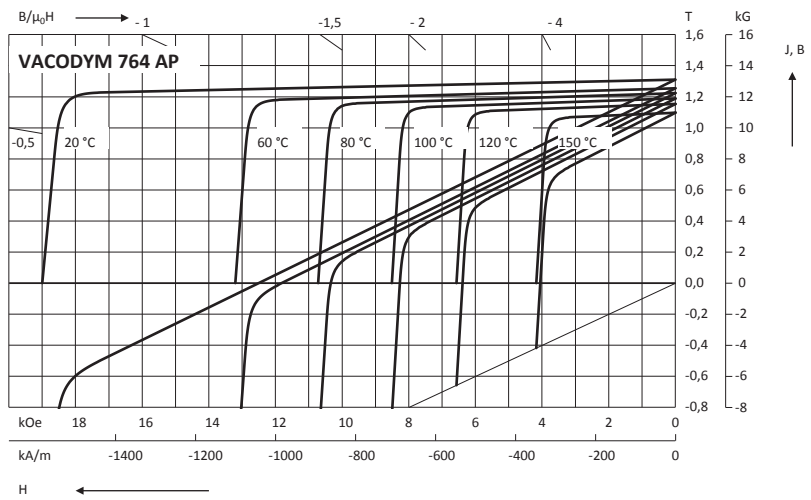
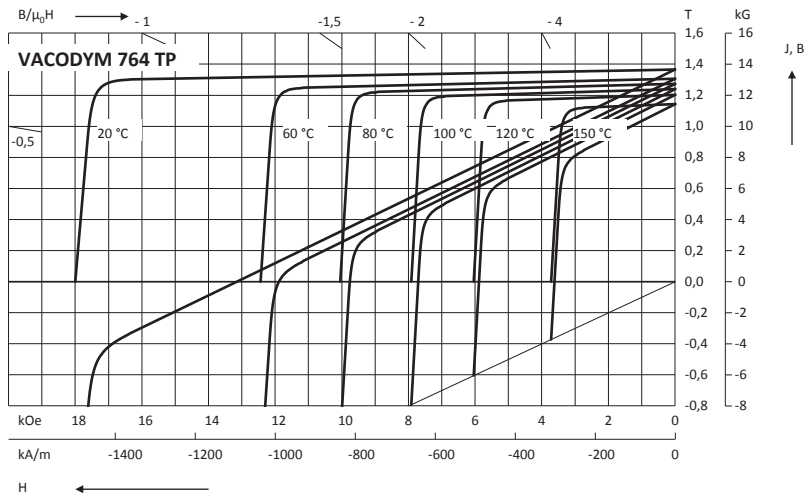
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



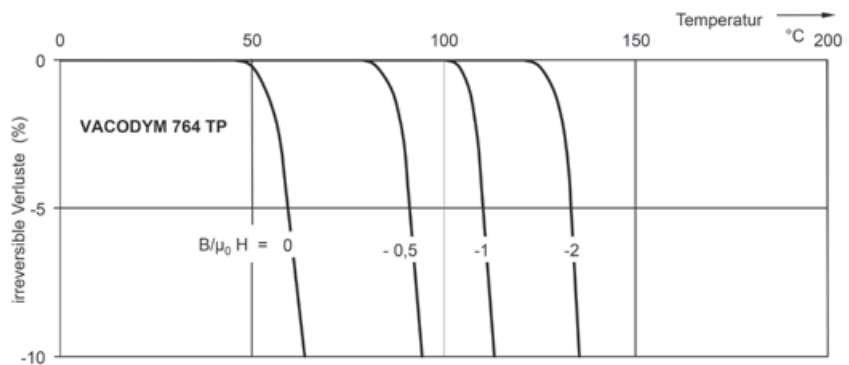
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 764

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



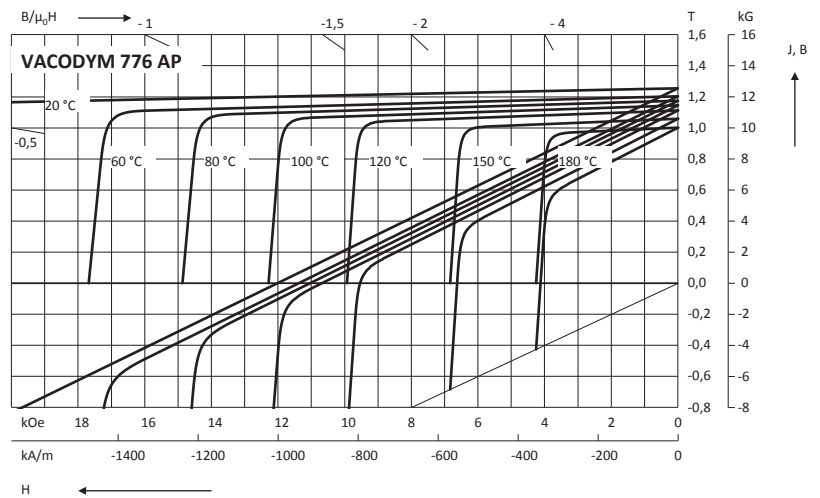
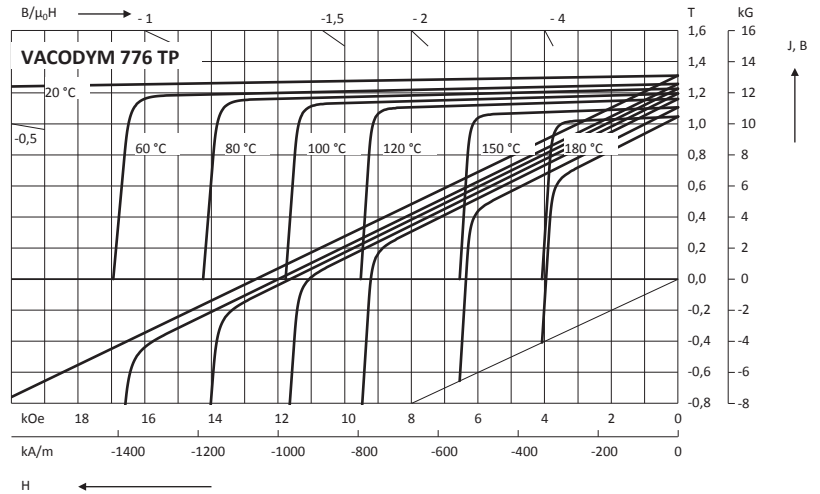
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



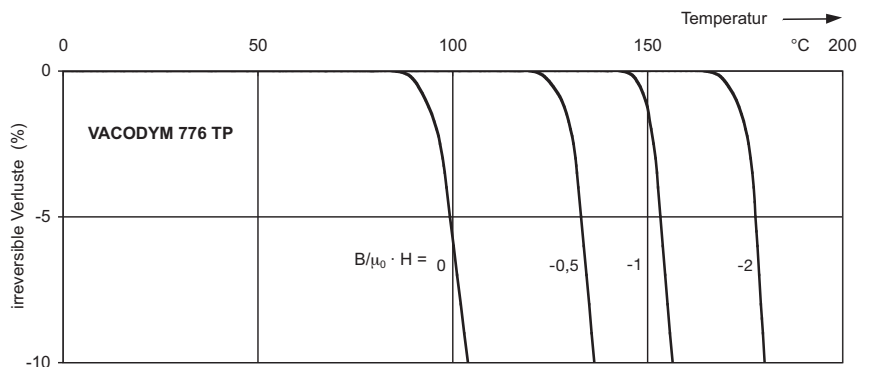
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 776

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



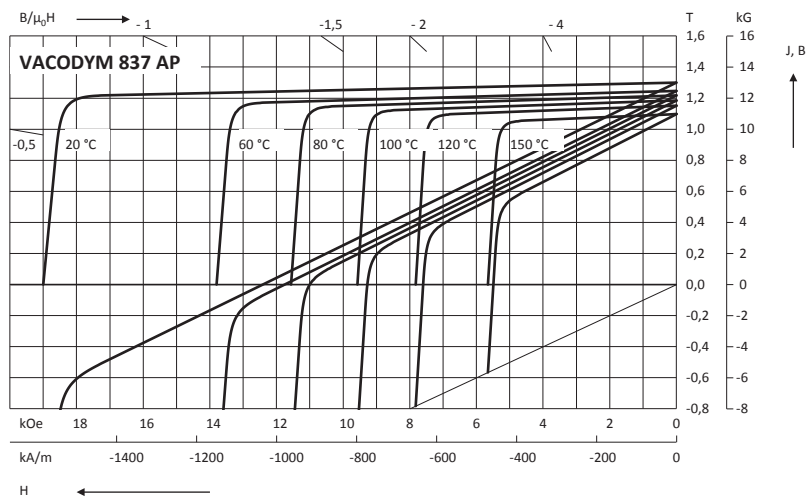
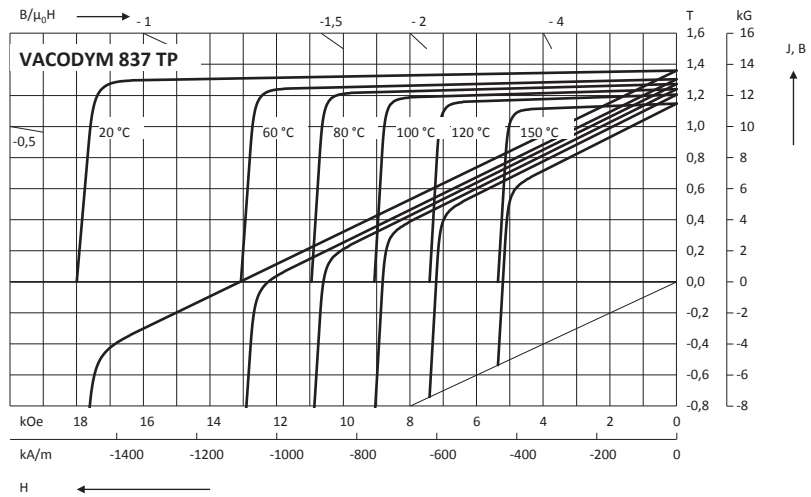
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



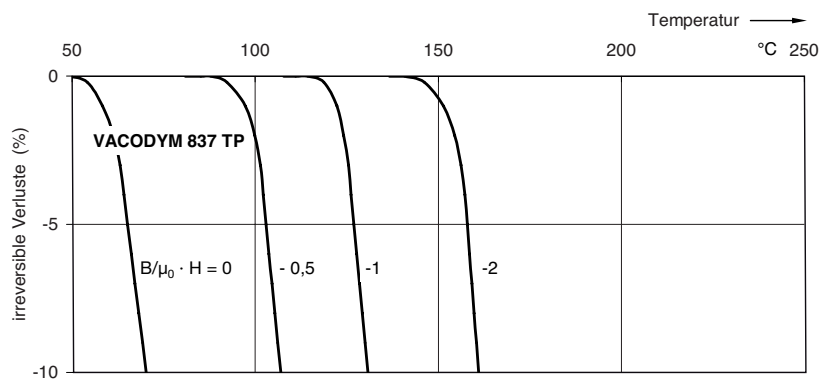
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 837

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



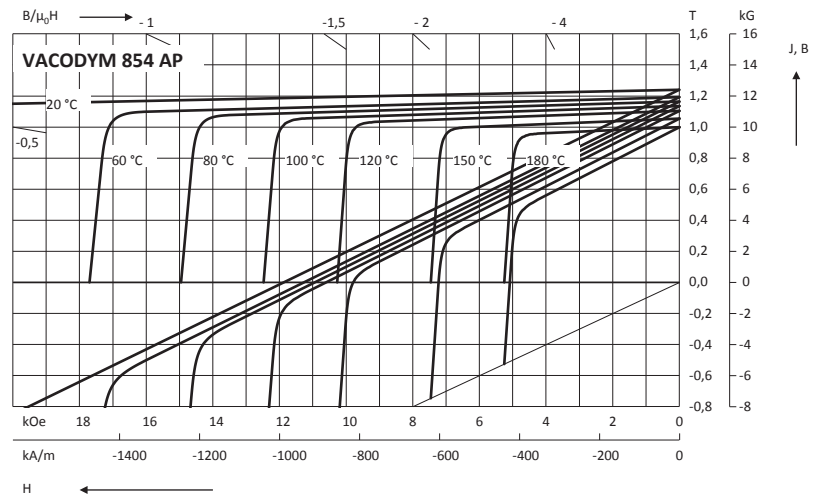
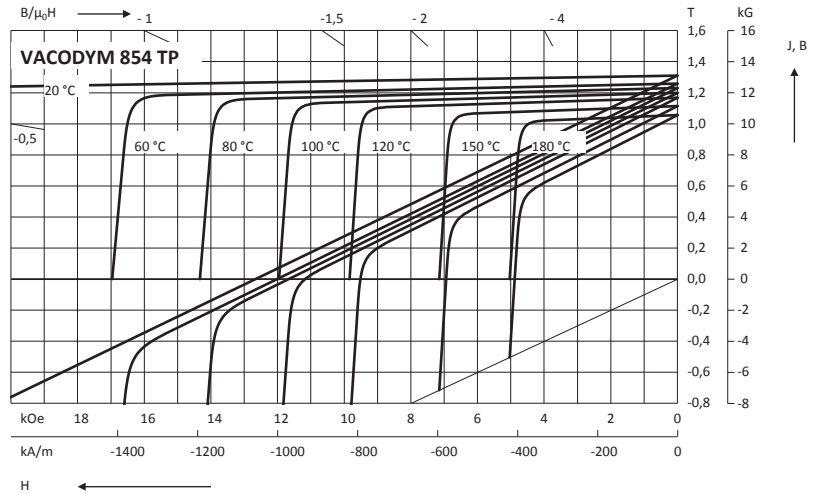
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



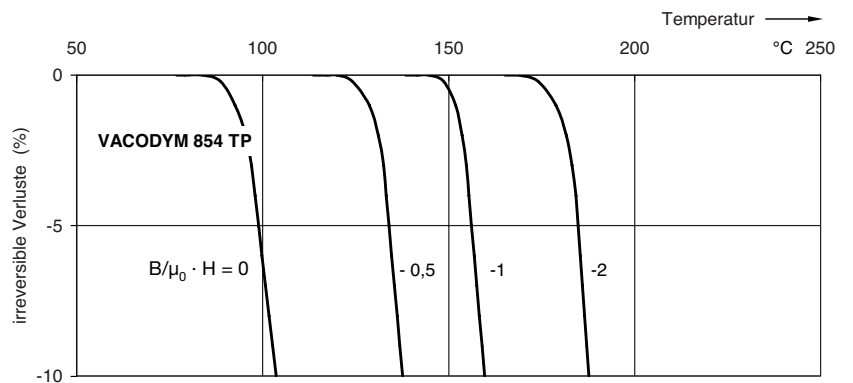
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 854

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



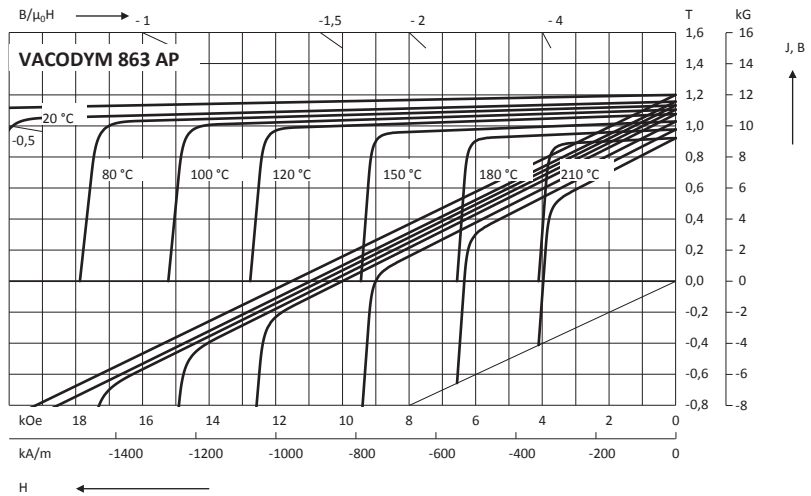
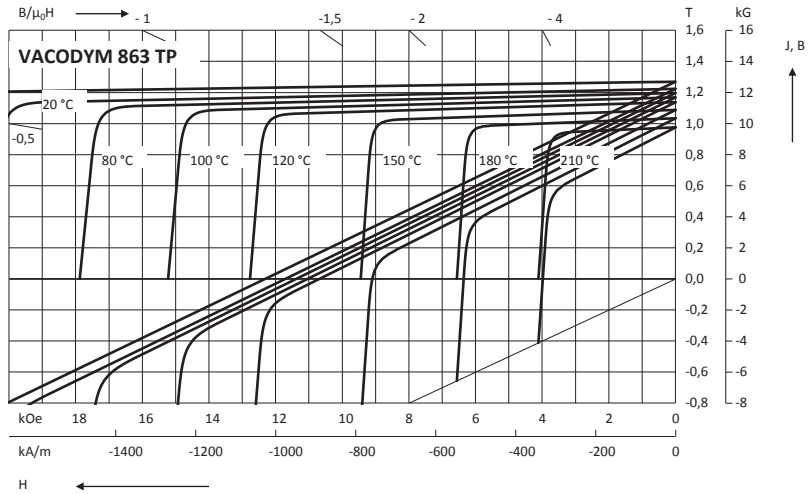
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



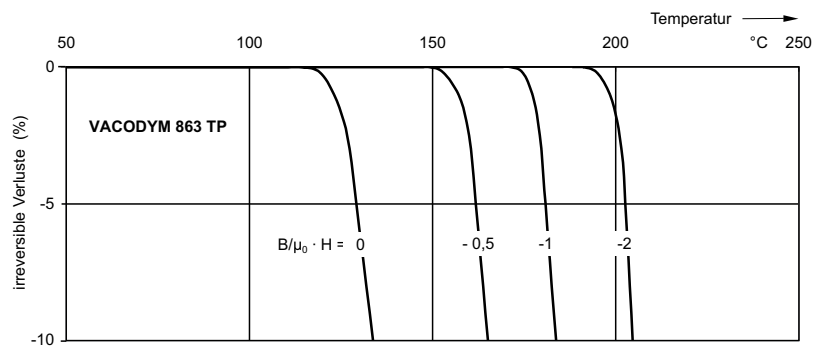
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 863

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



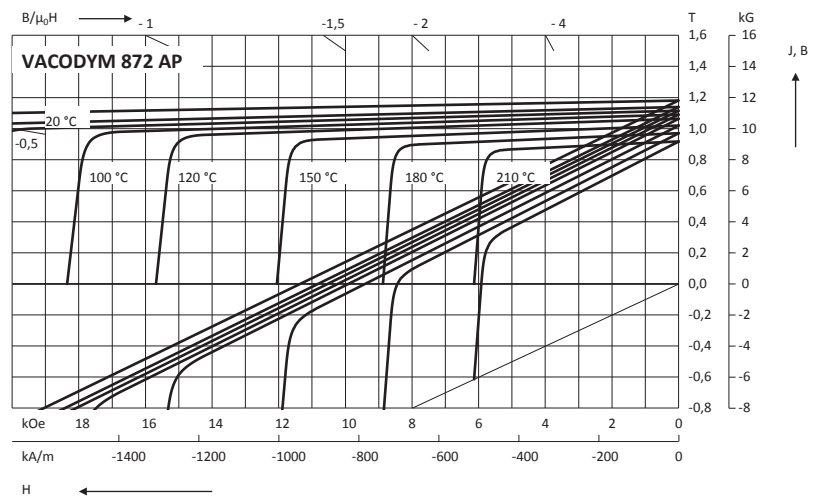
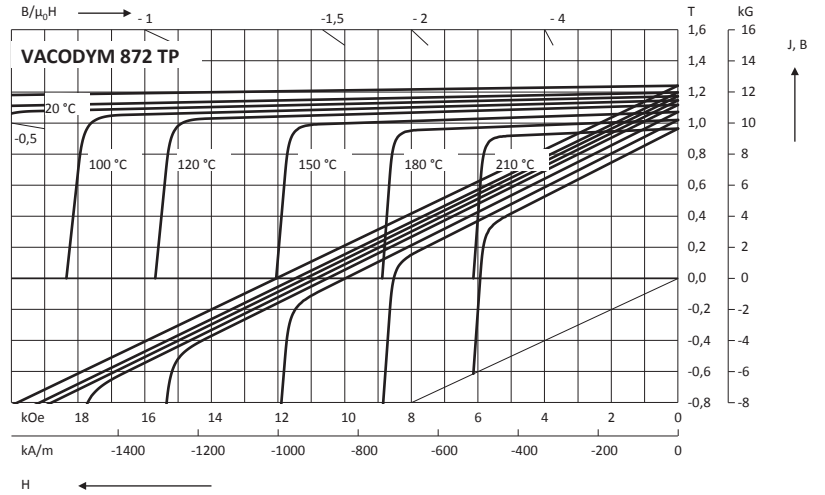
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



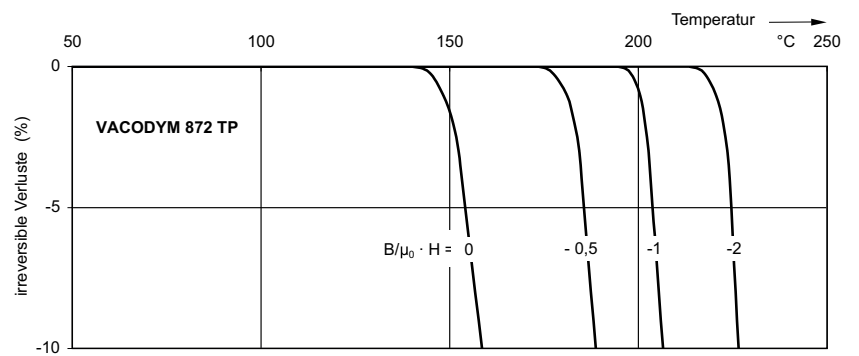
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 872

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



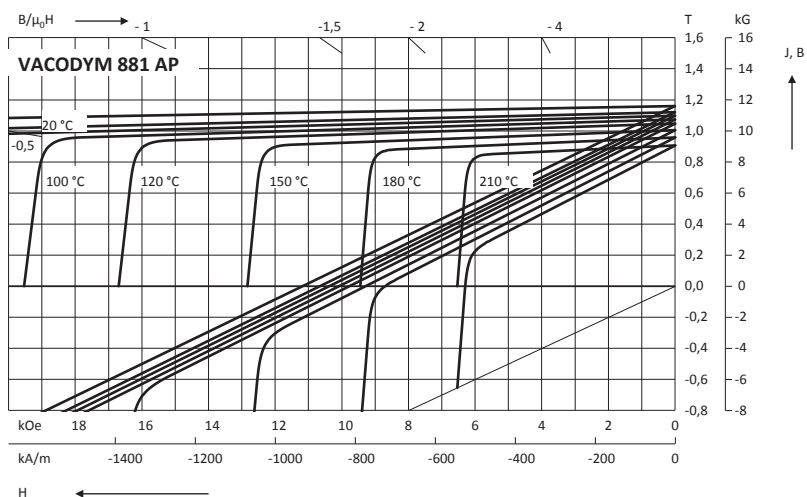
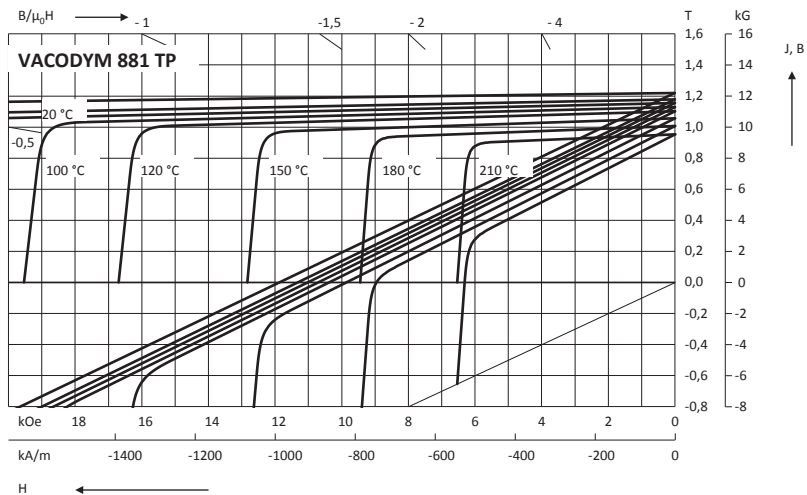
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



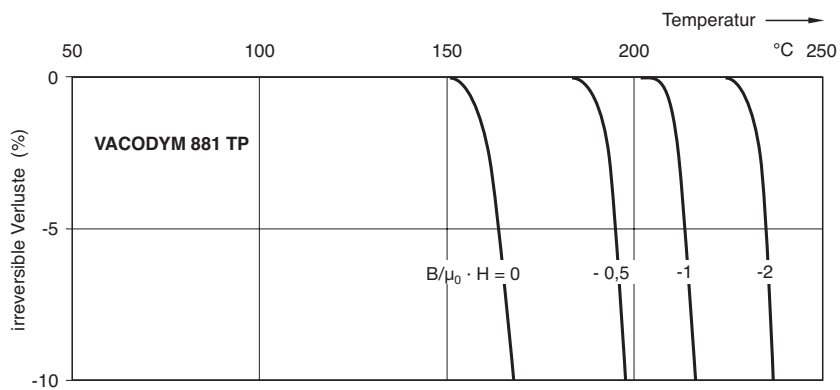
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 881

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



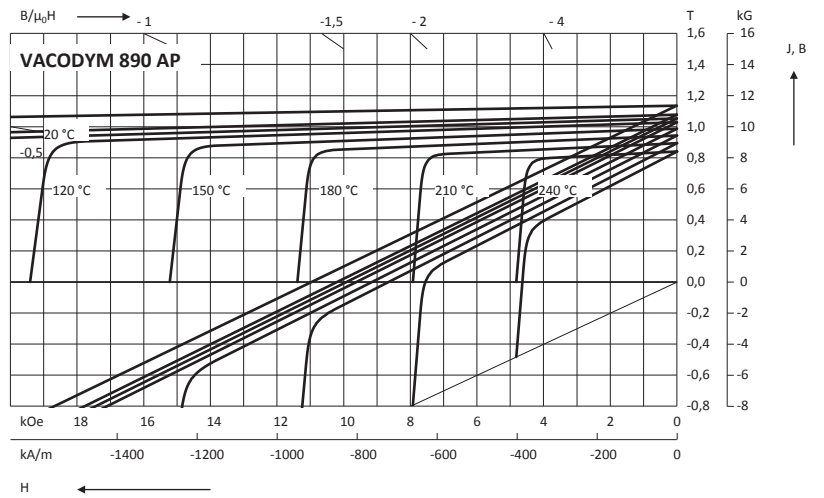
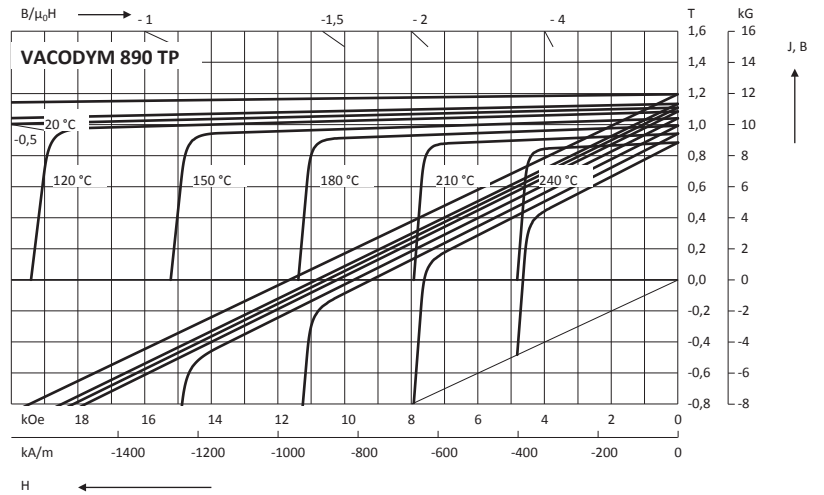
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



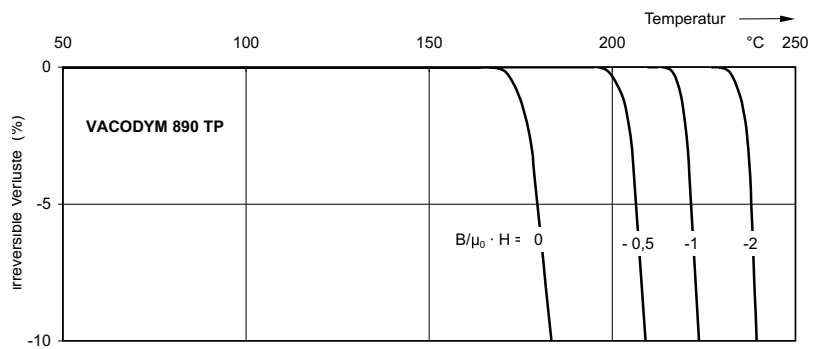
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 890

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



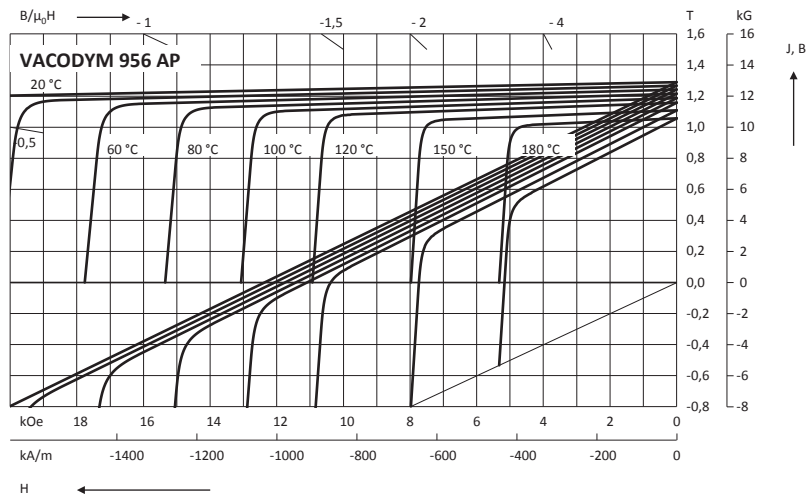
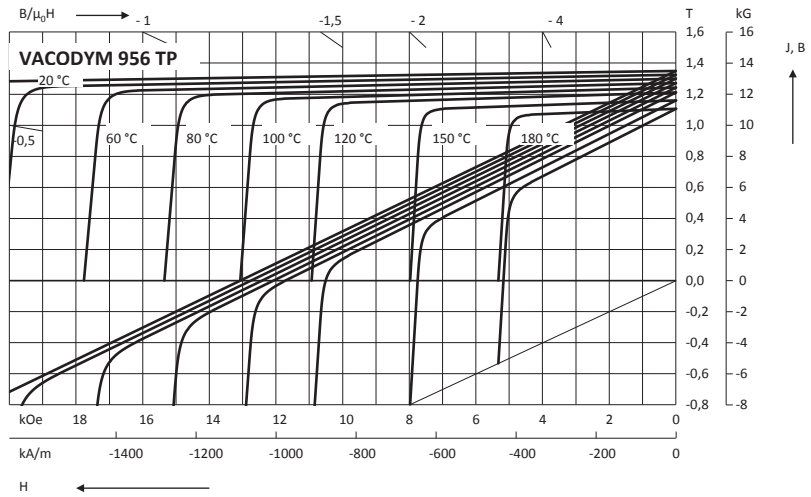
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



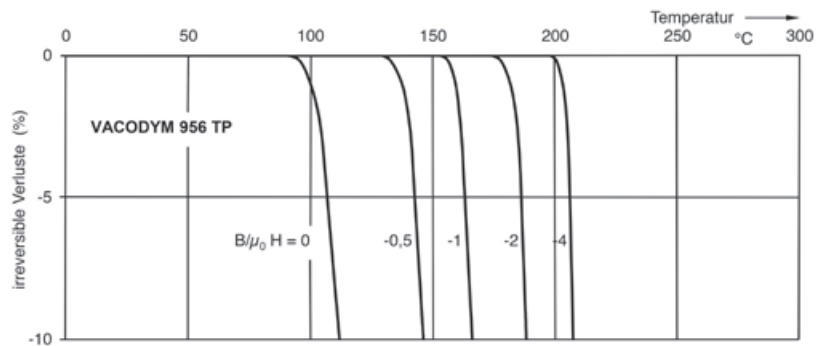
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 956

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



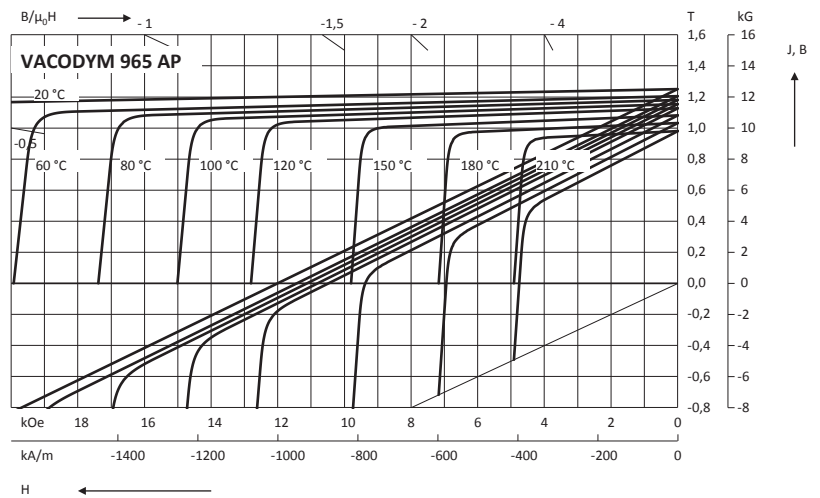
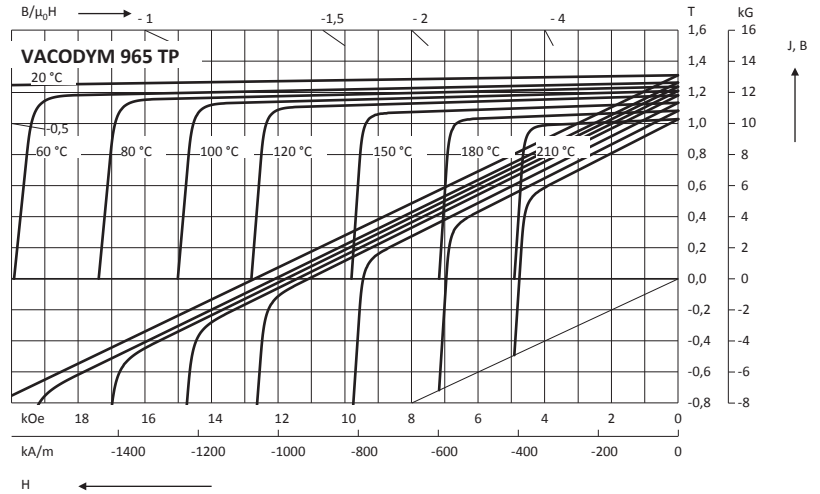
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



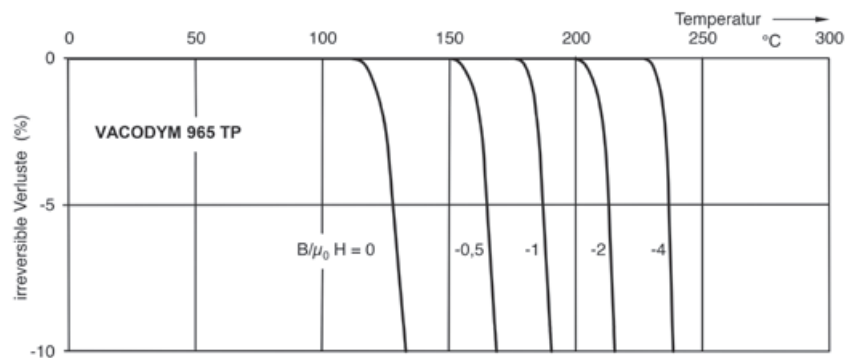
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 965

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



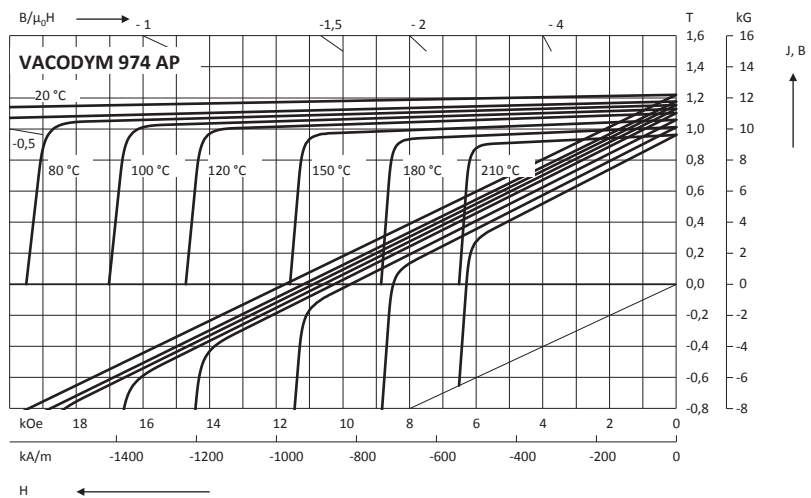
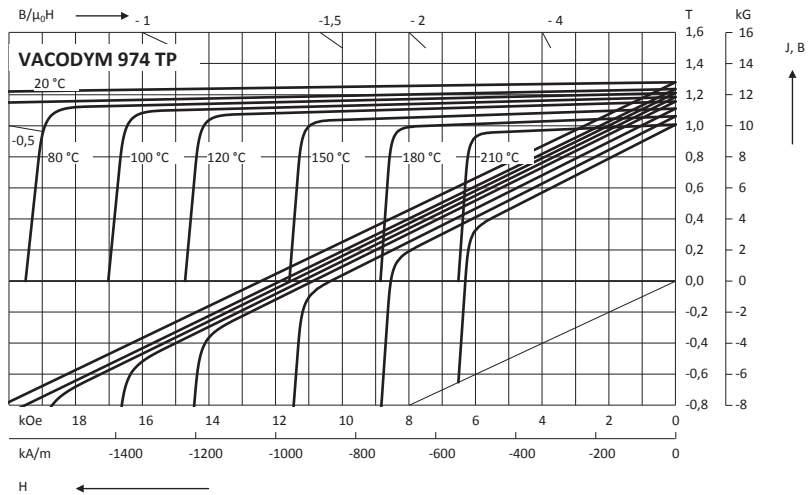
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



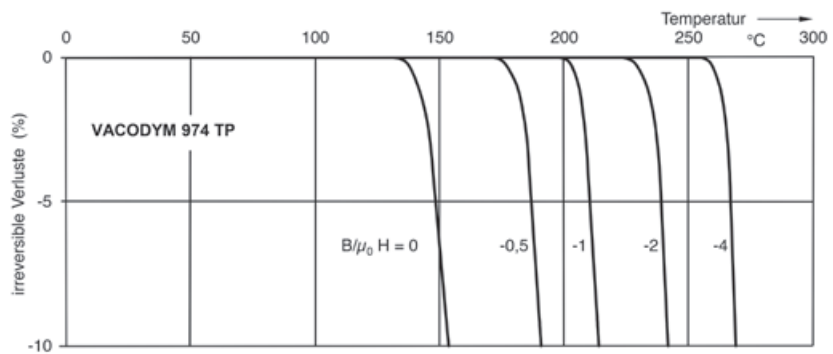
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 974

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



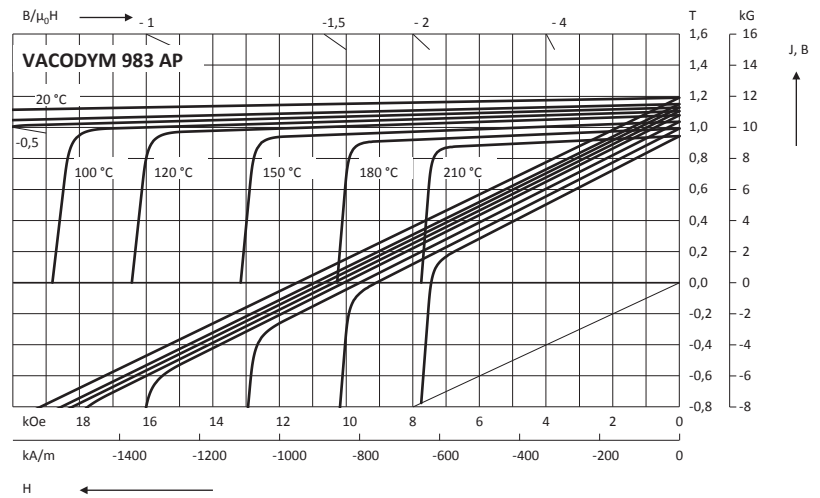
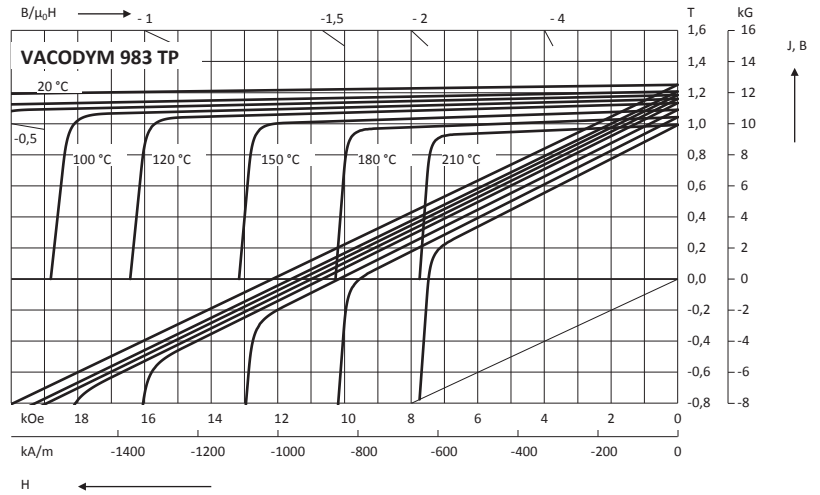
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



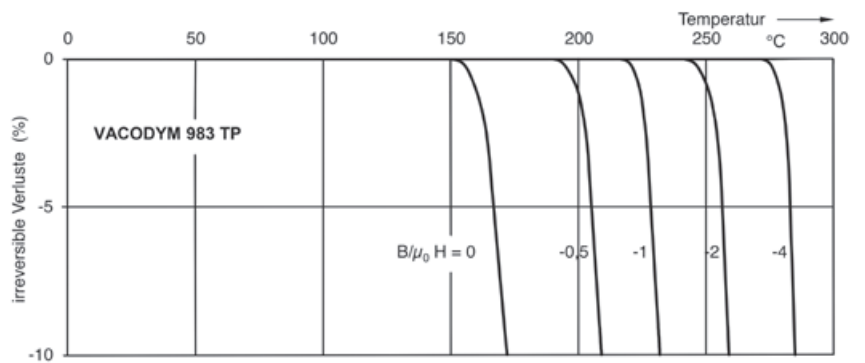
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 983

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



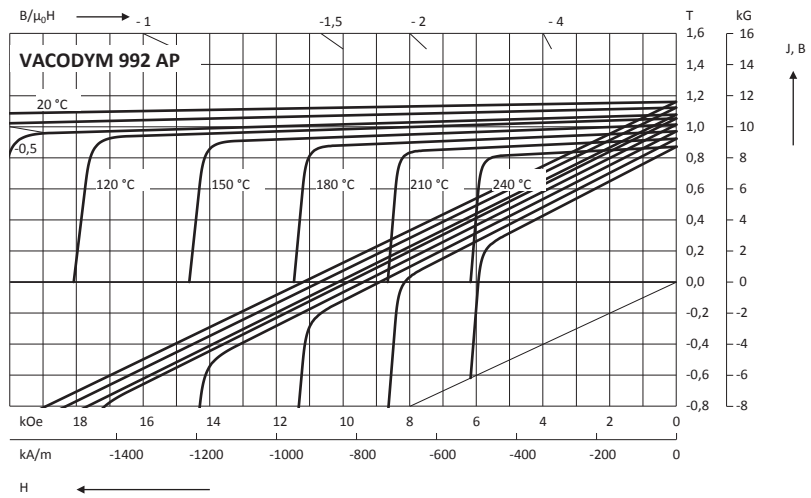
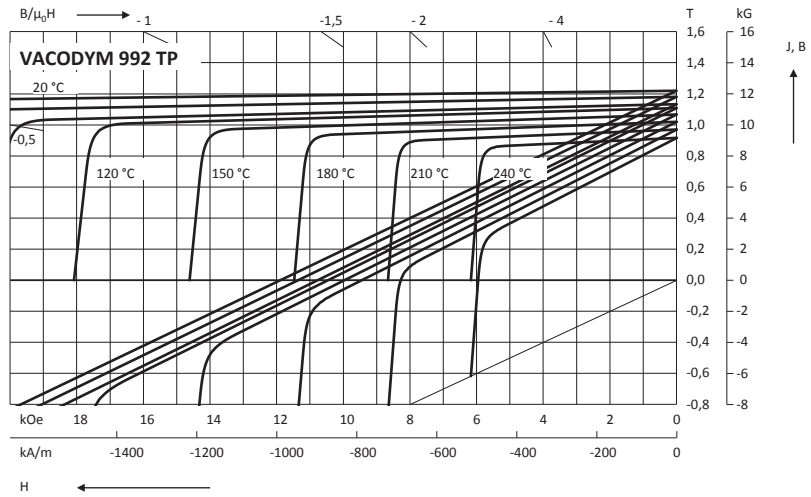
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



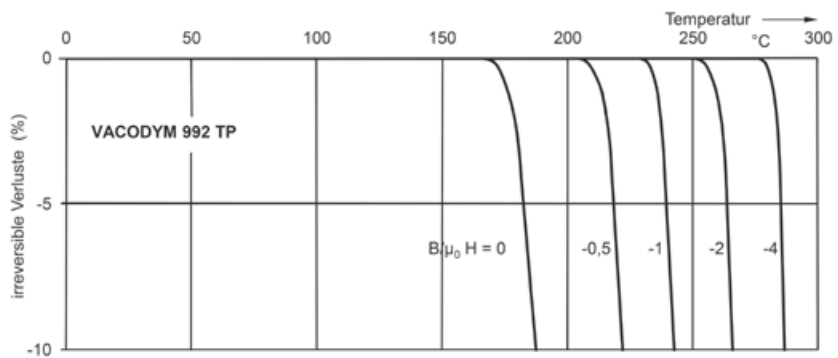
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS NdFeB

VACODYM 992

Typische Entmagnetisierungskurven B(H) und J(H) bei verschiedenen Temperaturen



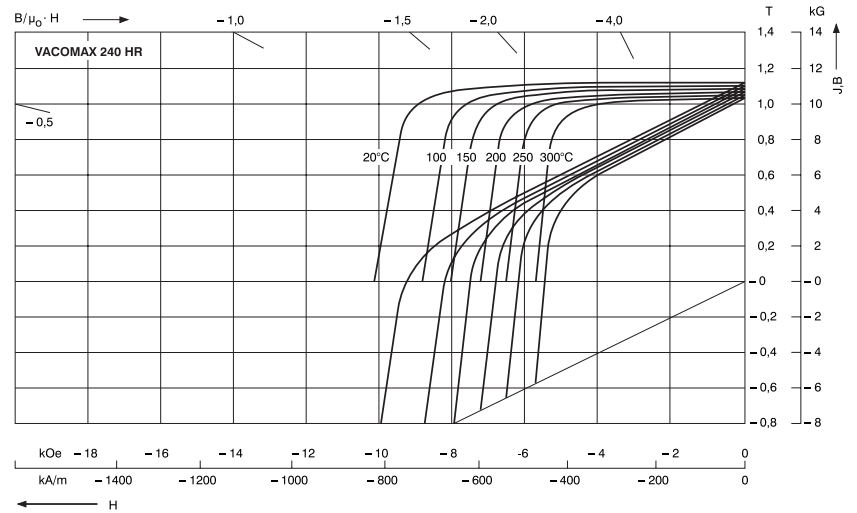
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



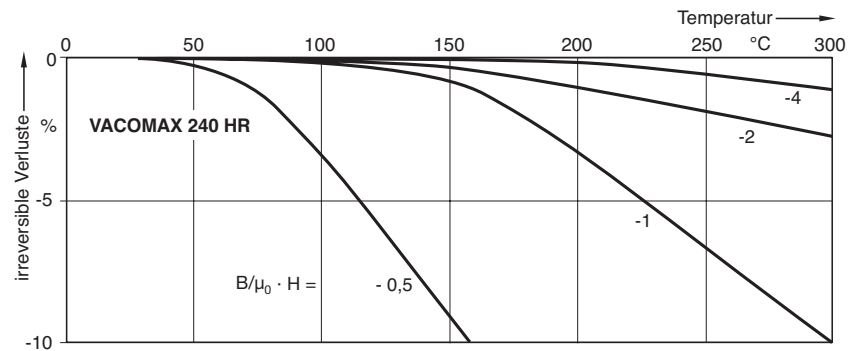
5.2.2 GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

VACOMAX 240

Typische Entmagnetisierungskurven $B(H)$ und $J(H)$ bei verschiedenen Temperaturen



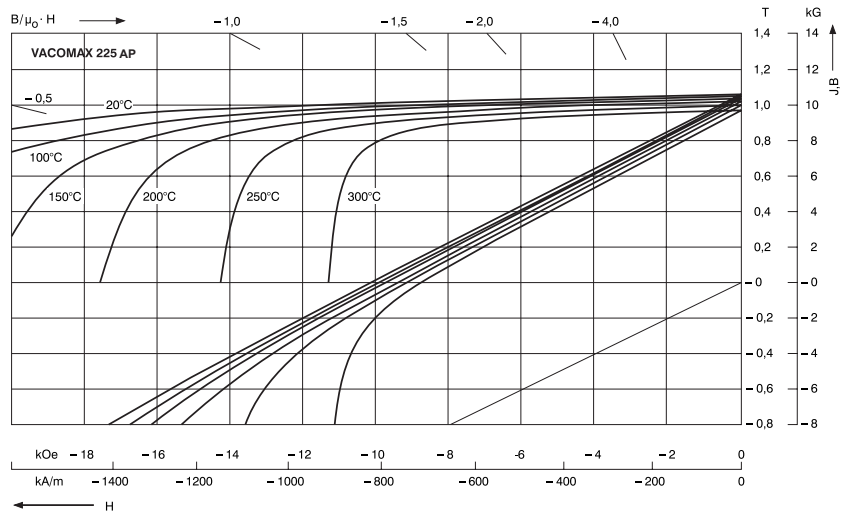
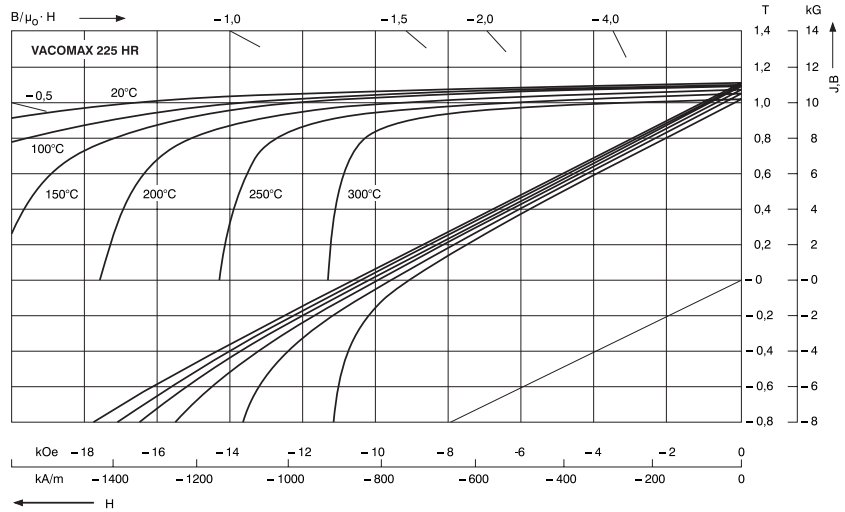
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



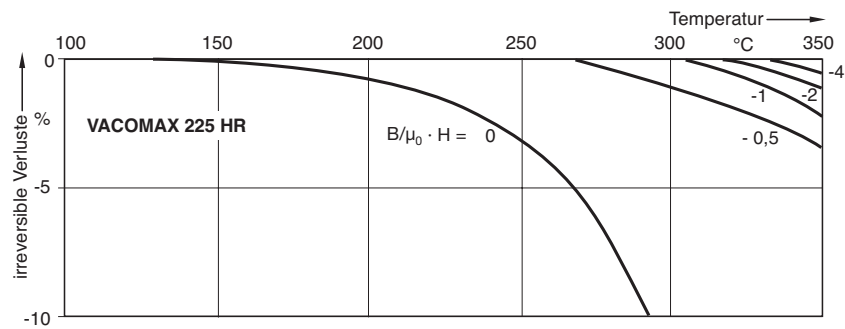
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

VACOMAX 225

Typische Entmagnetisierungskurven $B(H)$ und $J(H)$ bei verschiedenen Temperaturen



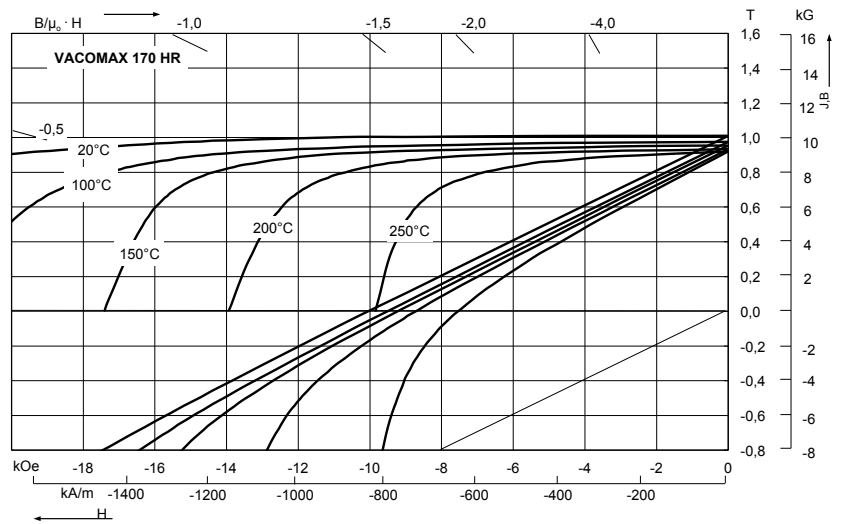
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



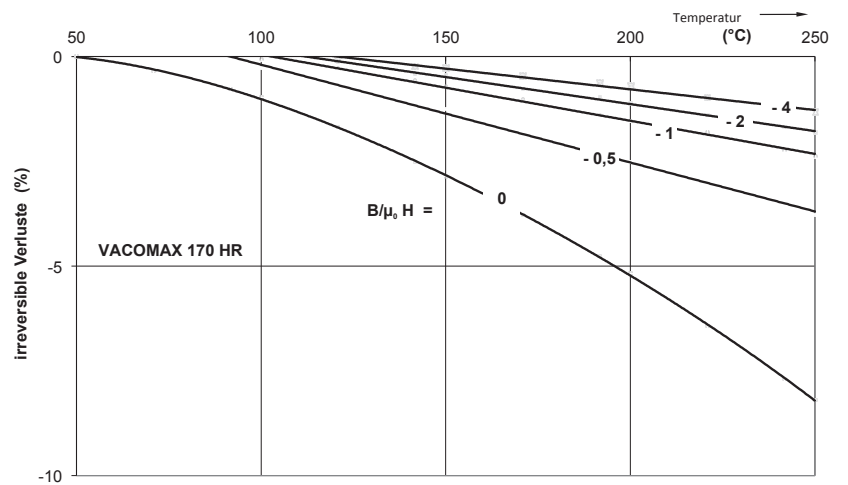
5.2.3 GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS SmCo_5

VACOMAX 170 HR

Typische Entmagnetisierungskurven $B(H)$ und $J(H)$ bei verschiedenen Temperaturen



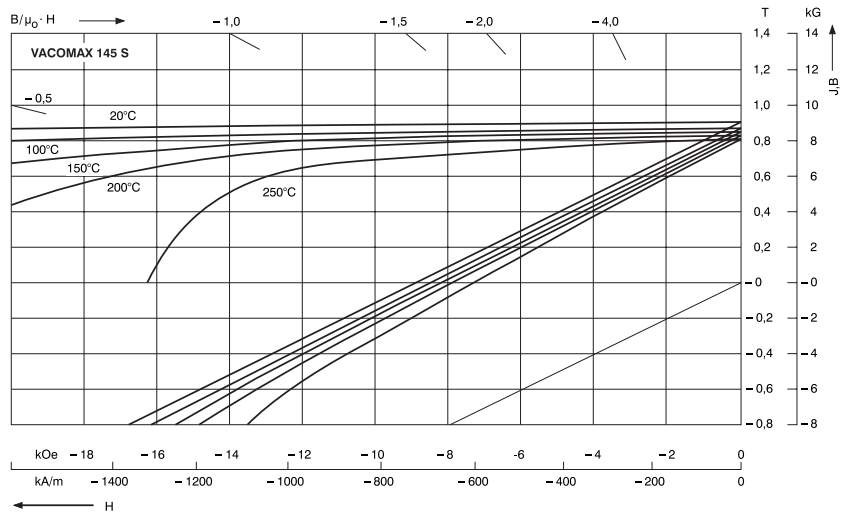
Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



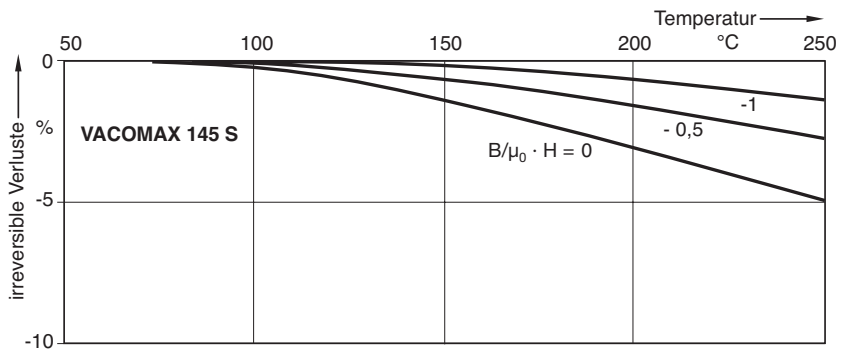
GESINTERTE MAGNETE AUF DER BASIS SmCo_5

VACOMAX 145

Typische Entmagnetisierungskurven $B(H)$ und $J(H)$ bei verschiedenen Temperaturen



Typische irreversible Verluste für verschiedene Arbeitspunkte in Abhängigkeit von der Temperatur



5.3 TEMPERATURABHÄNGIGKEIT UND MAGNETISCHE VERLUSTE

Die magnetischen Eigenschaften von Dauermagneten sind von der Anwendungstemperatur abhängig. Die typischen Entmagnetisierungskurven von VACODYM und VACOMAX bei verschiedenen Temperaturen sind auf den einzelnen Legierungsseiten dargestellt (siehe Seiten 21-47). Bei der Wahl des Werkstoffes und der Dimensionierung der Magnete müssen die magnetischen Kenngrößen und deren Temperaturabhängigkeit berücksichtigt werden (vgl. Anhang S. 69 „Technische Grundlagen und Begriffe“). Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Entmagnetisierungskurven werden Änderungen der Induktion verursacht, die allgemein als magnetische Verluste bezeichnet werden. Bei diesen Verlusten unterscheidet man reversible Verluste und irreversible Verluste aufgrund von Ummagnetisierungen kleiner Bereiche der Magnete in Gegenfeldern und/oder bei Temperaturerhöhung sowie Gefügeänderungen.

Reversible Änderungen der Induktion sind auf die Temperaturabhängigkeit der Sättigungspolarisation zurückzuführen und nur von der Legierungszusammensetzung abhängig. Sie werden durch den Temperaturkoeffizienten der Remanenz erfasst, dessen mittlere Werte für die einzelnen Werkstoffe in Tab. 1 bzw. 2 angegeben sind. Falls bei bestimmten Anwendungen eine Temperaturkompensation erforderlich ist, empfehlen wir einen magnetischen Nebenschluss aus THERMOFLUX®. Auf diese Weise können bei geringfügig verminderten Flusswerten im Bereich von 20 °C bis 100 °C in Systemen Temperaturkoeffizienten $|\text{TKI}| < 0,01 \text{ \%}/\text{K}$ erreicht werden.

Irreversible Verluste durch Ummagnetisierungsprozesse sind vom Arbeitspunkt des Magneten und der maximalen Anwendungstemperatur abhängig. Die für unterschiedliche Arbeitspunkte $B/\mu_0 H$ bei den verschiedenen Werkstoffsorten zu erwartenden typischen irreversiblen Verluste sind auf den einzelnen Legierungsseiten angegeben.

Die irreversiblen Änderungen können durch einen Stabilisierungsprozess (Alterung) weitgehend vorweggenommen werden. Die optimalen Stabilisierungsbedingungen sollten für den jeweiligen Anwendungsfall angefragt werden. Meistens ist es ausreichend, die Magnete im eingebauten Zustand als komplettes System ca. eine Stunde geringfügig über die maximale Anwendungstemperatur zu erwärmen. Dadurch kann auch die so genannte „thermische Nachwirkung“ vorweggenommen werden (s. S. 20). Durch diese Vorbehandlung kann bereits eine gute Stabilisierung erreicht werden. Dabei muss allerdings die Verringerung der Induktion um die jeweiligen irreversiblen Änderungen in Kauf genommen werden.

Die durch Ummagnetisierung kleiner Bereiche des Magneten verursachten Verluste können durch erneutes Aufmagnetisieren rückgängig gemacht werden. Die maximalen Anwendungstemperaturen werden im Wesentlichen durch die Abnahme der magnetischen Eigenschaften begrenzt. Zur Vermeidung unerwünschter irreversibler Gefügeänderungen, die auch durch erneutes Aufmagnetisieren nicht mehr rückgängig gemacht werden können, dürfen VACODYM-Magnete nicht über 350 °C und VACOMAX-Magnete nicht über 400 °C erwärmt werden.

Unabhängig davon müssen chemische Reaktionen mit der umgebenden Atmosphäre und Kontaktwerkstoffen (z.B. Kleber) verhindert werden. Dies gilt insbesondere für Reaktionen, bei denen Wasserstoff entstehen kann (siehe Kapitel 7 „Korrosionsverhalten, Oberflächenschutz und Beschichtung“). Bei Einwirkung von radioaktiver Strahlung über einen längeren Zeitraum kann es bei SE-Magneten zu irreversiblen magnetischen Verlusten kommen.

VACOMAX ist bis zu Temperaturen des flüssigen Heliums einsetzbar. Für Anwendungen von VACODYM unterhalb ca. 150 K stehen unsere neuen Legierungen VACODYM 131 TP und 131 DTP zur Verfügung. Außerdem empfehlen wir eine Beratung durch unsere Mitarbeiter.

® = eingetragenes Warenzeichen der VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG

5.4 AUFMAGNETISIEREN DER SELTEN-ERD-WERKSTOFFE

Voraussetzung zum Erreichen der für die verschiedenen Dauermagnetmaterialien in Tab. 1 bzw. 2 angegebenen typischen Kennwerte ist eine vollständige Aufmagnetisierung. Die dafür notwendigen Mindestfeldstärken des inneren Magnetisierungsfeldes H_{mag} ergeben sich aus dem Aufmagnetisierungsverhalten der jeweiligen Werkstoffe. Sie sind in Tab. 4, Seite 19 und Abb. 8, Seite 50 angegeben. Zum Erreichen des inneren Magnetisierungsfeldes H_{mag} muss das von außen anzulegende Feld H_{ext} um den Betrag des durch den Arbeitspunkt bestimmten entmagnetisierenden Feldes H_a erhöht werden (zusätzlich ist darauf zu achten, dass das Feld zum Aufmagnetisieren lang genug anliegt, damit entmagnetisierende Wirbelstromeinflüsse vermieden werden):

$$|H_{\text{ext}}| = |H_{\text{mag}}| + |H_a|$$

Aufgrund der hohen Koerzitivfeldstärken von VACODYM und VACOMAX können die Magnete auch außerhalb von Systemen magnetisiert werden. Dadurch wird zwar die Handhabung der Magnete und die Montage der Systeme erschwert, das Magnetisieren jedoch wesentlich erleichtert. Bei den niedrigkoerzitiven Sorten VACODYM 510, 722/745 und auch bei VACOMAX 240 ist jedoch darauf zu achten, dass der Arbeitspunkt des frei gescherten Magneten ausreichend oberhalb des „Knies“ der B(H)-Entmagnetisierungskurve liegt (vgl. Kapitel Technische Grundlagen und Begriffe, Seite 69).

Sollen Magnete aus VACODYM und VACOMAX im System aufmagnetisiert werden, empfehlen wir gegebenenfalls Rücksprache mit unseren Fachleuten.

Magnete aus VACODYM und besonders VACOMAX lassen sich nur in sehr hohen Magnetfeldern (> ca. 8.000 kA/m) vollständig ummagnetisieren.

ENTMAGNETISIERUNGSKURVEN VON VACODYM UND VACOMAX IN ABHÄNGIGKEIT DER AUFMAGNETISIERUNGSFELDSTÄRKE H_{mag}

Das Aufmagnetisierungsverhalten von VACODYM und VACOMAX vom Typ $SmCo_5$ (Abb. 8a und 8b) beruht auf dem so genannten Nukleationsmechanismus. Dieses leichte Aufmag-

netisieren ist nur aus dem thermisch entmagnetisierten Zustand möglich. Für VACOMAX vom Typ Sm_2Co_{17} ist der Pinningmechanismus charakteristisch (Abb. 8c und 8d). Die im Vergleich zu VACOMAX 225 besonders leichte Magnetisierbarkeit von VACOMAX 240 wird durch eine spezielle Wärmebehandlung erreicht.

Abb. 8a

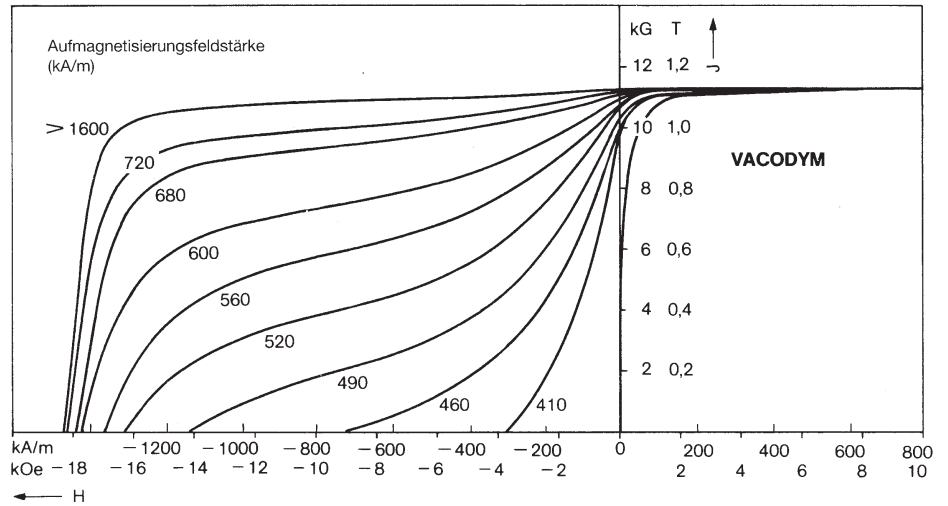


Abb. 8b

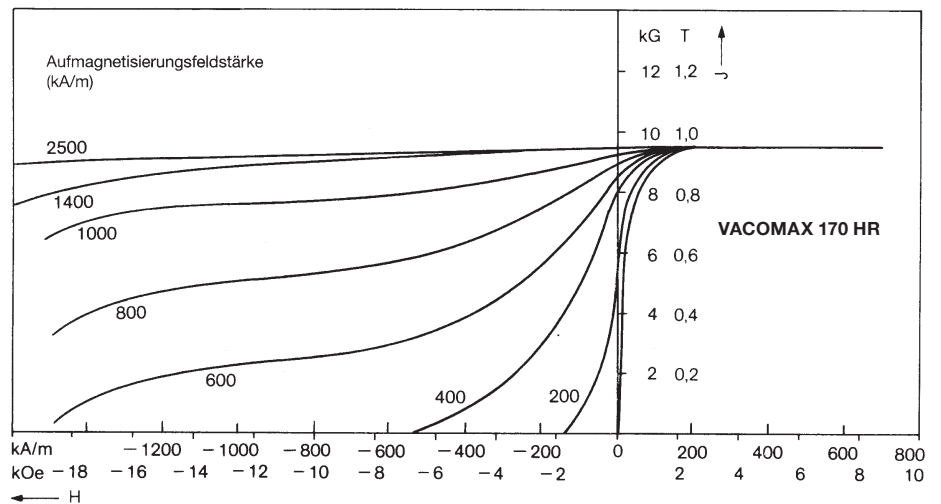


Abb. 8c

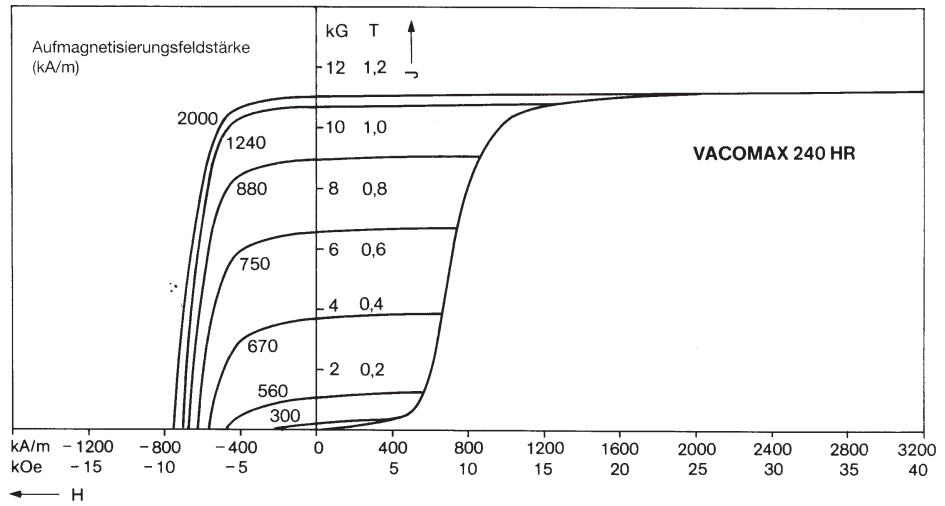
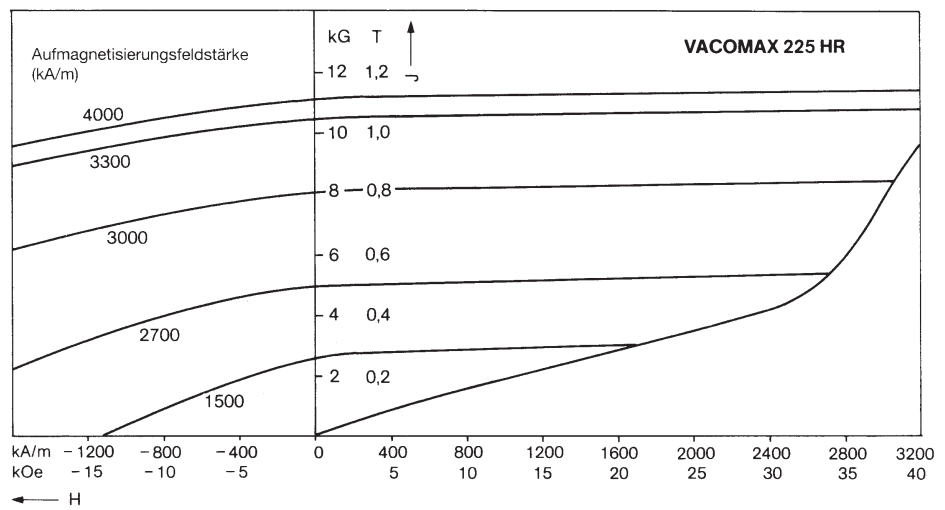


Abb. 8d



6. BEGRENZUNG VON IRREVERSIBLEN VERLUSTEN DES MAGNETISCHEN MOMENTS (H_{D5} -WERTE)

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 in der Vergangenheit zwei Methoden angewandt worden:

- 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. 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.

Die Normungsgremien haben sich deshalb entschlossen, die irreversiblen Verluste für NdFeB-Magnete auf eine alternative Weise zu messen und in die Norm IEC 60404-8-1 Ed. 3 einzuarbeiten. Die VACUUMSCHMELZE schließt sich dieser neuen Definition für ihre VACODYM-Magnete an.

Die Messung beruht auf der Bestimmung der $J(H)$ -Kurve mit einem Hysteresegraphen (s. Abb. 9). 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.

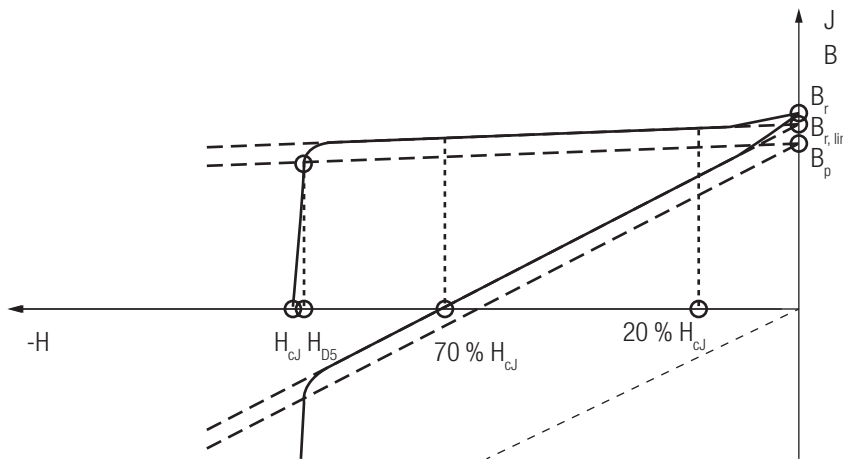


Abb. 9: $B(H)$ und $J(H)$ Entmagnetisierungskurven mit H_{D5} -Auswertung

7. KORROSIONSVERHALTEN, OBERFLÄCHENSCHUTZ UND BESCHICHTUNGEN

7.1 KORROSIONSVERHALTEN

Selten-Erd-Elemente (SE) werden aufgrund ihres stark negativen elektrochemischen Standardpotenzials ($E^0 = -2,2$ bis $-2,5$ 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 und Selten-Erd-Hydroxid. Der dabei freigesetzte Wasserstoff kann dann mit freiem SE-Metall unter Bildung von SE-Metallhydriden reagieren.

Durch Zulegieren ausreichender Mengen von edleren Elementen wie z.B. Kobalt kann die Reaktion mit Wasserdampf nahezu unterdrückt werden. Die Reaktionsgeschwindigkeit wird hierbei vernachlässigbar.

Dies ist der Grund, weshalb VACOMAX (SmCo_5 bzw. $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) bei Auslagerung unter hoher Luftfeuchtigkeit (z.B. $> 80\%$ rel. Feuchte) und erhöhter Temperatur (z.B. $> 80^\circ\text{C}$) lediglich eine leichte Anlauffarbe an der Oberfläche bekommt. Ein signifikanter Abtrag von Korrosionsprodukten ist auch nach langer Beanspruchung (z.B. > 1000 h) nicht messbar.

Andere Verhältnisse liegen im Allgemeinen bei Magneten aus NdFeB vor. Die einzelnen Magnetkörner werden von der Nd-reichen Phase zusammengehalten und fixiert. Diese Phase macht bis zu 5% des Gesamtvolumens des Werkstoffes aus und verhält sich bei ungeschützten Magneten chemisch ähnlich wie reines Neodym.

Als Folge davon setzt bei erhöhter Luftfeuchte und Temperatur (z.B. im HAST-Test – Highly Accelerated Stress Test nach IEC-Norm 68-2-66 bei 130°C / 95% Feuchte und 2,6 bar Druck) ein intergranularer Zerfall ein (vgl. Abb. 10), der zu Volumenabträgen durch Korrosionsprodukte (z.B. Nd-Hydroxid) sowie Magnetstaub (lose NdFeB-Körner) führt. Wie man diesen Werkstoff bei Auftreten von korrosiven Einsatzbedingungen wirksam schützen kann, ist auf den Seiten 57 ff. beschrieben.

Bei den VACODYM-Werkstoffen 6xx, 8xx und 9xx, wird diese Art der Korrosion vernachlässigbar.

Durch gezieltes Zulegieren geeigneter Metalle (u.a. Kobalt) zur Nd-reichen Phase wurde deren Korrosionsverhalten nachhaltig verbessert und die intergranulare Korrosion im feuchtwarmen Klima systematisch minimiert. Solche VACODYM-Legierungen ähneln in ihrem Korrosionsverhalten

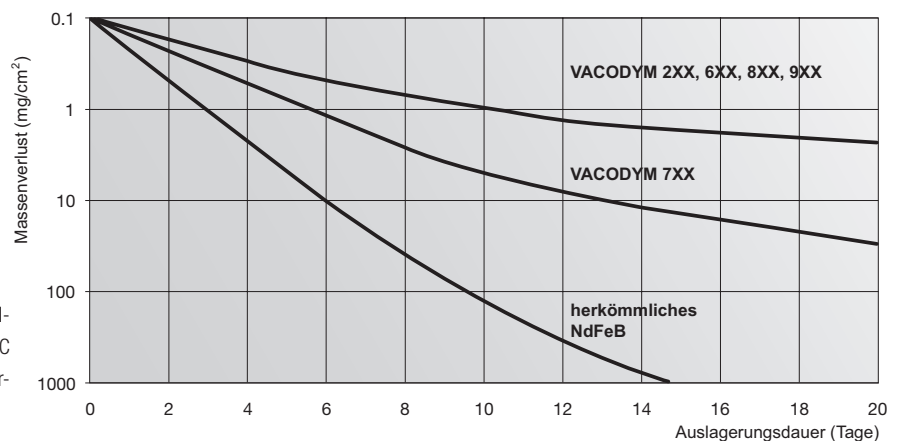


Abb. 10
Massenverlust von unbeschichteten VACODYM-Magneten im HAST-Test in Anlehnung an IEC 68-2-66 (130°C ; 95% rel. Feuchte, Wasserdampf 2,6 bar)

reinen Eisenwerkstoffen (Stahl). Beim HAST-Test findet man auch nach mehreren Wochen der Beanspruchung kaum einen messbaren Abtrag. An der Werkstoffoberfläche tritt lediglich eine grauschwarze Verfärbung ein.

Im Fall von kondensierter Feuchte beginnen alle VACODYM-Werkstoffe, ähnlich wie Eisenteile, allmählich zu rosten (Rotrost). Bei den entstehenden Korrosionsprodukten handelt es sich in erster Linie um unmagnetische Metalloxide bzw. Hydroxide. Im Fall des Auftretens von regelmäßiger Betauung (z.B. Schwitzwasser) bzw. beim Einsatz in Wasser oder anderen korrosiven Medien wie z.B. Säuren, Laugen, Salzen, Kühlschmiermitteln oder Schadgasen wird deshalb auch hier eine Beschichtung empfohlen.

Bei VACODYM reicht bereits die Einwirkung hoher Luftfeuchtigkeit, Betauung oder Handschweiß aus, um einen korrosiven Angriff einzuleiten. Wir empfehlen deshalb, VACODYM-Magnete grundsätzlich mit geeigneten Handschuhen anzufassen.

7.2 KURZZEITKORROSIONSSCHUTZ UND OBERFLÄCHENPASSIVIERUNG

Für den Kurzzeitschutz unbeschichteter Magnete zum Zwecke des Transports oder der Lagerung haben wir Passivierverfahren entwickelt, die unsere SE-Dauermagnetwerkstoffe, besonders das leichter korrodierende VACODYM, wirksam gegen Umwelteinflüsse, wie z.B. vorübergehend erhöhte Luftfeuchtigkeit, schützen. Unsere Magnete können mit diesem standardmäßig aufgetragenen Schutz unter normalen Umgebungsbedingungen gelagert werden, sofern Betauung ausgeschlossen wird.

Bei der Passivierung bildet sich eine sehr dünne Nd/Fe-Phosphatschicht auf der Werkstückoberfläche.

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

Die Schichtstärke der Phosphatschichten liegt im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Infolge von geringfügigen Schichtschwankungen und je nach Lichteinfall erscheint die Oberfläche in verschiedenen Farbtönen. Das normale Erscheinungsbild der Magnete reicht von hellgelb bis bräunlich über blau irisierend bis grau. Es handelt sich bei diesen Farbschattierungen keinesfalls um Korrosion (Rost), sondern um die Eigenfarbe der Phosphatschichten.

7.3 OBERFLÄCHENSCHUTZ

Aufgrund ihrer geringen Schichtstärke bietet die Phosphatschicht in einer Reihe von Anwendungen keinen sicheren 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 Schichtstärke 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 oder eine dichte Kapselung der Magnete, z.B. mit einer Edelstahlumhausung sowie die Beschichtung der fertigen Magnetsysteme mit Korrosionsschutzschichten, z.B. Lacken.

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. Systeme 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.

7.4 BESCHICHTUNGSARTEN

Die Beschichtungen lassen sich in metallische und organische Beschichtungen untergliedern. Daneben können für spezielle Anforderungen auf Anfrage Doppelbeschichtungen Metall/Metall, Metall/Lack sowie eine Reihe von Sonderbeschichtungen angeboten werden.

METALLISCHE BESCHICHTUNGEN

Beim Aufbringen metallischer Schichten werden in der Regel galvanische Verfahren eingesetzt. Neben unseren Standardbeschichtungen Nickel und Zinn bieten wir auf Wunsch zusätzlich die Doppelbeschichtung Nickel + Zinn an. Daneben ist auch eine Beschichtung mit IVD (Ion Vapour Deposition)-Aluminium möglich (siehe Seite 60 Sonderbeschichtungen).

Bei der Auswahl metallischer Beschichtungen ist unbedingt auf eine mögliche galvanische Elementbildung im fertigen System zu achten, sofern Betauung nicht ausgeschlossen werden kann.

Weiterhin wird bei allen galvanischen Beschichtungsverfahren in einer Nebenreaktion zur Metallabscheidung eine kleine Menge Wasserstoff mit abgeschieden. Dieser Wasserstoff wird vom Magnetmaterial an der Oberfläche aufgenommen und kann bei NdFeB-Legierungen geometrieabhängig zu irreversiblen Verlusten führen.

Als ungünstig sind in diesem Zusammenhang Kleinstteile (Gewicht < 0,5 g), dünnwandige Ringe und sehr dünne Magnete (Dicke < 1,5 mm) zu bewerten. Hier sind andere Beschichtungsverfahren, wie z.B. die Sprühlackierung der galvanischen Abscheidung vorzuziehen.

ORGANISCHE BESCHICHTUNGEN

Hier bieten wir verschiedene Sprühlackierungen mit hervorragenden Korrosionsschutzeigenschaften an. Insbesondere sind hier die von uns neu entwickelten VACCOAT-Epoxidharzbeschichtungen als kostengünstige Alternativen zu metallischen Beschichtungen zu nennen.

Dies gilt insbesondere für große Magnete ab ca. 25 g Gewicht. Diese müssen bei den metallischen Beschichtungsverfahren in der Regel als Gestellware behandelt werden. Hier bieten die Lackierverfahren signifikante Vorteile, sowohl von der Kostenseite her als auch im Hinblick auf die Beschichtungsqualität und die Standzeiten in Korrosionstests.

7.5 BESCHREIBUNG DER BESCHICHTUNGEN

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

Die VAC führt alle galvanischen Beschichtungen sowie die Sprühlackierungen im eigenen Hause durch. Die beschriebenen Eigenschaften werden nur im sorgfältig aufeinander abgestimmten System von Magnetgefüge, dessen mechanischer Bearbeitung sowie Reinigung und Beschichtung erzielt. Die TiN- und IVD-Aluminiumbeschichtungen werden über Unterlieferanten bereitgestellt, die von VAC sorgfältig ausgewählt und qualifiziert wurden. Durch geeignete Qualitätssicherungsmaßnahmen wird ein gleichbleibend hohes Qualitätsniveau bei der Serienfertigung erreicht.

Alle anderen Beschichtungen werden im Hause VAC mit Hilfe modernster Automatisierungstechnik kostengünstig und mit hoher Reproduzierbarkeit und Qualität aufgebracht.

EPOXYSPRÜHLACKIERUNG VACCOAT

Diese im eigenen Hause entwickelte Beschichtung setzt neue 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 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 Bleistifthärte von mindestens 4H auf und ist bis ca. 200°C thermisch belastbar. Es können in einem Arbeitsgang Schichten zwischen $5 \mu\text{m}$ und $40 \mu\text{m}$ von hoher optischer Güte erzeugt werden. Die Farbe der Lackierung ist

einstellbar (Standardfarbe: Schwarz). Die Beschichtung ist abriebfest und weist ein sehr gutes elektrisches Isolationsverhalten auf. Die Schichten werden entweder automatisch im Durchlauf oder im Schüttgutverfahren auf die Magnete aufgebracht.

Speziell für kleine Magnete ($< 10 \text{ g}$), die im Schüttgutverfahren beschichtet werden, wurde VACCOAT weiterentwickelt und mit VACCOAT 20021 eine im Hinblick auf Korrosionsschutz und Produktivität optimierte Variante geschaffen.

Die jüngste Generation der VACCOAT-Reihe, VACCOAT 30033, wurde zur Erzielung von höchstem Korrosionsschutz für SE-Magnete entwickelt. VACODYM-Magnete, die mit dieser Einbrennlackierung geschützt sind, erzielen sowohl im Salzsprühtest nach DIN EN ISO 9227 als auch im Autoklaventest bei 130°C / 100 % Feuchte / 2,7 bar Auslagerungszeiten von mehr als 1.000 Stunden, ohne dass Korrosion eintritt. Mit den bisher eingesetzten Lackbeschichtungen oder mit metallischen Schutzschichten, wie galvanisch Nickel oder Zinn, ist die gleichzeitige Einhaltung dieser langen Standzeiten in beiden Tests nicht möglich. Die anderen Eigenschaften (mechanische Kennwerte, Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit) sind vergleichbar zu VACCOAT 20011. Diese Lackvariante ist nur im Durchlaufverfahren und damit nur für Magnete mit einem Gewicht von $> 5 \text{ g}$ verfügbar.

ALUMINIUMSPRÜHLACKIERUNG VACCOAT 10047

Die mit Aluminiumflakes gefüllte Einbrennlackierung weist ähnlich gute Klima- und Salzsprühbeständigkeit wie die Epoxysprühlacke VACCOAT 200XX auf. Schon ab $5 \mu\text{m}$ Schichtdicke werden Langzeitautoklaven- und Salznebeltests problemlos bestanden.

Die Beschichtung zeichnet sich im Vergleich zu herkömmlichen Lackierungen durch einen extrem guten Kantenschutz aus. Die Lackmatrix ist für Anwendungen mit Einsatztemperaturen bis 180°C geeignet und weist eine sehr gute Chemikalienbeständigkeit auf.

Aufgrund der hohen Härte der Lackierung (typisch 6-8 H Bleistifhärte) 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 aufgebraute Zinnschichten sind ein guter Korrosionsschutz gegen Einflüsse der Atmosphäre, Feuchtigkeit sowie von schwachen Säuren und Laugen. Die bei VAC aufgebrauchten Zinnschichten sind dicht und frei von durchgängigen Poren. Der typische Schichtdickenbereich bei Magneten beträgt 15 - 30 µm. Die Zinnschichten sind in ihrem äußeren Erscheinungsbild silberweiß und schwach glänzend.

Im Temperaturbereich von -40 °C bis zum Schmelzpunkt +232 °C werden keine Phasenumwandlungen beobachtet. Durch den bei VAC speziell für SE-Magnete entwickelten Abscheideprozess kommt es zu keiner Wasserstoffschädigung der Magnetoberfläche während der Beschichtung.

Die Beschichtung kann für Kleinteile kostengünstig in der Trommel vorgenommen werden. Für große Teile wird gestellgalvanisiert, 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. Mechanischer Stress erzeugt keine Abplatzer, sondern führt lediglich zu einer Verformung der Zinnschicht, so dass der Schutz des Magnetwerkstoffes weiterhin gewährleistet ist.

Zinnschichten sind rückstandsfrei reinigbar und bilden für viele Klebstoffe einen idealen Haftgrund.

GALVANISCH-NICKEL

Galvanisch aufgebraute Nickelschichten können alternativ zu Zinn oder als Doppelbeschichtung mit Zinn aufgebracht werden.

Auf VACODYM ist ihre Schutzwirkung bei vergleichbarer Schichtdicke der Verzinnung überlegen. Die von uns empfohlene Mindestschichtdicke für Korrosionsschutz beträgt bei der Vernickelung 10 µm im Vergleich zu 15 µm bei der Verzinnung.

Galvanische Nickelschichten sind hart, abriebfest und können problemlos ohne Rückstände gereinigt werden. Deshalb haben sich diese Schichten heute insbesondere für Reinraum-anwendungen durchgesetzt.

VAC verfügt über ein spezielles Vernickelungsverfahren, das optisch ansprechende seidenmatte Schichten liefert.

Galvanische Nickelschichten verhalten sich weichmagnetisch und müssen bei ungünstigen geometrischen Verhältnissen für die Auslegung von Magnetsystemen berücksichtigt werden.



Kantenbedeckung mit VACCOAT im Schlichtbild

EIGENSCHAFTSPROFIL VERSCHIEDENER BESCHICHTUNGEN

Tabelle 5 zeigt einen Eigenschaftsvergleich der wichtigsten Beschichtungen und soll als Leitfaden bei der Auswahl des Oberflächenschutzes für eine bestimmte Anwendung dienen. Aufgeführt ist jeweils die Mindestschichtdicke der Beschichtungsarten, sie 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 5: OBERFLÄCHENBESCHICHTUNGEN

| Oberfläche | Verfahren | Mindestschichtdicke für Korrosionsschutz | Farbe | Härte | Beständigkeit | Temperatureinsatz | typische Anwendungsbeispiele |
|--|---------------------|--|--------------------------|----------------------|---|-------------------|--|
| Epoxy-Sprühlack VACCOAT 20011/20021 | Lackier- automat | > 10 µm | schwarz | > 4H ¹⁾ | Feuchtklima, Sprühtest, Schadgastest, Lösemittel | < 200 °C | segmentierte Magnetsysteme, Elektromotore, Linearmotore, Automobil |
| Epoxy-Sprühlack VACCOAT 30033 | Lackier- automat | > 10 µm | grün | > 4H ¹⁾ | Feuchtklima, Salzsprühtest, Schadgastest, Lösemittel | < 200 °C | Anwendungen mit höchstem Korrosionsschutz |
| Aluminium Sprühlack VACCOAT 10047 | Lackier- automat | > 5 µm | gelb halb- glänzend | > 4H ¹⁾ | Feuchtklima, Sprühtest, Schadgastest, Lösemittel | < 180 °C | Elektromotore, Generatoren, Sensorik, Linearmotore, Automobil |
| Zinn (Sn) | galvanisch | > 15 µm | silber glänzend | HV 10 ²⁾ | Feuchtklima, Lösemittel | < 160 °C | Elektromotore, Sensorik, Maschinenbau |
| Nickel (Ni) | galvanisch | > 10 µm | silber halb- glänzend | HV 350 ²⁾ | Feuchtklima, Lösemittel, Kühlschmier- stoffe | < 200 °C | Reinraum, Kleinmotore, Linearmotore, UHV-Undulatoren |

¹⁾ Bleistifthärte

²⁾ Vickershärte (Richtwerte)

7.6 SONDERBESCHICHTUNGEN

Neben unseren Standardbeschichtungen bieten wir für spezielle Anwendungsfälle eine Reihe von Sonderbeschichtungen an, die im Hause VAC oder durch ausgewählte Lieferanten aufgebracht werden.

IVD (= **I**on **V**apour **D**eposition) -Aluminiumschichten schützen unsere Dauermagnete aus VACODYM und VACOMAX wirkungsvoll vor Korrosion. Aufgrund der kathodischen Schutzwirkung stellen IVD-Aluminiumschichten einen guten Korrosionsschutz in Verbindung mit kondensierter wässriger Phase und insbesondere in Gegenwart von Salzlösungen dar. Speziell für Luftfahrtanwendungen hat sich diese Beschichtungsvariante bewährt. Da die Beschichtung in einem trockenen Verfahren aufgebracht wird, ist eine Wasserstoffschädigung der Magnete ausgeschlossen. Voraussetzungen sind eine Mindestmenge an zu beschichtenden Magneten sowie eine geeignete Geometrie der Teile. IVD-Aluminiumschichten werden unter anderem erfolgreich für Magnete in Strahlführungssystemen (Wiggler, Undulatoren) unter Ultrahochvakuumbedingungen (UHV) verwendet.

Für UHV-Anwendungen, bei denen auf kürzeste Abpumpzeiten Wert gelegt wird, ist allerdings die Titanitridbeschichtung (TiN) dem IVD-Aluminium vorzuziehen. Diese Beschichtung wird in dünner Schicht (2 - 6 µm) im Sputterverfahren auf den Magneten abgeschieden. Der speziell für unsere VACODYM und VACOMAX Magnete sowie für weichmagnetische Polplatten aus VACOFLEX entwickelte Prozess führt zu festhaftenden, dichten Schutzschichten mit hoher Verschleißfestigkeit. Auf Wunsch reinigen und verpacken wir die Teile in einem zusätzlichen Prozess UHV-tauglich.

Eine weitere Spezialbeschichtung, speziell für VACOMAX-Magnete, stellt die galvanisch aufgebrachte Doppelschicht Nickel + Gold dar. Diese Oberfläche wird in der Regel für Anwendungen in der Medizintechnik verwendet und ist sterilisierfähig. Die Beschichtung steht für Kleinteile (Trommelware) und kleine Losgrößen zur Verfügung.

Daneben sind für extreme Korrosionsschutzanforderungen auch Doppelschichten, wie Nickel + Zinn oder Nickel bzw. Zinn + VACCOAT möglich.

8. LIEFERFORMEN

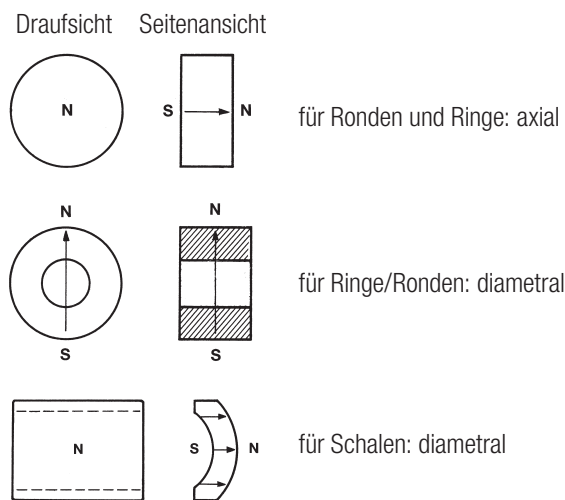
8.1 MAGNETISIERUNGSARTEN

Magnete aus VACODYM und VACOMAX können sowohl im magnetisierten als auch im nicht magnetisierten Zustand geliefert werden. Eine Kennzeichnung der Pole am Einzelmagneten ist üblicherweise nicht vorgesehen.

Aufgrund der magnetischen Anisotropie von VACODYM und VACOMAX erfolgt die Magnetisierung entlang der durch den Herstellungsprozess geprägten Vorzugsrichtung. Die gebräuchlichsten Polanordnungen sind nachfolgend dargestellt.

Zu allen Fragen der Magnetisierungstechnik stehen Ihnen unsere Experten mit umfangreichem Know-how zur Verfügung. Für die Auslieferung magnetisierter Teile haben wir verschiedene Verpackungsmethoden entwickelt, die ggf. unter Berücksichtigung der strengen IATA-Regeln für den Transport per Luftfracht kundenspezifisch modifiziert werden können. Zur rationellen Weiterverarbeitung beim Kunden ist es empfehlenswert, die Verpackung gemeinsam abzustimmen.

Polanordnungen:



8.2 ABMESSUNGEN UND MASSTOLERANZEN

Die Polflächen im Werkzeug gepresster Sintermagnete aus VACODYM oder VACOMAX erfordern in der Regel eine Bearbeitung durch Schleifen. Die Toleranz für geschliffene Maße beträgt i. Allg. $\pm 0,05$ mm; fallweise sind Werte bis $\pm 0,02$ mm möglich.

Die Maße senkrecht zur Pressrichtung sind vom Presswerkzeug weitgehend vorgegeben, so dass diese Flächen im Allgemeinen unbearbeitet bleiben (wie gesintert). Typische „Presstoleranzen“ solcher Seitenmaße sind:

| Toleranz (mm)* | Nennmaß senkrecht zur Pressrichtung (mm) |
|----------------|--|
| bis 7 | $\pm 0,10 \dots \pm 0,20$ |
| 7-15 | $\pm 0,15 \dots \pm 0,30$ |
| 15-25 | $\pm 0,25 \dots \pm 0,40$ |
| 25-40 | $\pm 0,30 \dots \pm 0,60$ |
| 40-60 | $\pm 0,45 \dots \pm 0,90$ |
| 60-100 | $\pm 0,80 \dots \pm 1,50$ |
| 100-150 | $\pm 1,50 \dots \pm 2,50$ |

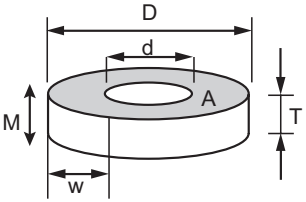
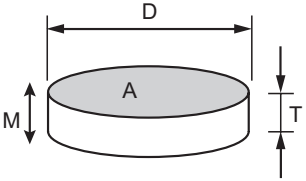
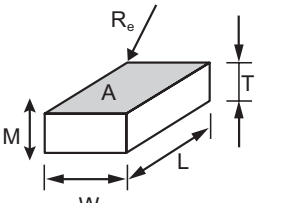
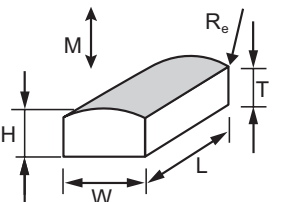
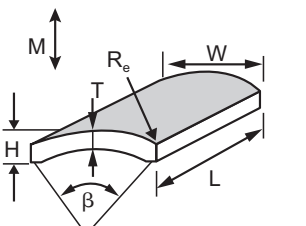
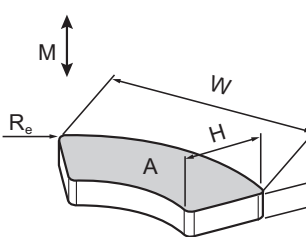
* genauere Angaben auf Anfrage

Sofern diese Flächen bearbeitet werden müssen, können üblicherweise Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768 mK in Verbindung mit dem Tolerierungsgrundsatz nach DIN ISO 8015 eingehalten werden. Für Formteile mit komplexer Geometrie wird im Normalfall eine maximale und eine minimale Hüllkurve angegeben, in der die Kontur des Pressteils liegt. Bei aus Blöcken geschnittenen Teilen (TP- bzw. HR-Qualität) liegen die Längentoleranzen bei $\pm 0,1$ mm. Nach Absprache sind kleinere Längentoleranzen durch schleifende Bearbeitung möglich. Sofern Maße nicht toleriert sind, liefern wir typischerweise nach DIN ISO 2768 mK.

NETSHAPE-TEILE

Durch Verzicht auf Schleifbearbeitung können besonders kostengünstige Magnete bis zu einer Polfläche von etwa 6 cm^2 gepresst werden. Solche Netshape-Magnete weisen senkrecht zur Pressrichtung die nebenstehenden Toleranzen auf. In Pressrichtung werden durch spezielle Press- und Sinterverfahren Dickentoleranzen von typischerweise $\pm 0,2$ mm ohne nachfolgenden Schleifprozess eingehalten. Bevorzugte Formen sind Quader und Schalen mit typischen Dicken im Bereich von 2,2 bis 8,0 mm. Unsere Fachleute beraten gern bei der Auslegung der Magnetgeometrie und den Toleranzen für Netshape-Magnete.

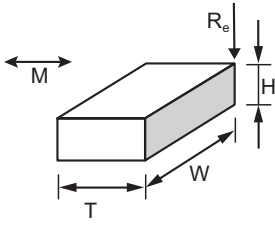
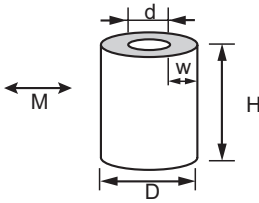
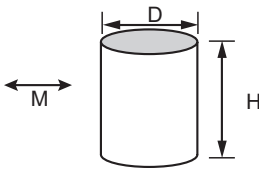
**ABMESSUNGEN VON WERKZEUGGEPRESSTEN VACODYM AP-MAGNETEN
(AXIALFELDGEPRESST)
RICHTLINIEN FÜR WIRTSCHAFTLICHE MAGNETGEOMETRIEN**

| Form | Art | Skizze | Abmessung wirtschaftlich | Abmessung möglich | Bemerkung wirtschaftlich |
|----------|-----|---|---|---|----------------------------------|
| Ring | AP |  | $D \leq 120 \text{ mm}$ $d \geq 3 \text{ mm}$ $(D-d)/2 = w \geq 3 \text{ mm}$ $d/D \leq 0,6$ $D/10 \leq T \leq D/2$ $A < 9.500 \text{ mm}^2$ | $D \leq 180 \text{ mm}$ $1 \text{ mm} \leq T \leq 70 \text{ mm}$ $A < 15.000 \text{ mm}^2$ | nur Dicke T geschliffen |
| Ronde | AP |  | $D \leq 100 \text{ mm}$ $D/10 \leq T \leq D/2$ | $D \leq 140 \text{ mm}$ $1 \text{ mm} \leq T \leq 70 \text{ mm}$ | nur Dicke T geschliffen |
| Quader | AP |  | $L \leq 120 \text{ mm}$ $L \times W \leq 9.500 \text{ mm}^2$ $T \leq 55 \text{ mm}$ $T \geq 0,15 \sqrt{L \times W}$ $L/W \leq 5$ $0,5 \leq R_e \leq 5,0 \text{ mm}$ | $L \leq 150 \text{ mm}$ $L \times W \leq 15.000 \text{ mm}^2$ $1 \text{ mm} \leq T \leq 70 \text{ mm}$ | nur Dicke T geschliffen |
| Brotlaib | AP |  | $L \leq 120 \text{ mm}$ $W \leq 50 \text{ mm}$ $T \geq 0,6 H$ $2 \text{ mm} \leq H \leq 20 \text{ mm}$ $0,5 \leq L/W \leq 5$ $0,5 \leq R_e \leq 5,0 \text{ mm}$ | $L \leq 150 \text{ mm}$ $2 \text{ mm} \leq H \leq 55 \text{ mm}$ | Dicke T und Breite W geschliffen |
| Schale | AP |  | $L \leq 120 \text{ mm}$ $W \leq 50 \text{ mm}$ $2 \text{ mm} \leq T \leq 20 \text{ mm}$ $\beta \leq 80^\circ$ $0,5 \leq L/W \leq 3$ $0,5 \leq R_e \leq 5,0 \text{ mm}$ | $L \leq 150 \text{ mm}$ $1,5 \text{ mm} \leq T \leq 50 \text{ mm}$ $\beta \leq 150^\circ$ $W \leq 70 \text{ mm}$ | Dicke T und Breite W geschliffen |
| Formteil | AP |  | $W \leq 45 \text{ mm}$ $H \leq 35 \text{ mm}$ $A \leq 1500 \text{ mm}^2$ $W/H \leq 3$ $1,5 \text{ mm} \leq T \leq 30 \text{ mm}$ $T \geq 0,1 \sqrt{A}$ $0,5 \leq R_e \leq 5,0 \text{ mm}$ | $H, W \leq 150 \text{ mm}$ $A \leq 15.000 \text{ mm}^2$ $1 \text{ mm} \leq T \leq 70 \text{ mm}$ | nur Dicke T geschliffen |

R_e : Eckenradius vorgegeben durch Presswerkzeug in Pressrichtung

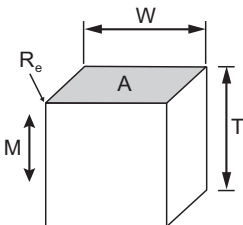
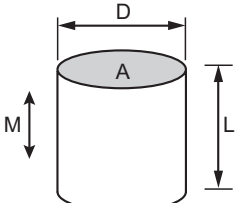
**ABMESSUNGEN VON WERKZEUGGEPRESSTEN VACODYM TP-MAGNETEN
(QUERFELDGEPRESST)**

RICHTLINIEN FÜR WIRTSCHAFTLICHE MAGNETGEOMETRIEN

| Form | Art | Skizze | Abmessung wirtschaftlich | Abmessung möglich | Bemerkung wirtschaftlich |
|-------------------|-----|--|--|--|--------------------------|
| Quader | TP |  | $W \leq 70 \text{ mm}$ $2 \text{ mm} \leq T \leq 100 \text{ mm}$ $10 \text{ mm} \leq H \leq 55 \text{ mm}$ $W/H \leq 2,5$ $R_e \leq 0,5 \text{ mm}$ | $W \leq 120 \text{ mm}$ $1 \text{ mm} \leq T \leq 140 \text{ mm}$ $T \times W \leq 13.000 \text{ mm}^2$ $H \leq 80 \text{ mm}$ | nur Dicke geschliffen |
| Ring (diametral) | TP |  | $8 \text{ mm} \leq D \leq 70 \text{ mm}$ $d \geq 3 \text{ mm}$ $(D-d)/2 = w \geq 2 \text{ mm}$ $0,1 \leq d/D \leq 0,65$ $3 \text{ mm} \leq H \leq 55 \text{ mm}$ $H \leq 5 w$ | $6 \text{ mm} \leq D \leq 120 \text{ mm}$ $d \geq 1 \text{ mm}$ $w \geq 1,5 \text{ mm}$ $0,1 \leq d/D \leq 0,8$ $2 \text{ mm} \leq H \leq 80 \text{ mm}$ $H \leq 8 w$ | nur Dicke geschliffen |
| Ronde (diametral) | TP |  | $5 \text{ mm} \leq D \leq 70 \text{ mm}$ $3 \text{ mm} \leq H \leq 55 \text{ mm}$ $H \geq D/4$ | $5 \text{ mm} \leq D \leq 120 \text{ mm}$ $2 \text{ mm} \leq H \leq 80 \text{ mm}$ | nur Dicke geschliffen |

**ABMESSUNGEN VON ISOSTATISCH GEPRESSTEN VACODYM HR-MAGNETEN
(ROHMAGNETE, UNBEARBEITET)**

RICHTLINIEN FÜR WIRTSCHAFTLICHE MAGNETGEOMETRIEN

| Form | Art | Skizze | Abmessung wirtschaftlich | Abmessung möglich | Bemerkung wirtschaftlich |
|-------------|-----|---|---|---|---|
| Quader | HR |  | $W \leq 110 \text{ mm}$ $T \leq 250 \text{ mm}$ $A \leq 7.000 \text{ mm}^2$ | $W \leq 110 \text{ mm}$ $T \leq 800 \text{ mm}$ $A \leq 7.000 \text{ mm}^2$ | unbearbeitet mit Konturtoleranz $\varnothing 6 \text{ mm}$, R_e ca. 5 mm |
| Ronde, Stab | HR |  | $D \leq 70 \text{ mm}$ $L \leq 250 \text{ mm}$ | $D \leq 90 \text{ mm}$ $L \leq 800 \text{ mm}$ | unbearbeitet mit Konturtoleranz $\varnothing 6 \text{ mm}$ |

Analoge Formen und Abmessungen, mit leichten Einschränkungen, auch in VACOMAX (entsprechend der Magnetqualität) erhältlich.

9. KLEBEN VON SELTEN-ERD-DAUERMAGNETEN

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

- Statische und dynamische Beanspruchung der Klebung (Festigkeitsanforderungen)
- Thermische Belastung (Dauer/Kurzzeit/Temperaturwechsel) der Klebung
- Thermische Ausdehnungskoeffizienten der Klebpartner
- Größe der Klebefläche
- Korrosive Beanspruchung der Klebung (Klima- und Chemikalienbeständigkeit des Klebstoffes)
- Beschaffenheit der Oberflächen (Beschichtung, Rauigkeit etc.)
- Werkstoffpaarung bzgl. elektrochemischem Potenzial (Korrosion durch galvanische Elementbildung)
- Dicke des Klebespaltes

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

a) Säurehaltige Klebstoffe dürfen in Verbindung mit SE-Magneten, insbesondere VACODYM, nicht eingesetzt werden. Diese Produkte führen, unterstützt durch Feuchtigkeit, zu einer raschen 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 Gefügauflockungen an der Oberfläche des Sintermagneten kommen.

Unsere Dauermagnete werden klebefähig ausgeliefert. Die nach dem Reinigen aufgebrauchte 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. Speziell für schwierig klebbare Oberflächen, wie z.B. Galvanisch-Nickel, werden am Markt maßgeschneiderte Klebstoffe angeboten. 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 sind gerne bereit, unsere Kunden bei der Auswahl des richtigen Klebstoffes zu unterstützen.

An dieser Stelle möchten wir auf unsere Magnetsystemfertigung hinweisen. Hier stehen zusätzlich maßgeschneiderte, patentierte Klebverfahren und Klebstoffe zur Verfügung, die wir entwickelt, erprobt und qualifiziert haben. Weitere Informationen entnehmen Sie bitte unserer Broschüre „Magnetsysteme“.

10. INTEGRIERTES MANAGEMENTSYSTEM

Im Geschäftsjahr 2003 wurde die Dokumentation des Qualitäts-, des Umwelt- sowie des Arbeitssicherheits-Managementsystems in ein gemeinsames Qualitätsmanagementsystem integriert. Grundlage hierfür sind folgende Regelwerke in ihrer jeweils aktuellen Fassung:

- ISO 9001
- ISO/TS 16949
- ISO 14001
- OHSAS 18001
- DIN EN ISO/IEC 17025

10.1 QUALITÄTSMANAGEMENT

Qualität ist ein wesentlicher Gesichtspunkt unserer Unternehmenspolitik. Auf der Grundlage eines nach ISO 9001 und ISO/TS 16949 zertifizierten Qualitätsmanagementsystems legen wir größten Wert auf eine enge Zusammenarbeit aller Funktionsbereiche, um die hohe Qualität unserer Produkte und Dienstleistungen zuverlässig zu verwirklichen. Unser bereits 1994 eingeführtes Total Quality Management (TQM) wurde kontinuierlich weiter entwickelt und orientiert sich an Business Excellence-Modellen und den Unternehmenszielen.

Wichtigstes Ziel aller unserer Maßnahmen zum Qualitätsmanagement ist die Erfüllung aller Kundenerwartungen und eine hohe Kundenzufriedenheit, sowohl extern als auch intern. Zur weiteren Optimierung VAC-interner Prozesse – mit dem vorrangigen Ziel weiterer Kostenreduzierung – wurde im GJ 2002 die Six-Sigma-Methode in allen Unternehmensteilen eingeführt.

Durch die Festlegung und Einführung gezielter QM-Maßnahmen während der Produkt- und Prozessplanung, streng kontrollierte Rohmaterialbeschaffung und im Prozess integrierte Prüfabläufe – mittels statistischer Prozesskontrolle (SPC) – erzeugen wir die vom Kunden geforderte Produktqualität. Die Einhaltung entsprechender Prozessfähigkeiten (cpk-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 Qualitätssicherungs-Programme fest. Wir helfen, durch qualifizierte technische Beratung qualitätsgerechte, kostengünstige Produkte und Dienstleistungen zu konzipieren und zu realisieren und schließen auf Kundenwunsch auch Qualitätssicherungsvereinbarungen (QSV) 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. Seit dem Jahre 2006 ist die VACUUMSCHMELZE DAkkS-akkreditiert als Kalibrierlabor nach DIN EN ISO/IEC 17025 für die magnetische Flusssdichte.

10.2 TECHNISCHE LIEFERBEDINGUNGEN

Gesinterte Magnete aus SE-Legierungen sind wie die meisten anderen Dauermagnetwerkstoffe spröde. Obwohl VACODYM mechanisch stabiler ist als VACOMAX, kann auch bei diesem Werkstoff nicht ausgeschlossen werden, dass Magnete feine Haarrisse oder Kantenabbrüche aufweisen. Die magnetischen und mechanischen Eigenschaften der Teile werden dadurch nicht nennenswert beeinflusst.

Zur Prüfung und Festlegung der visuellen Beschaffenheit der Magnete hat sich bei Serienfertigung der Austausch von Grenzmustern bewährt. Falls keine besonderen Vereinbarungen mit unseren Kunden vorliegen, lassen wir bei unserer Qualitätsprüfung mechanische Oberflächenbeschädigungen (Abplatzer, Kanten- und Eckenabbrüche) bis zu einer Summe von max. 2% je Polfläche zu. Für Kleinmagnete, für Magnete, deren Polfläche die kleinste Teiloberfläche darstellt und für diametrale Ronden sind die zulässigen Abbrüche in Abstimmung mit dem Kunden oder anhand von Grenzmustern festzulegen. Feine Haarrisse werden bis zu einem Drittel der betroffenen Querschnittsfläche nicht beanstandet, soweit Einschränkungen der mechanischen Stabilität des Magneten hieraus nicht zu erwarten sind.

Unter normalen Fertigungsbedingungen ist nicht vermeidbar, dass an unbeschichteten und besonders an aufmagnetisierten Teilen geringfügige magnetische Staub- und Materialreste haften. Kann dies nicht akzeptiert werden, ist eine Beschichtung und/oder spezielle Verpackung der Magnete vorzusehen.

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. So wird z.B. bei Produkten für die Automobilindustrie zusätzlich ein Prozessfähigkeitswert von $cpk \geq 1,33$ für vereinbarte Merkmale vorgegeben.

Abnahmebedingungen, die spezielle magnetische Eigenschaften betreffen, setzen abgestimmte Prüfverfahren und Referenzmuster voraus. Insbesondere bei VACOMAX ist dazu Voraussetzung, dass die Teile aufmagnetisiert geliefert werden.


Bei Kleinstmagneten mit einer Kantenlänge unterhalb etwa 2 mm ist durch Oberflächeneffekte je nach Lage des Arbeitspunktes mit einer verminderten Magnetisierung zu rechnen. Bitte sprechen Sie gegebenenfalls dazu unsere Fachleute an.

10.3 UMWELT- UND ARBEITSSICHERHEITSMANAGEMENT

VAC fühlt sich der Schonung unserer Umwelt und dem sparsamen Umgang mit den natürlichen Ressourcen verpflichtet. Dies gilt für die Fertigungsprozesse ebenso wie für unsere Produkte. Bereits bei der Produktentwicklung werden die möglichen Folgelasten für unsere Umwelt bedacht. Es ist unser Bestreben, Umweltbelastungen – auch über geltende Vorschriften hinaus – zu vermeiden oder auf ein Minimum zu reduzieren. Unser Umweltmanagement stellt sicher, dass unsere Umweltpolitik entsprechend ISO 14001 wirkungsvoll umgesetzt wird. Die dazu notwendigen technischen und organisatorischen Verfahren werden regelmäßig überprüft und fortlaufend weiter entwickelt. Den Arbeits- und Gesundheitsschutz unserer Mitarbeiter und Partner auf Basis von OHSAS 18001 sehen wir ebenfalls als grundlegendes Ziel bei der Gestaltung unserer Produkte, Prozesse und Arbeitsplätze. Wir berücksichtigen dabei geltende Gesetze, Normen und Regelwerke sowie gesicherte arbeitsmedizinische und arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse.



ZERTIFIKAT



Hiermit wird bescheinigt, dass

VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG
 Grüner Weg 37
 63450 Hanau
 Deutschland


ein **Qualitätsmanagementsystem** eingeführt hat und anwendet.

Geltungsbereich:
 Entwicklung und Herstellung von Spezialwerkstoffen, insbesondere mit magnetischen Eigenschaften, und daraus weiter veredelten Produkten:
 - Halbzeug und Teile
 - Magnete Kerne und induktive Bauelemente
 - Seltenerd-Dauermagnete und Magnetsysteme

Durch ein Audit, dokumentiert in einem Bericht, wurde der Nachweis erbracht, dass dieses Qualitätsmanagementsystem die Forderungen der folgenden Technischen Spezifikation erfüllt:

ISO/TS 16949 : 2009
 (mit Produktentwicklung)

| | |
|----------------------------------|-------------|
| Zertifizierungsentscheidung | 2013-02-10 |
| Dieses Zertifikat ist gültig bis | 2016-02-09 |
| Zertifikat-Registrier-Nr. | 001153 TS09 |
| IATF-Nr. | 0156666 |
| Haupt-Zertifikat-Registrier-Nr. | 001153 TS09 |
| Frankfurt am Main | 2014-03-17 |



DQS GmbH
G. Blechschmidt
 Götz Blechschmidt
 Geschäftsführer

IATF Contract Office: DQS GmbH, August-Schanz-Straße 21, 60433 Frankfurt am Main 1 / 2

11. SICHERHEITSHINWEISE

Aufmagnetisierte Selten-Erd-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 Abstandhaltern 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 Anschlagen 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 weiter bearbeitet 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.

Weitergehende wichtige Informationen zum sicheren Umgang mit VACODYM- bzw. VACOMAX-Magneten erhalten Sie in unseren legierungsspezifischen Informationsblättern. Diese liegen unter dem folgenden Link bereit:

<http://www.vacuumschmelze.de/de/unternehmen/qualitaet/informationsblaetter-msds.html>

Sollten Sie zu den Informationsblättern noch Fragen haben, sprechen Sie uns bitte an. Kontaktdaten entnehmen Sie bitte der Rückseite dieser Firmenschrift.

12. ANHANG – TECHNISCHE GRUNDLAGEN UND BEGRIFFE

12.1 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. 11), 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. 11).

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 :

$$B_r \approx J_s$$

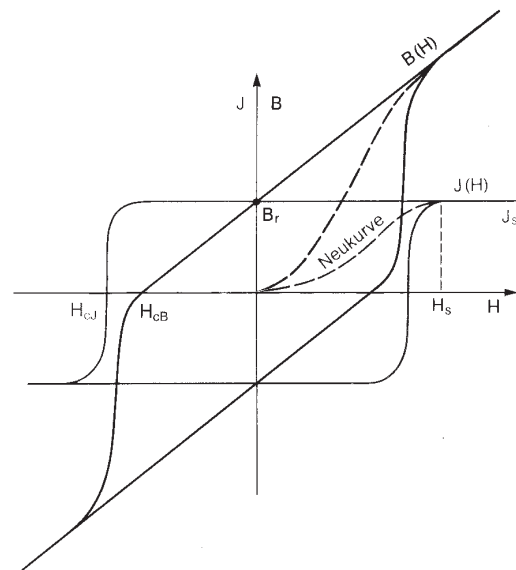


Abb. 11

12.2 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. 12). 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.

– 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 Luftspalllänge zu Magnetlänge ab. P ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Arbeits- oder Scherungsgeraden mit der $B(H)$ -Kurve (siehe Abb. 13).

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 (vgl. Abb. 13).

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_1 nur dann wieder erreicht, wenn P_2 im geradlinigen Teil der Entmagnetisierungskurve liegt.

Befindet sich P_2 jedoch, wie in Abb. 13 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.

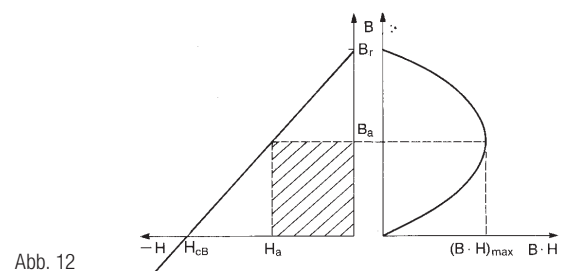


Abb. 12

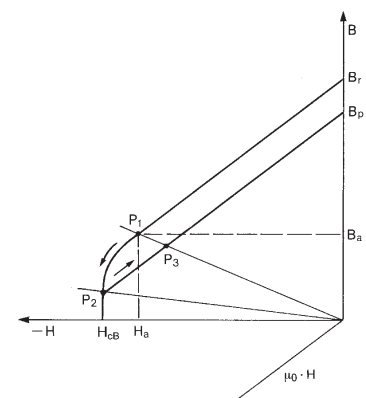


Abb. 13

12.3 TEMPERATUREINFLUSS

Die Entmagnetisierungskurven von Dauermagneten sind temperaturabhängig.

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

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

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

Eine Temperaturänderung bewirkt eine Verschiebung des Arbeitspunktes auf der Arbeitsgeraden (siehe Abb. 14). 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 Aufmagnetisieren rückgängig zu machen.

Um irreversible Änderungen der Induktion bei Temperaturänderungen zu vermeiden, muss sich der Arbeitspunkt im gesamten Temperaturbereich, 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 wieder hergestellt werden, wenn bei der Erwärmung keine Gefügeänderungen aufgetreten sind (s. dazu S. 48). Bei Magneten aus VACOMAX ist ein thermisches Entmagnetisieren dagegen nicht zulässig, da im Bereich der bei diesen Legierungen wesentlich höheren Curie-Temperaturen von über 700 °C Phasenumwandlungen auftreten, wodurch die Dauermagneteigenschaften irreversibel zerstört werden können.

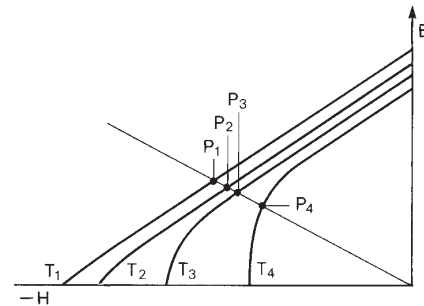


Abb. 14

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 Induktion | T (Tesla) | 1 T = 1 Vs/m ² = 10 kG (Kilogauss) |
| Polarisation J | T (Tesla) | s. Flussdichte B |
| Magnetische Feldstärke H | A/m | 1 A/cm = 0,4 π Oe ≈ 1,257 Oe (Oersted) |
| Energiedichte (BH) _{max} (Güteprodukt) | kJ/m ² | 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
TELEFON +49 6181 380
FAX +49 6181 382645
INFO@VACUUMSCHMELZE.COM
WWW.VACUUMSCHMELZE.COM

VAC SALES USA LLC

2935 DOLPHIN DRIVE
SUITE 102
ELIZABETHTOWN, KY 42701
TELEFON +1 270 769 1333
FAX +1 270 765 3118
INFO-USA@VACUUMSCHMELZE.COM

VACUUMSCHMELZE SINGAPORE PTE LTD

1 TAMPINES CENTRAL 5, #06-10/11
CPF TAMPINES BUILDING
SINGAPORE 529508
TELEFON +65 6391 2600
FAX +65 6391 2601
VACSINGAPORE@VACUUMSCHMELZE.COM

VACUUMSCHMELZE CHINA MAGNETICS

SHANGHAI SALES OFFICE
ROOM 06, 19F
ZHONGRONG HENGRUI INTERNATIONAL PLAZA
620 ZHANGYANG ROAD, PUDONG DISTRICT
SHANGHAI, PRC 200122
TELEFON +86 21 5831 9837
FAX +86 21 5831 9937
VAC_CHINA@VACUUMSCHMELZE.COM

VACODYM • VACOMAX • PD002 AUSGABE 2014

Herausgegeben von der VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG, Hanau
© VACUUMSCHMELZE 2014. Alle Rechte vorbehalten.

® ist ein eingetragenes Warenzeichen der VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG



DER FORTSCHRITT BEGINNT BEIM WERKSTOFF