

B. Die Entmagnetisierungskurve und ihre Parameter

In permanentmagnetischen Materialien hat der zweite Quadrant der Hysterese die größte Bedeutung und wird **Entmagnetisierungskurve** genannt. Entmagnetisierungskurven sowie die übrigen Quadranten der Hysterese können sowohl in der $J(H)$ -Darstellung als auch in der $B(H)$ -Formulierung gezeichnet werden, was aus Gl. (A.7) entnommen werden kann. Dies ist auch der Fall in Abb.B1, welche die Basisparameter der Entmagnetisierungskurve wiedergibt, die in der technischen Literatur über Permanentmagnete hauptsächlich verwendet werden.

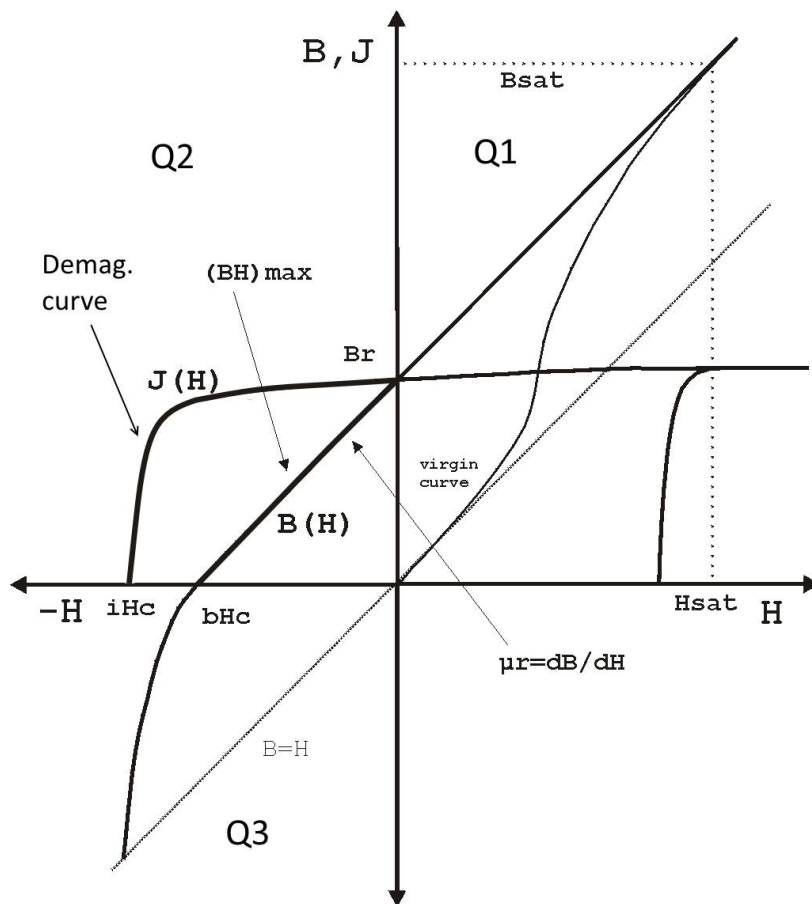


Abb. B1: Entmagnetisierungskurve (im 2. Quadranten) sowie der erste und Teile des dritten Quadranten der magnetischen Hysterese. Die Entmagnetisierungskurve, d.h. der zweite Quadrant, definiert die Größen B_r , bH_c , jH_c , μ_r und $(BH)_{max}$.

Die wichtigsten Parameter der Entmagnetisierungskurve haben folgende Bezeichnung:

$B_r =$ **Remanenzinduktion** [T]

$jH_c =$ **Koerzitivfeldstärke von J** [A/m], $bH_c =$ **Koerzitivfeldstärke von B** [A/m]

$\mu_r =$ **permanente Permeabilität** [einheitslos]

$(BH)_{max} =$ **Maximales Energieprodukt** [kJ/m³]

Nun zur Betrachtung der Entmagnetisierungskurve im Detail. Da wir hier lediglich eine Raumrichtung betrachten, wird im Folgenden eine skalare Schreibweise verwendet.

In modernen magnetischen Materialien haben wir ein mehr oder weniger lineares Verhalten von $J(H)$ und $B(H)$ auf der Entmagnetisierungskurve vorliegen bis zu dem Punkt, an dem die Kurve nach unten abknickt. Wenn des Magneten Arbeitspunkte in diesem linearen Bereich liegen, so können Sie durch externe Änderungen von H auf der Kurve bewegt werden, ohne die Entmagnetisierungskurve zu verlassen. Die Änderungen des Magneten nennen sich dann reversibel.

In der $M(H)$ -Darstellung kann die Linearität der Entmagnetisierungskurve durch Einführung der Suszeptibilität χ_r beschrieben werden. Diese ist hier eine differentielle Suszeptibilität dM/dH , d.h. sie gibt die Steigung von M in dieser Region der Hysterese an.

$$M(H) = M_r + \chi_r \cdot H \quad (B.1)$$

Hier steht M_r für die Remanenz-Magnetisierung. Mit Hilfe von Gl. (A.2) ergibt sich für $J(H)$:

$$J(H) = B_r + \mu_0 \cdot \chi_r \cdot H \quad (B.2)$$

Hieraus erhalten wir, daß die Remanenzinduktion aus Abb.B1 mit der Remanenz-Magnetisierung einfach durch den Faktor μ_0 verknüpft ist:

$$B_r = \mu_0 \cdot M_r \quad (B.3)$$

In der $B(H)$ -Beschreibung folgt hieraus mittels Gl. (A.7), daß:

$$B(H) = B_r + \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (B.4)$$

Hier haben wir die permanente Permeabilität (Englisch Recoil-Permeability) der Entmagnetisierungskurve definiert durch:

$$\mu_r = 1 + \chi_r \quad (B.5)$$

Die permanente Permeabilität beschreibt die Steigung der Entmagnetisierungskurve in der $B(H)$ -Darstellung. Sie ist her ebenfalls ein differentieller Parameter dB/dH , im Gegensatz zur totalen Permeabilität die in Abschnitt A eingeführt wurde. Die obigen Gleichungen sind nicht nur gültig bei linearen Entmagnetisierungskurven, sondern können ebenso verwendet werden, wenn eine Abweichung vom linearen Verhalten auftritt. In diesem Fall sind μ_r und χ_r abhängig von H .

Aus den obigen Gleichungen kann u.a. entnommen werden, daß die Remanenzinduktion über den gesamten linearen (oder quasi-linearen) Bereich nahezu gleich ist zur vorherrschenden Magnetisierung. Dies kann insbesondere anhand von Gl. (B.1) gesehen werden, wenn man berücksichtigt, daß χ_r nahe Null liegt bzw. μ_r nur wenig verschieden von 1 ist, was für die meisten modernen magnetischen Materialien gilt. Da die räumliche Verteilung der Magnetisierung das vom Magneten abgegebene Feld bestimmt, siehe in Abschnitt E, kann die besondere Wichtigkeit der Größe Remanenzinduktion leicht eingesehen werden.

Die Koerzitivfeldstärke von B , d.h. ${}_bH_c$ beschreibt dasjenige magnetische Feld, welches benötigt wird die Richtung von B im Magnetinneren umzukehren. Sie ist kleiner als die Koerzitivfeldstärke der Polarisation ${}_jH_c$, welche dasjenige Feld beschreibt das benötigt wird, um die Polarisation bzw. Magnetisierung auf Null zu bringen. Zu erwähnen sei noch die

Größe H_{sat} im ersten Quadranten, d.h. diejenige Feldstärke die aufgebracht werden muss einen unmagnetischen Magneten in die Sättigung zu magnetisieren.

Das maximale Energieprodukt, d.h. der Punkt auf der Entmagnetisierungskurve wo das Produkt $B \cdot H$ sein Maximum aufweist, wird meist zu Vergleichszwecken verwendet, da nämlich die Energie eines magnetischen Feldes gegeben ist durch:

$$E = \frac{1}{2} \int \vec{B} \cdot \vec{H} dV \quad (\text{B.6})$$

Dies bedeutet z.B., dass die Feldenergie eines idealen magnetischen Kreises mit einem Permanentmagneten dann ein Maximum aufweist, wenn $B \cdot H$ auf der Entmagnetisierungskurve des Magneten beim Maximum liegt. Wenn sich der Dauermagnet linear mit konstanter permanenter Permeabilität μ_r verhält, kann sein maximales Energieprodukt berechnet werden mittels:

$$(\text{BH})_{\text{max}} = \frac{1}{4 \cdot \mu_r \cdot \mu_0} \cdot B_r^2 \quad (\text{B.7})$$

Bis jetzt haben wir die unterschiedlichen Parameter der Entmagnetisierungskurve kennen gelernt sowie gewisse Einblicke in die mathematische Beschreibung der Entmagnetisierungskurve erhalten. Der Ursprung der Wichtigkeit der Entmagnetisierungskurve liegt in der Tatsache, daß alle einzelnen Dauermagnete sowie die meisten Dauermagnete in Magnet-systemen ihre (B,H) -Arbeitspunkte im zweiten Quadranten der Hysterese haben. Im Fall des isolierten Dauermagneten kann dies leicht durch die allgemeine Differenz zwischen \mathbf{B} - und \mathbf{H} -Feldern verstanden werden. Abb. B2 zeigt sowohl die \mathbf{B} - als auch das \mathbf{H} -Feldverteilung in einer einzelnen homogen magnetisierten Kugel. Während das \mathbf{B} -Feld geschlossene Schleifen formt und außerhalb des Magneten gleich ist mit $\mu_0 \mathbf{H}$ ($\mu_r=1$ in Luft, vergl. Gl. (A.11)), so liegt im Inneren der Kugel das \mathbf{H} -Feld in umgekehrter Richtung zu \mathbf{B} vor. Daher hat das interne Feld \mathbf{H} die Tendenz seine eigene Quelle zu entmagnetisieren und ist somit auf dem negativen Zweig der Feldkoordinaten angesiedelt.

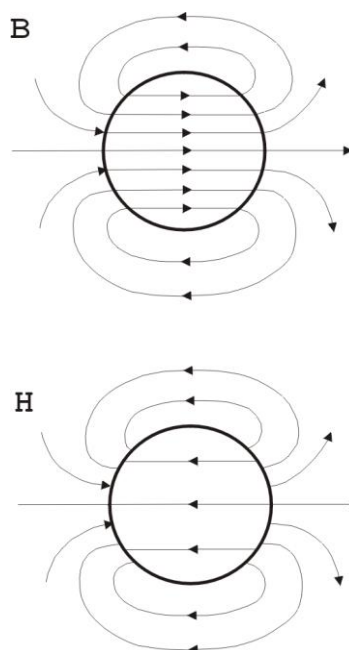


Abb. B2: Feldverteilung von \mathbf{B} und \mathbf{H} innerhalb und um eine homogen magnetisierte Kugel.

Für isolierte Dauermagnete in der Form eines Ellipsoids kann das innere Feld H mit Hilfe des sogenannten **Entmagnetisierungsfaktors** N berechnet werden:

$$H = -N M \quad (\text{B.8})$$

$0 \leq N \leq 1$, $N \sim 1$: flaches Ellipsoid, $N \sim 0$: langgestrecktes Ellipsoid. Kugel: $N=1/3$. Der Entmagnetisierungsfaktor von Ellipsoiden ist in einer Vielzahl von Tabellenwerken festgehalten. Für andere Geometrien kann versucht werden, eine Schätzung des Entmagnetisierungsfaktors anzugeben, falls diese Geometrie ähnlich eines Ellipsoids ist. Andernfalls existiert eine Verteilung unterschiedlicher Arbeitspunkte, d.h. von unterschiedlichen H -Feldern im Magnetkörper. Allgemein kann gesagt werden, daß das Längen- zu Durchmesser-Verhältnis (L/D) die Stärke der inneren Felder bestimmt (L parallel zur Magnetisierung):

$$L/D \gg 1: H \sim 0, \quad L/D \ll 1: -H \text{ groß} \quad (\text{B.9})$$

In Magnetsystemen, die aus mehr als einer Feldquelle bestehen, sind in den meisten Fällen die Entmagnetisierungsfelder immer noch stärker als irgend eines der externen Felder, welche möglicherweise in die entgegengesetzte Richtung wie das Entmagnetisierungsfeld agieren. Insofern ist auch hier das interne Feld weiterhin meist negativ, so daß die Arbeitspunkte weiterhin auf der Entmagnetisierungskurve liegen.