

## C: Arbeitspunkt, Arbeitsgerade, Temperatur und Stabilität

Wie in Abschnitt B dargelegt, befinden sich die Arbeitspunkte der meisten Dauermagnete, insbesondere bei isolierten Magneten, auf der Entmagnetisierungskurve. Ein Arbeitspunkt ist hier definiert als (B,H)-Paar des Magneten, welches mit der augenblicklichen Magnetisierung mittels Gl. (A.7) oder (A.8) verknüpft ist. Wenn ein Magnet vorliegt, dessen inneres Feld mittels eines Entmagnetisierungsfaktors N beschrieben werden kann, so folgt zusammen mit Gl. (A.7) und (B.8), daß wir für eine gegebene Magnetgeometrie dann ein konstantes B/H-Verhältnis vorfinden. Dieses Verhältnis beschreibt eine Gerade, die Arbeitsgerade genannt wird und unabhängig vom Magnetwerkstoff ist:

$$\frac{B}{-\mu_0 \cdot H} = \frac{1-N}{N} = \cot\beta \quad (\text{C.1})$$

Wenn das H-Feld in Einheiten  $\mu_0 H$  verwendet wird, so definiert der Winkel  $\beta$  in Gl. (C.1) die Steilheit der Arbeitsgerade, welche bei unterschiedlichen N unterschiedliche Werte annimmt, wie z.B. die Kurven in Abb. C1, die in A1 oder B1 enden. Liegt ein großer Entmagnetisierungsfaktor vor, so bedeutet dies, daß die Arbeitsgerade einen großen Winkel  $\beta$  mit der B-Achse aufweist. Der Punkt, an dem die Arbeitsgerade die Entmagnetisierungskurve schneidet, wie z.B. der Punkt A1 in Abb. C1, ergibt den Arbeitspunkt des Magnetmaterials.

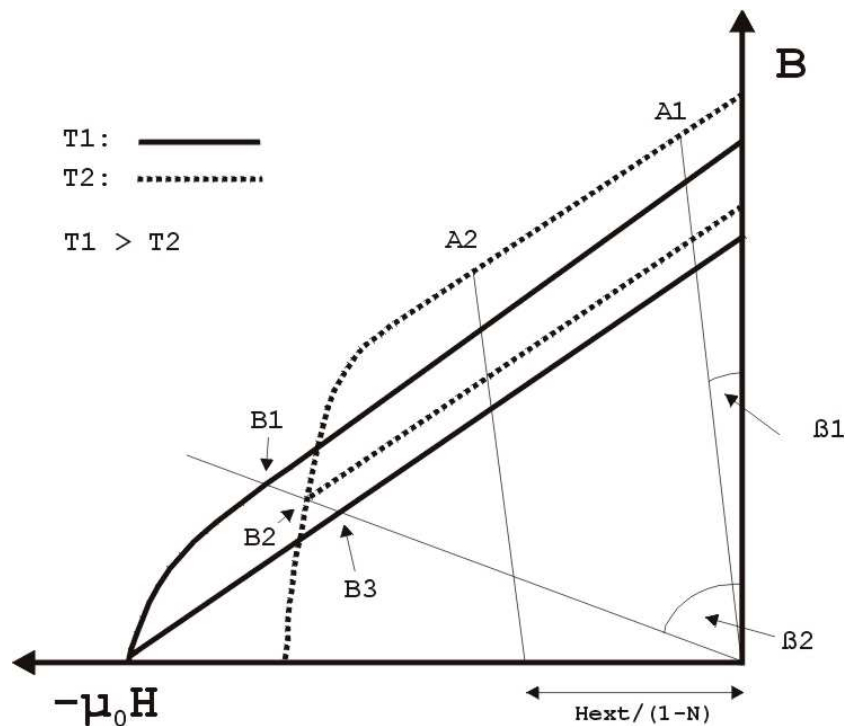


Abb. C1: Entmagnetisierungskurve mit Arbeitspunkten und Arbeitsgeraden bei unterschiedlichen Temperaturen und externen Feldern.

Falls wir zusätzlich zum inneren Feld  $H_i$  ein externes Feld  $H_{ext}$  anlegen, so daß nun statt  $H=H_i$  gilt  $H=H_i+H_{ext}$ , so verändert sich das B/H-Verhältnis und zwar ergibt sich nun:

$$\frac{B}{-\mu_0} = H \cdot \frac{1-N}{N} - \frac{H_{ext}}{N} \quad (\text{C.2})$$

Dies bedeutet, daß sich die Arbeitsgerade um den Betrag  $H_{ext}/(1-N)$  entlang der horizontalen Achse bewegt. Falls das interne Feld im Magneten nicht durch einen einzelnen Entmagnetisierungsfaktor beschrieben werden kann, so können wir uns ein Bündel von Arbeitsgeraden denken, die jeweils zu unterschiedlichen entmagnetisierenden Feldern an unterschiedlichen Punkten im Magnetinneren gehören.

Bis jetzt haben wir die magnetische Hysterese bei fester Temperatur, z.B. 20°C behandelt. Wenn sich die Temperatur ändert, so ändert sich i.a. auch die Form der Hysterese. In der Nähe der Raumtemperatur kann die Änderung von  $B_r$  und  $jH_c$  durch Temperaturkoeffizienten beschrieben werden, da für diese Größen hier die Temperaturabhängigkeit nahezu linear ist. Allgemein ist der Temperaturkoeffizient von  $B_r$  negativ für alle gängigen Magnetmaterialien, was bedeutet, daß  $B_r$  fällt, wenn die  $T$  ansteigt. Der Koeffizient der Koerzitivfeldstärke hängt vom jeweiligen Werkstoff ab. Er ist positiv für Ferrite und Alnico und negativ für die übrigen üblichen Dauermagnetwerkstoffe. Die exakte Definition beider Koeffizienten ist gegeben durch folgenden Gleichungen:

$$B_r(T) = B_r(20^\circ\text{C}) \cdot (1 + T_{kBr} \cdot (T - 20^\circ\text{C})) \quad (\text{C.3a})$$

$$jH_c(T) = jH_c(20^\circ\text{C}) \cdot (1 + T_{kiHc} \cdot (T - 20^\circ\text{C})) \quad (\text{C.3b})$$

Im folgenden soll erklärt werden, was mit unterschiedlichen Arbeitspunkten auf der Entmagnetisierungskurve geschieht, wenn sich die Temperatur in bestimmter Weise ändert. Dies tun wir anhand des Beispiels von Hartferriten; das Verhalten anderer Magnetmaterialien folgt analog:

Sei die Starttemperatur  $T_1$  und weise der Magnet eine Geometrie auf, die mit der Arbeitsgeraden unter dem Winkel  $\beta_1$  in Abb.C1 verbunden sei. Dies bedeutet, daß der Arbeitspunkt dort auf der durchgezogenen Entmagnetisierungskurve liegt, wo sie die in  $A_1$  endende Arbeitsgerade schneidet. Wenn wir nun abkühlen, bewegt sich der Arbeitspunkt zum Punkt  $A_1$  und liegt nun auf der gestrichelten Geraden, welche mit einer höheren Flußdichte  $B$  verbunden ist. Wenn wir nun die Temperatur wieder auf ihren Ursprungszustand anheben, so bewegen wir uns auf der Arbeitsgeraden wieder zum ursprünglichen Punkt auf der durchgezogenen Entmagnetisierungskurve. Insgesamt liegt keine Nettoänderung von  $B$  nach dem Temperaturzyklus vor. Das Systemverhalten wird dann reversibel genannt. Reversible Änderungen erfolgen immer dann, wenn die Arbeitsgeraden nur jeweils den linearen Teil der Entmagnetisierungskurve schneiden.

Die Situation ergibt sich als vollkommen unterschiedlich, wenn der steile Bereich der Entmagnetisierungskurve geschnitten wird. Sei  $B_1$  ein Arbeitspunkt bei der Temperatur  $T_1$ . Wenn wir wiederum abkühlen und zwar auf  $T_2$ , so verschiebt sich der Arbeitspunkt, der zu unserer Arbeitsgeraden gehört, wiederum auf die gestrichelte Linie hier zu Punkt  $B_2$ , was nun mit einer Verminderung von  $B$  verbunden ist. Wenn wir jedoch nun zur Ursprungstemperatur  $T_1$  zurückgehen, so geschieht etwas Seltsames. Anstatt daß der Arbeitspunkt sich zurück nach  $B_1$  bewegt, bewegt er sich nun auf den Punkt  $B_3$ . Da bei  $T_2$  der Arbeitspunkt den steilen Bereich der Entmagnetisierungskurve berührt hat, ist er nun an eine innere Kurve der magnetischen Hysterese fixiert, welche in Abb.C1 durch die lineare gestrichelte innere Kurve dargestellt ist. Ist der Arbeitspunkt an eine solche innere Kurve gebunden so hat er nun ihrer Temperaturänderung zu folgen und nicht der externen Kurve. Dies resultiert dann in einer weiteren Abnahme von  $B$ . Das Systemverhalten wird hier als irreversible bezeichnet, da der Ursprungszustand des Temperaturzyklus nicht wieder erreicht werden kann.

Reversible und irreversible Änderungen treten nicht nur unter Temperaturänderungen auf, sondern auch, wenn Änderungen von externen Feldern erfolgen. Wenn z.B. eine Änderung der Arbeitsgeraden von A1 zu A2 stattfindet, so wird in obigem Bild kein steiler Bereich der Entmagnetisierungskurve berührt. Wird Hext wieder zurückgenommen so kehrt der Arbeitspunkt zum ursprünglichen Ort zurück. Wäre jedoch Hext groß genug den steilen Bereich der Entmagnetisierungskurve zu erreichen, so würde dies in einer irreversiblen Abnahme von B münden, wenn Hext wieder gegen Null geht.

Neben den beschriebenen Änderungen von B und den z.T. damit verbundenen irreversiblen magnetischen Verlusten treten teilweise auch chemische Veränderungen der inherenten Struktur von Magnetmaterialien auf. Während irreversible Verluste von B, wie sie oben beschrieben sind, durch eine Remagnetisierung des Magneten zurück gewonnen werden können, ist dies bei chemischen Verlusten, wie Sie z.B. durch Oxidationsprozesse auftreten, nicht mehr der Fall. Hier ist der Verlust von B dauerhaft .

Ein weitere Effekt der zu einer irreversiblen Verminderung der magnetischen Stärke führt ist die sogenannte magnetische Nachwirkung oder magnetische Viskosität. Befindet sich ein Arbeitspunkt im irreversiblen Bereich der Entmagnetisierungskurve, so kann sich dieser bei gleichbleibender Feldstärke H mit der Zeit zu niedrigeren Werten der Magnetisierung bewegen. Der Vorgang wird oft mittels eines logarithmischen Zeitgesetzes beschrieben, z.B. durch

$$\Delta M = -S \cdot \ln\left(\frac{t - t_0}{t_0}\right) \quad (C4)$$

S ist die magnetische Viskosität und t0 ein Startzeitpunkt der Beobachtung. S wird häufig mittels

$$S = H_f \cdot \chi_{irr} \quad (C5)$$

mit der Fluktuationfeldstärke  $H_f$  in Zusammenhang gebracht, die eine von der Temperatur und vom Material abhängige Größe ist.  $\chi_{irr}$  ist der am Arbeitspunkt vorherrschende irreversible Anteil der Suszeptibilität. Die magnetische Nachwirkung kann je nach Arbeitspunkt und Material durchaus in der gleichen Größenordnung wie die oben beschriebenen Effekte liegen und ist heute Gegenstand einer Vielzahl neuer Veröffentlichungen. Anschaulich kann der Effekt mit einer Instabilität der zu einem Arbeitspunkt gehörigen magnetischen Strukturen in Zusammenhang gebracht werden, so daß die im Material vorhandene thermische Energie und deren Fluktuationen zu einer mehr oder weniger schnellen Änderung des Zustandes der Magnetisierung führen.