

4.4.1 Alnico-Magnete

Alnico-Legierungen enthalten 7 – 13% Al, 12 – 28% Ni, bis zu 40% Co, bis zu 6% Cu, sowie u.U. kleine Mengen an Ti, Si, S, Nb. Bei Gitarren-Tonabnehmern ist oft von Alnico 5 (oder auch Alnico V) die Rede. Diese in den USA übliche Bezifferung (Alnico 1 bis 12) sollte den BH_{\max} -Wert (volumenspezifischer Energiegehalt) aufsteigend klassifizieren – eine präzise Spezifikation von Materialeigenschaft und Zusammensetzung ist hiermit aber nicht gegeben. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass Alnico 2 stärker ist als Alnico 3. Für Tonabnehmer werden vor allem Alnico 2, Alnico 3 und Alnico 5 verwendet.

	B_r / T	H_c / kA/m	BH_{\max} / kJ/m ³	Al	Ni	Co	Cu	Ti
Alnico 3	0.65 - 0.75	32 - 45	10 - 11	12	24-26	0	0-3	–
Alnico 2	0.7 - 0.85	34 - 52	12 - 14	10	17-19	12-15	3-6	0.5
Alnico 5	1.1 - 1.3	50 - 62	30 - 50	8	12-15	23-25	0-4	0-0.5

Tabelle: Magnetische Eigenschaften und prozentuale Zusammensetzung von Alnico-Magneten; Rest = Fe.

Bei Alnico-Magneten wird herstellungsbedingt zwischen gegossenen und gesinterten unterschieden, die isotrop oder anisotrop sein können. Zur Herstellung **gegossener** Magnete erhitzt man die metallischen Bestandteile bis zur Verflüssigung, und gießt die Schmelze in Formen, wo sie dann erstarrt (Sandguss, Kokillenguss, Vakuum-Feinguss). Gussmagnete haben unbehandelt eine dunkelgraubraune Farbe. Beim **Sintern** werden die fein gemahlene Bestandteile unter hohem Druck bei hoher Temperatur zusammengebacken (gesintert). Sintermagnete sehen metallisch glänzend (nickelähnlich) aus. Im Gegensatz zu Gussmagneten haben Sintermagnete bessere mechanische, aber geringfügig schlechtere magnetische Eigenschaften. Insbesondere ist die Remanenz geringfügig kleiner als bei Gussmagneten; die Koerzitiv-Feldstärke ist vergleichbar. Sintermagnete können nur in kleinen Abmessungen und großen Stückzahlen wirtschaftlich hergestellt werden. Sie weisen weniger Poren, Lunker und Risse auf als Gussmagnete und halten die vorgeschriebene Zusammensetzung besser ein. Aufgrund ihrer sehr hohen mechanischen **Härte** (Rockwellhärte 45 – 60 HRC) können Alnico-Magnete nur durch Schleifen bearbeitet werden; die Schliefflächen sehen metallisch glänzend aus.

Isotrope Materialeigenschaften sind richtungsunabhängig. **Anisotropie** bedeutet demgegenüber, dass eine räumliche Vorzugsrichtung existiert, in der eine (in diesem Fall magnetische) Eigenschaft besonders ausgeprägt ist (*oriented material*). Sowohl Guss- als auch Sintermagnete sind ohne Spezialbehandlung isotrop.

Magnetlegierungen mit Al-, Ni-, Co-Bestandteilen wurden und werden weltweit unter verschiedenen Handelsbezeichnungen produziert. Da die ersten kommerziell erfolgreichen Tonabnehmer in den USA entwickelt (und gewickelt) wurden, hat sich die amerikanische Bezeichnung Alnico durchgesetzt. **Seth Lover**, Entwickler des Gibson "Patent-Applied-For"-Humbuckers, antwortet auf die Frage, ob er immer Alnico-V-Magnete verwendete: "Wir haben auch Alnico II und III verwendet, weil Alnico V nicht immer zu kaufen war. Wir haben gekauft, was gerade verfügbar war, weil das alles gute Magnete waren. Der einzige Unterschied war, dass Alnico V seine Magnetisierung nicht so schnell verlor [13]."

Aus physikalische Sicht gibt es da einiges zu ergänzen, aus kommerzieller Sicht offensichtlich auch: Gibson teilt 2002 auf seiner Homepage mit: *"BurstBucker pickups now give guitarists a choice of three replica sounds from Gibson's original "Patent Applied For" pickups – the pickups that give the '59 Les Paul Standard it's legendary sound. ... with unpolished Alnico II magnets and no wax potting of the coils, just like the originals"*. Bevor man sich nun aber Gedanken macht, warum heute Replika-Tonabnehmer aus Magnetmaterial hergestellt werden, das ursprünglich nur Lückenbüßer war, sollte man daran denken, dass sowohl Alnico II als auch Alnico V in unterschiedlichen Varianten hergestellt werden. C. Heck [21] führt vier verschiedene amerikanische Alnico-II-Versionen und 8 verschiedene Alnico-V-Versionen auf:

	B_r / T	$H_c / \text{kA/m}$	$BH_{\max} / \text{kJ/m}^3$	Al	Ni	Co	Cu
Alnico II	0.73	46	12.8	10	17	12.5	6
Alnico II A	0.70	52	13.6	10	18	13	6
Alnico II B	0.75	46	13.6	10	19	13	3
Alnico II H	0.84	48	16.8	10	19	14.5	3

	B_r / T	$H_c / \text{kA/m}$	$BH_{\max} / \text{kJ/m}^3$	Al	Ni	Co	Cu
Alnico V A	1.20	58	40	8	15	24	3
Alnico V AB	1.25	55	44	8	14.5	24	3
Alnico V ABDG	1.31	56	52	8	14.5	24	3
Alnico VB (V)	1.27	52	44	8	14	24	3
Alnico VBDG	1.33	55	52	8	14	24	3
Alnico V C	1.32	46	44	8	13	24	3
Alnico V E	1.10	56	36	8	14.5	24	3
Alnico V-7	1.28	62	56	8	14	23	3

Tabelle: Magnetische Eigenschaften und prozentuale Zusammensetzung von Alnico-Magneten; Rest = Fe.

"Das" Alnico-5-Material gibt es offensichtlich gar nicht, die in dieser Tabelle angegebene Remanenz streut um $\pm 10\%$, die Koerzitiv-Feldstärke um $\pm 11\%$. Wie sehr sich die Hystereseschleifen unterscheiden, zeigt **Abb. 4.7**. Die Einheiten entsprechen dem in den USA üblichen CGSA-System, $1 \text{ Oe} = 80 \text{ A/m}$, $10 \text{ kG} = 1 \text{ T}$, $1 \text{ MGOe} = 8 \text{ kJ/m}^3$. Wenn Überlegungen angestellt werden, ob Alnico 5 besser "klingt" als Alnico 2, muss natürlich auch untersucht werden, um welche spezielle Alnico-Untergruppe es sich handelt. Hierbei ist besonders problematisch, dass die magnetischen Eigenschaften eines Werkstoffes nicht nur von dessen chemischer Zusammensetzung abhängen, sondern auch von den physikalischen Parametern des Herstellungsprozesses. Insbesondere können Temperaturbehandlungen und externe Magnetfelder bleibende (permanente) Auswirkungen erzeugen.

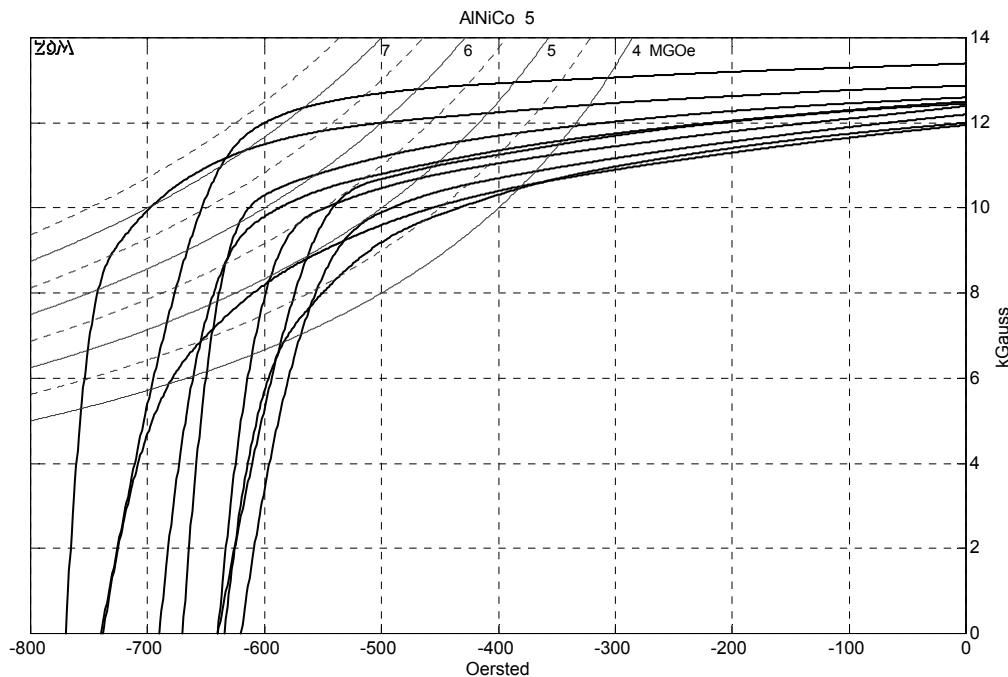


Abb. 4.7: B/H-Kennlinien diverser Alnico-5-Magnete [22, 23]. $1\text{Oe} = 80\text{A/m}$, $10\text{kG} = 1\text{T}$, $1\text{MGOe} = 8\text{kJ/m}^3$.

Zum Verständnis der Alnico-Eigenschaften sind Grundkenntnisse in Werkstoffkunde hilfreich: Beim festen Metall ordnen sich die Atome in einer raumperiodisch regulären Gitterstruktur an. Dieses **Kristallgitter** ist allerdings nicht ganz exakt gebaut, sondern enthält Gitterfehler, die wesentlichen Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften haben. Energiezufuhr (Erwärmen) bewirkt, dass die Atome aus dem starren Verband in einen lockeren übergehen, das Metall wird flüssig. Beim anschließenden **Abkühlen** (Erstarren) beginnt an vielen Stellen (sog. **Kristallisationskeimen**) gleichzeitig die Kristallbildung. Von hier aus wachsen die im Innern regelmäßig aufgebauten Kristalle, die auch Körner oder **Kristallite** genannt werden, bis sie an die Nachbarkristallite stoßen. Im abgekühlten Zustand liegt das Metall wieder als **polykristallines Gefüge** vor. Polykristallin bedeutet, dass das gesamte Metallvolumen aus vielen einzelnen Kristalliten aufgebaut ist, die an ihren Korngrenzen aneinander stoßen. In seinem Innern ist jeder dieser Kristallite **einkristallin**, d.h. hier sind alle Atome im Wesentlichen raumperiodisch angeordnet; die Kristallachsen der einzelnen (nur einige Mikrometer großen) Kristallite zeigen aber in unterschiedliche Richtungen.

Die Eigenschaften eines Kristallgitters ergeben sich aus seinen Bausteinen, deren Bindung und der Gittergeometrie. Bekanntlich besteht sowohl Diamant als auch Graphit aus reinem Kohlenstoff. Beide Materialien (die allerdings nicht zu den Metallen zählen) haben völlig unterschiedliche physikalische Eigenschaften, weil bei ihnen die Kohlenstoffatome in unterschiedlicher Kristallstruktur (kubisch bzw. hexagonal) angeordnet sind. Auch einige Metalle kommen in unterschiedlicher Kristallstruktur (polymorph) vor: Eisen, Kobalt, Mangan, Titan, Zinn, Zirkon. Bei ihnen ändert sich beim Durchschreiten eines charakteristischen Temperaturpunktes der Gitteraufbau, und damit die Materialeigenschaft. Besonders ausgeprägt ist die Gitterabhängigkeit der Materialeigenschaften bei Legierungen, d.h. Metallgemischen. Beispielsweise können bei der Eisen-Kohlenstoff-Legierung **Stahl** durch Härten oder Glühen physikalische Eigenschaften geändert werden, obwohl die chemische Zusammensetzung nicht wesentlich verändert wird. Auch Nichteisenmetalle wie z.B. Kupfer können bei gleichbleibender chemischer Zusammensetzung ihre Steifigkeit ändern, wenn sie gebogen werden (Kaltverfestigung). Ursache ist ebenfalls eine Gitterumwandlung (Gitterfehler).

Auch die magnetischen Stoffeigenschaften hängen vom Kristallaufbau ab. Beim Eisenatom erzeugen die um den Atomkern *kreisenden* Elektronen individuelle Magnetfelder, die sich aber nach außen vollständig kompensieren; nicht vollständig kompensiert werden hingegen die vom Elektronenspin verursachten Magnetfelder, so dass jedes Atom einen magnetischen **Elementardipol** darstellt. Interatomare Kräfte versuchen nun, die Dipolrichtungen sowohl zueinander parallel, als auch parallel zu den Kanten des würfelförmigen Eisenkristalls zu drehen. Im Würfel gibt es sechs vorzeichenbehaftete orthogonale Kanten-Richtungen, und in diese sechs Richtungen zeigen die Elementardipole eines nichtmagnetisierten Eisenkristalls. Hierbei bilden sich Bezirke benachbarter Atome mit gleicher Magnetisierungsrichtung aus. PIERRE WEISS postulierte als erster das Vorhandensein solcher Bezirke mit richtungsgleicher Magnetisierung, die seither WEISSsche Bezirke, Elementarbezirke oder **Domänen** genannt werden. Alle Domänen sind magnetisch gesättigt, alle Atome im Innern einer Domäne haben dieselbe magnetische Ausrichtung. Im Allgemeinen enthält ein Kristallit viele Domänen, deren individuelle Ausrichtung mit statistischer Verteilung den sechs Kristallrichtungen entspricht. Aufgrund der statistischen Gleichverteilung wirkt das gesamte Eisenstück nach außen zunächst unmagnetisch.

Beim Anlegen eines sehr schwachen äußeren Magnetfeldes (beim Magnetisieren) verschieben sich zunächst reversibel die Grenzflächen der Domänen, die nach FELIX BLOCH **Blochwände** genannt werden. Hierbei vergrößern sich Domänen, deren Magnetisierungsrichtungen die Richtung des äußeren Feldes unterstützen. Mit zunehmender äußerer Feldstärke kommt es zu einer **irreversiblen** Verschiebung, d.h. beim Abschalten des Feldes kehren die Blochwände nicht mehr in ihre Ausgangslage zurück, sondern bleiben in der nächstgelegenen energetisch günstigen Lage hängen. Die Blochwandverschiebungen können bis zur Degeneration (Vernichtung) kleiner Domänen zugunsten großer führen. Bei noch stärkerer Feldzunahme drehen sich die Elementardipole (reversibel und/oder irreversibel) aus der Kristallachsenrichtung in die Richtung des äußeren Feldes. Sobald es zu irreversiblen Änderungen kommt, sind die Magnetisierungsrichtungen der (neu geformten) Domänen nicht mehr räumlich gleichverteilt, auch nach Abschalten des äußeren Feldes bleibt eine dauerhafte (permanente) Magnetisierung (**Remanenz**) zurück.

Dauermagnete zeichnen sich dadurch aus, dass die Magnetisierung ihrer Domänen durch äußere Felder nur sehr schwer verändert werden kann. Eine Möglichkeit, dieses Ziel zu erreichen, besteht darin, die Magnetpartikel so zu verkleinern, dass sie keine Blochwände mehr enthalten, dass also jeder Magnetkristallit nur mehr eine einzige Domäne enthält. Hierbei können beim Anlegen des äußeren Feldes nur noch die schwer erreichbaren Drehprozesse auftreten, nicht mehr die leicht erreichbaren Blochwandverschiebungen. Kleine Magneteilchen lassen sich durch Zerkleinern herstellen (Pulvermagnete), oder beim Abkühlen von geschmolzenen Legierungen. Alnico-Magnete gehören zu den **Ausscheidungslegierungen**, in denen durch geeignete Wärmeeinwirkung (Wärmebehandlung) Magneteilchen mit der richtigen Größe gezüchtet werden können.

Legierungen sind Stoffgemenge mit metallischen Eigenschaften. Bei Alnico ist die Hauptkomponente (das Basismetall) Eisen, dem Legierungselemente (Al, Ni, Co, Cu) zugemischt werden. Bei starkem Erwärmen (auf z.B. 1670°C) mischen sich alle Komponenten in einer flüssigen Schmelze, die beim Abkühlen erstarrt. Die erstarrte Legierung ist bei Temperaturen über 1100°C einphasig (Phase = Kristallart), d.h. sie besteht aus nur einer kubisch-raumzentrierten Kristallart (α). Obwohl die Legierung bereits fest geworden ist, wird die Mischbarkeit der Komponenten auch als *Löslichkeit* bezeichnet, aber im Sinne einer festen Lösung. Für die Löslichkeit der Legierungskomponenten gibt es allerdings eine Löslichkeitsgrenze, und die ist temperaturabhängig: Mit abnehmender Temperatur nimmt auch die maximale Löslichkeit ab.

Die bei hohen Temperaturen vorliegenden homogenen einphasigen Mischkristalle zerfallen beim Abkühlen in zwei neue, ebenfalls kubisch-raumzentrierte Phasen: In die Fe-Ni-Al-**Matrix** (α_2 , Grundsubstanz), und in eine darin fein verteilte Fe-Co-Phase (α_1). Die Matrix ist nur schwach magnetisch, die in Kugel- und Stäbchenform auftretende Fe-Co-Phase hingegen stark ferromagnetisch. Die Gefügeumwandlung vom einphasigen in den zweiphasigen Zustand, die beim Abkühlen zwischen 850 ... 750°C auftritt, wird **spinodale Entmischung** [24] (spinodal decomposition, spinodal dissociation) genannt. Elektronenmikroskopische Aufnahmen haben gezeigt, dass sich die entstehenden ('ausgeschiedenen') α_1 -Teilchen entlang der Matrix-Würfelkanten anordnen. Wenn die Teilchen bei ihrer Entstehung magnetisierbar sind, können sie durch ein externes Magnetfeld so beeinflusst werden, dass sie sich in einer **Vorzugsrichtung** ablagern. Hierfür muss aber durch geeignete Kobaltbeimischungen die Curie-Temperatur soweit abgesenkt werden, dass sie unterhalb der Spinodal-Temperatur liegt, denn nur oberhalb der Curie-Temperatur sind Ferromagnetika magnetisierbar. Magnetwerkstoffe, die auf diese Weise in einem externen Magnetfeld abgekühlt wurden, zeigen eine räumliche **Anisotropie**, d.h. ihre magnetischen Eigenschaften sind richtungsabhängig. Die Größe der bei der spinodalen Entmischung entstandenen α_1 -Teilchen lässt sich durch mehrstündiges Glühen (Anlassen, **Tempern**) bei ca. 600°C dann noch in weiten Grenzen verändern – und hiervon hängt ganz wesentlich die erreichbare Koerzitiv-Feldstärke ab. Am effizientesten sind längliche Teilchen, deren Länge ein Mehrfaches des Durchmessers beträgt, aber noch unter der kritischen Grenze für Blochwandbildung bleibt.

Bei der Entmischung entstehen kubische Matrixkristalle mit zufälliger Richtungsorientierung; ihre Kanten zeigen gleichverteilt in alle Richtungen. (Beim einzelnen Kristallit sind die Richtungen natürlich orthogonal). Beim Abkühlen im Magnetfeld lagern sich nun die α_1 -Teilchen zwar bevorzugt in der nächstgelegenen Kantenrichtung an, aber da die Kristallite in unterschiedliche Richtungen orientiert sind, wird noch nicht das bestmögliche Ergebnis erreicht. Hierfür müssten alle Kristallite der Matrix parallel zueinander ausgerichtet sein, d.h. in parallele Gitterrichtungen gewachsen sein. Durch spezielle Herstellungsverfahren (unidirektionaler Wärmeentzug, homogener Temperaturgradient, Schreckplatte) gelingt es, diesem Ideal nahe zu kommen. Derartig hergestellte Magnete werden *kornorientiert*, *kristallorientiert*, *vorzugsgerichtet* oder *stängelkristallin* genannt. Ihre guten Daten erreichen sie allerdings nur, wenn zum orientierten Kristallaufbau (**Kristallanisotropie** der Matrix) eine passende Magnetfeldbehandlung erfolgt (**Formanisotropie** der α_1 -Teilchen).

Dieser kurze Exkurs in die Werkstoffkunde sollte zeigen, dass es nicht genügt, die in Tonabnehmern verwendeten Magnete einfach durch ihre chemische Zusammensetzung zu charakterisieren. Die Beschreibung "Alnico-V mit 8% Al, 14% Ni, 24% Co, 3% Cu" sagt noch nichts über Remanenz, Koerzitiv-Feldstärke oder Permeabilität. Moskowitz [23] fasst diese Problematik zusammen: *There are 16 factors that determine the actual performance of a specific basic magnet in a particular circuit. The magnetic and physical properties of the material are directly dependent on the following factors in the manufacturing process: chemical composition, crystal or particle size, crystal or particle shape, forming and/or fabrication method, and heat treatment. Permeability, coercive force, and hysteresis loop are specifically affected by gross composition, impurities, strain, temperature, crystal structure and orientation. The effects of each of these factors are metallurgically complex and beyond the scope of this book.* "This book" heißt immerhin PERMANENT MAGNET DESIGN AND APPLICATION HANDBOOK. Hat wohl der 'Fachautor' nicht gelesen, der 2001 in seinem Buch 'E-GITARREN' schreibt: *"Die Herstellung eines Magneten ist relativ einfach. Die Basis-Materialien werden lediglich einer sehr hohen elektrischen Spannung ausgesetzt ... Die Feldstärke des nun entstandenen Magneten kann in Gauß gemessen werden."* ?? ☹ !!

Magnete mit definierten Magnetparametern sind *nicht* leicht herstellbar. Im Gegensatz zum Gleichstromwiderstand sind magnetische Parameter auch nicht leicht messbar. Einer Widerstandsstreuung von $\pm 5\%$ wird in der Tonabnehmerliteratur breiter Raum eingeräumt, den Klang-Unterschied zwischen Alnico-5 und Alnico-2 findet man in epischer Breite beschrieben, die Streuungen der Magnetparameter bleiben jedoch meist unerwähnt.

Zur Alnico-Magnetherstellung sind hochreine Komponenten erforderlich. McCaig [26] fordert Eisen mit höchstens 0,02% Kohlenstoffgehalt, Cedighian [25] empfiehlt Aluminium mit einem Reinheitsgrad von mindestens 99,6%. Moskowitz [23] fordert *very close metallurgical controls* und Toleranzen von z.B. $\pm 0,05\%$ bei Titan und $\pm 0,06\%$ bei Silizium. Toleranzen, die nicht nur beim Abwiegen, sondern in der Schmelze gewährleistet werden müssen. Moskowitz [23] hält es für erforderlich, dass Alnico-3 bei $1290^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ homogenisiert wird, McCaig schreibt, dass bereits 10°C Temperaturabweichung zu *extremely poor results* führen kann. Ob das alle Magnethersteller mit dieser Präzision gemacht haben? Damals, in den vierziger und fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts, als die berühmten Vintage-Tonabnehmer entstanden? Die mit der Magnetherstellung befassten Wissenschaftler versuchten, mit den damals vorhandenen Mikroskopen Einblicke in Kristallstrukturen zu gewinnen. Lichtmikroskope konnten aber die ca. $40\text{nm} \times 8\text{nm} \times 8\text{nm}$ großen Magneteilchen nicht auflösen. Elektronenmikroskope und Röntgenapparate gab es zwar schon, aber noch nicht in großer Verbreitung. McCaig [26] schreibt hierzu: *We at the Central Research Laboratory of the Permanent Magnet Association became interested in the angular distribution of crystal axes in the late 1950s. At this time we did not possess our own X-ray equipment ... Each crystal required an exposure of several hours, so the experiment was not carried out on many samples.* Das war gegen Ende der Fünfziger. Und nochmals McCaig: *Unfortunately the details of manufacturing processes are rarely sufficient to enable you to produce magnets successfully yourself. Even when a process for making permanent magnets is fully and honestly described, it may take several months for someone skilled in the art to reproduce it successfully in a different environment.* Das war Ende der Siebziger – und gilt auch heute noch.

Die Tonabnehmer der ersten Jahre (Jahrzehnte?) hatten nicht nur unterschiedliche Windungszahlen, sondern auch unterschiedliche Magnete. **Seth Lover**, Entwickler des Gibson "Patent-Applied-For"-Humbuckers, antwortet auf die Frage, ob er **immer Alnico-V**-Magnete verwendete: *"Wir haben auch Alnico II und III verwendet, weil Alnico V nicht immer zu kaufen war. Wir haben gekauft, was gerade verfügbar war, weil das alles gute Magnete waren. Der einzige Unterschied war, dass Alnico V seine Magnetisierung nicht so schnell verlor [13]."* Im Gegensatz dazu steht Gibsons Werbung: *"BurstBucker pickups now give guitarists a choice of three replica sounds from Gibson's original "Patent Applied For" pickups – the pickups that give the '59 Les Paul Standard it's legendary sound. ... with unpolished **Alnico II** magnets and no wax potting of the coils, just like the originals"*. Right you are, if you think you are ...

"Wir haben gekauft, was gerade verfügbar war". Offensichtlich war nur wichtig, dass Alnico draufstand. Dieser Name besagt aber nur, dass eine Eisen-Aluminium-Nickel-Kobalt-Legierung vorliegt. Die magnetischen Eigenschaften entstehen erst durch Wärme- und ggf. durch Magnetfeldbehandlung – und die sind zumeist Herstellergeheimnisse. Um die Betriebsdaten eines Magneten zu erhalten, müsste seine *B/H*-Hysterese gemessen werden. Hierzu ist aber mehrfaches Entmagnetisieren (und Wiedermagnetisieren) nötig, und welcher 1952-LesPaul-Besitzer hat das schon gerne? Vintage-Tonabnehmer wird deshalb immer eine mystische Aura umgeben.

4.4.1.1 Alnico-III und Alnico-I

Alnico-I ist aus Alnico-III hervorgegangen, indem etwa 5% Ni durch Co ersetzt wurde [21]. Die beiden Legierungen unterscheiden sich nur unwesentlich in ihren magnetischen Eigenschaften. Alnico-III ist kobaltfrei und wird deshalb manchmal als **Alni** bezeichnet; in den USA wird Alnico-III aber zu den Alnico-Magneten gerechnet – auch ohne Kobalt. **Alnico-I** wird eher bei großen Magnetabmessungen verwendet, und ist deshalb für Tonabnehmer unbedeutend. **Alnico-III** war der Werkstoff für kleine, billige Magnete – und genau aus diesem Material baute Leo Fender in den fünfziger Jahren die Magnete der Telecaster.

Die meisten Werkstoffbücher nennen für Alnico-III folgende Zusammensetzung: 12% Al, 24-26% Ni, kein Co, 0-3% Cu, Rest Fe. Die erreichbare Remanenz liegt zwischen 0,6-0,75 T, die Koerzitiv-Feldstärke zwischen 32-45 kA/m, die maximale Energiedichte bei 9-12 kJ/m³. Neben der chemischen Zusammensetzung hat auch der Abkühlvorgang Einfluss auf die Magnetdaten, Untergruppen werden durch Zusatzbuchstaben gekennzeichnet, z.B.: Alnico-III-A. Alnico-III-Magnete sind isotrop, und als Guss- oder Sintermagnet erhältlich.

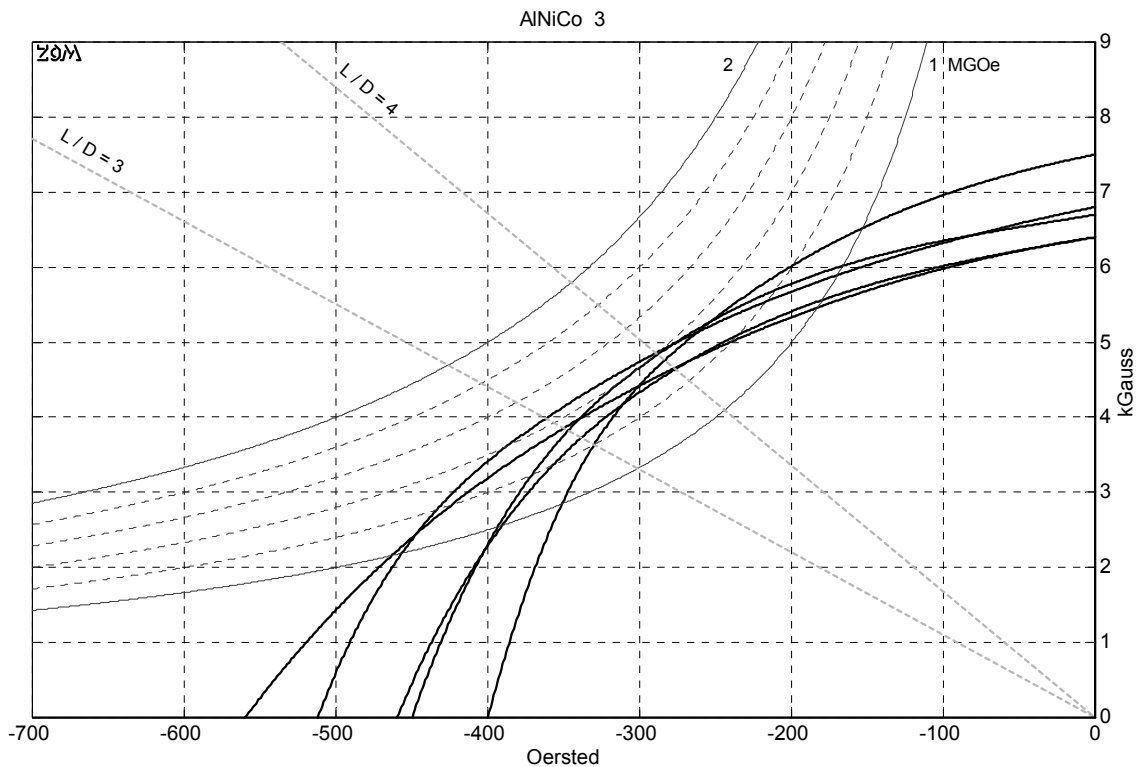


Abb. 4.8: B/H -Kennlinien diverser Alnico-III-Magnete [21 - 23]. $1\text{Oe} = 80\text{A/m}$, $10\text{kG} = 1\text{T}$, $1\text{MGOe} = 8\text{kJ/m}^3$. $L/D = \text{Länge} / \text{Durchmesser}$ (vergl. Abb. 4.11).

Abb. 4.8 zeigt die B/H -Kurven einiger Alnico-III-Magnete. Ihre Berührungspunkte mit den Energiehyperbeln liegen in einem relativ engen Bereich um $1,4\text{ MGOe} = 11,2\text{ kJ/m}^3$. Bei der als horizontaler Abszissenabschnitt aufgetragenen Koerzitiv-Feldstärke ist die Streuung beachtlich.

4.4.1.2 Alnico-II

Alnico-II enthält mehr Kobalt und zusätzlich mehr Kupfer, so dass der Preis der daraus hergestellten Magnete etwas höher ist als bei den Alnico-I-, -III- und -IV-Magneten [21]. Alnico-II hat von allen *isotropen* Alnicos den höchsten BH_{\max} -Wert.

Die meisten Werkstoffbücher nennen für Alnico-II folgende Zusammensetzung: ca. 10% Al, 17-19% Ni, 12-15 Co, 3-6% Cu, gelegentlich einige Promille Ti und S, Rest Fe. Die erreichbare Remanenz liegt zwischen 0,7-0,85 T, die Koerzitiv-Feldstärke zwischen 34-52 kA/m, die maximale Energiedichte bei 11-16 kJ/m³. Neben der chemischen Zusammensetzung hat auch der Abkühlvorgang Einfluss auf die Magnetdaten. Alnico-II ist isotrop, und als Guss- oder Sintermagnet erhältlich. Alnico-II kann magnetfeldbehandelt werden, der Energiegewinn beträgt wegen des relativ geringen Kobaltgehaltes aber nur ca. 10% [21].

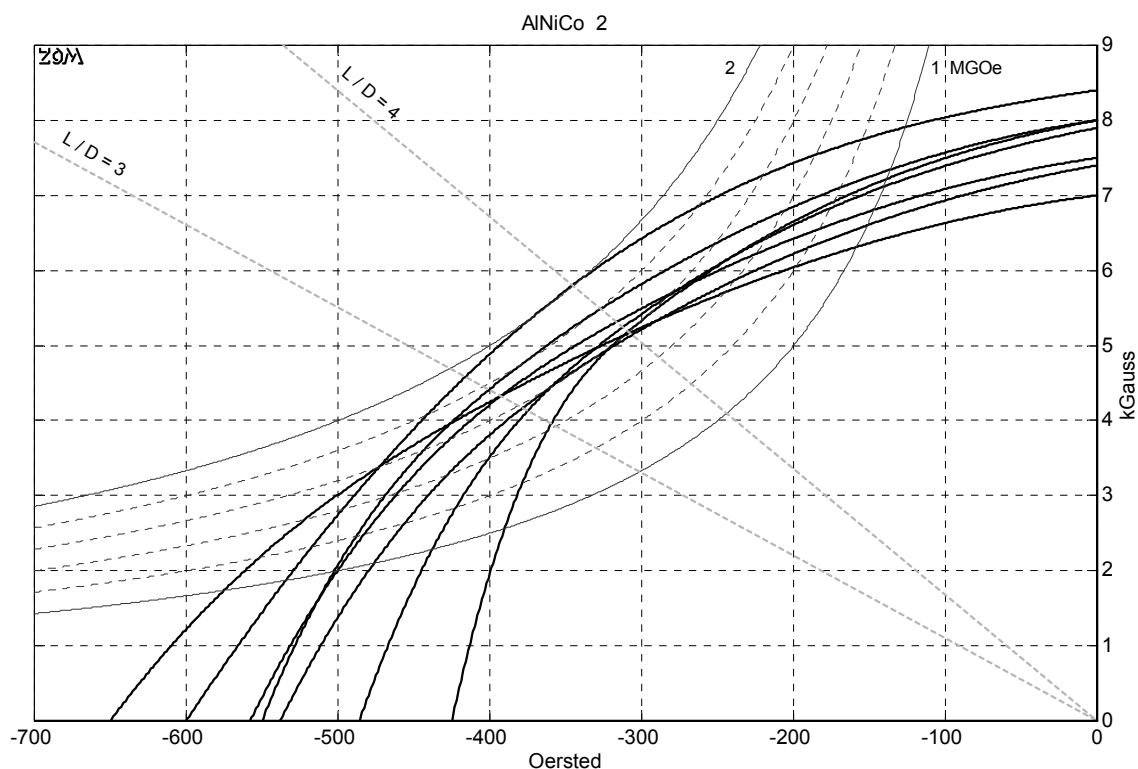


Abb. 4.9: B/H -Kennlinien diverser Alnico-II-Magnete [21 - 23]. $1\text{Oe} = 80\text{A/m}$, $10\text{kG} = 1\text{T}$, $1\text{MGOe} = 8\text{kJ/m}^3$. L/D = Länge / Durchmesser (vergl. Abb. 4.11).

Abb. 4.9 zeigt die B/H -Kurven einiger Alnico-II-Magnete. Die maximale spezifische Energie liegt zwischen $1,6 - 2\text{ MGOe} = 12,8 - 16\text{ kJ/m}^3$. Der Vergleich mit Alnico-III zeigt etwas höhere Werte bei Koerzitiv-Feldstärke und Remanenz.

4.4.1.5 Alnico-V

Alnico-V ist anisotrop und erreicht die höchsten BH_{\max} -Werte aller Alnico-Legierungen [21]. Wegen des gegenüber Alnico-II und -III wesentlich höheren Kobaltgehaltes ist der Preis höher. Alnico-V ist das Standardmaterial fast aller Fender-Tonabnehmer.

Die meisten Werkstoffbücher nennen für Alnico-V folgende Zusammensetzung: ca. 8% Al, 12-15% Ni, 23-25% Co, 0-6% Cu, gelegentlich einige Promille Ti, Si und S, Rest Fe. Die erreichbare Remanenz liegt zwischen 1,1-1,3 T, die Koerzitiv-Feldstärke zwischen 50-62 kA/m, die maximale Energiedichte bei 30-60 kJ/m³. Neben der chemischen Zusammensetzung hat auch der Abkühlvorgang und die Magnetfeldbehandlung großen Einfluss auf die Magnetdaten. Alnico-V ist zumeist anisotrop, und als Guss- oder Sintermagnet erhältlich. Alnico-V gibt es vollständig kornorientiert (Alnico-V-7), und teilweise kornorientiert (Alnico-V-DG). Auf dem internationalen Markt existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Handelsnamen.

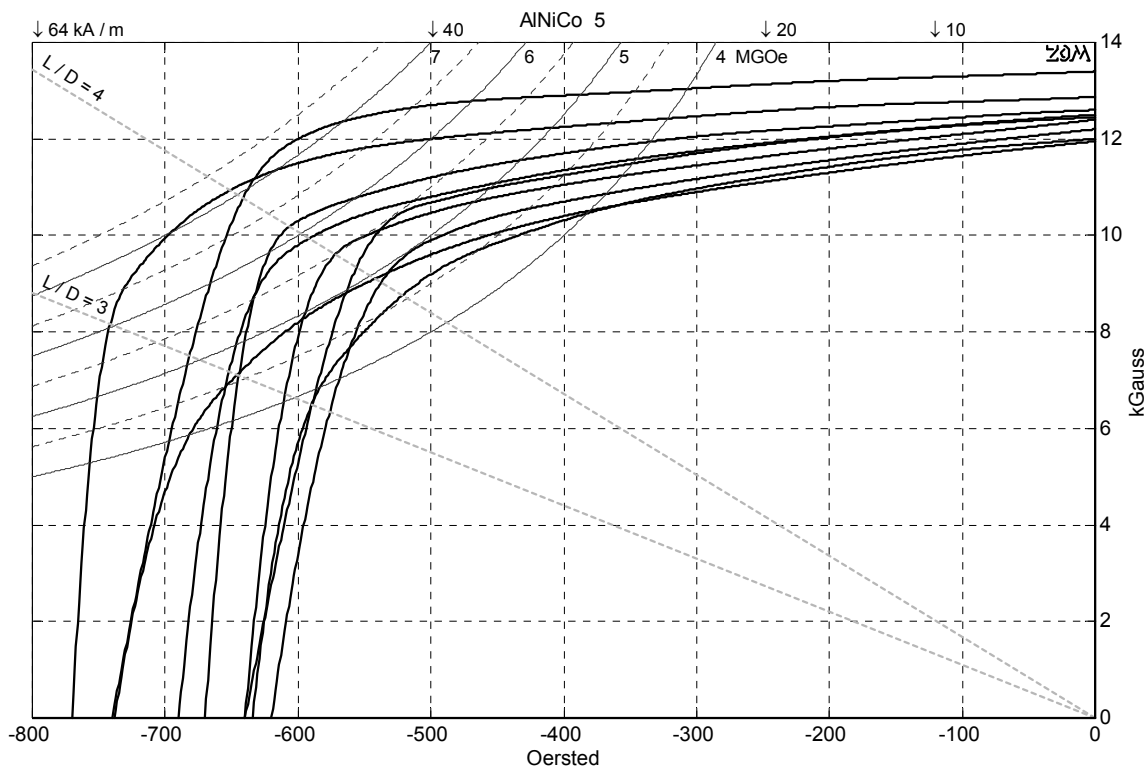


Abb. 4.10: B/H -Kennlinien diverser Alnico-V-Magnete [21 - 23]. $1\text{Oe} = 80\text{A/m}$, $10\text{kG} = 1\text{T}$, $1\text{MGOe} = 8\text{kJ/m}^3$. L/D = Länge / Durchmesser (vergl. Abb. 4.11).

Abb. 4.10 zeigt die B/H -Kurven einiger Alnico-V-Magnete. Gegenüber Abb. 4.8 – 4.9 fällt die wesentlich eckigere Hystereseform auf, die maximale spezifische Energie erreicht Werte zwischen 5 – 7 MGOe = 40 – 56 kJ/m³. Mit aller Vorsicht kann vermutet werden, dass die für Gitarrentonabnehmer verwendeten Alnico-V-Legierungen aus Preisgründen eher bei den kleineren BH_{\max} -Werten zu finden sein werden.

4.4.1.6 Weitere Alnico-Materialien [21]

Alnico-IV hat im Vergleich zu Alnico-I bis -III eine relativ hohe Koerzitiv-Feldstärke, so dass es sich vor allem für (im Verhältnis zum Durchmesser) weniger lange Magnete eignet.

Alnico-VI ging aus Alnico-V hervor, durch mehr Ti (bis zu 5%) steigt die Koerzitiv-Feldstärke bei gleichzeitiger Remanenzabnahme. Eine weitere Steigerung dieser Charakteristik erreicht Alnico-VII.

Alnico-VIII, -IX und -XII enthalten 35% Co. Das teure Kobalt ermöglicht Koerzitiv-Feldstärken bis zu 130 kA/m, die Herstellung ist aber schwierig, das Material ist sehr spröde. Remanenz und maximale Energiedichte sind geringer als bei Alnico-V.

Bei Gitarrentonabnehmern wird zumeist Alnico-V und Alnico-II verwendet, gelegentlich auch Alnico-III.

4.4.1.7 Vergleich ausgewählter Alnico-Materialien

Die meisten Gitarristen möchten Gitarre spielen, und nicht überlegen, ob die Magnete ihrer Gitarrentonabnehmer kristall- oder formanisotrop sind. Und deshalb ist es auch verständlich, wenn die Tonabnehmer-Werbung nicht auf Werkstoffparameter, sondern auf den Klang abzielt. Die Werbebotschaft wirkt einfach kompetenter, wenn Expertenwissen durchschimmert, und Betriebsgeheimnisse offenbart werden. Das liest sich dann so:

Alnico-II:

"Für einen vintage-orientierten, warmen Sound. Da das Magnetfeld etwas schwächer als bei einem normalen Strat-Pickup ist, schwingt die Saite freier und natürlicher aus. Die Folge ist eine Verbesserung im Sustain-Verhalten."

Aber auch: *"Bei dem eher schwachen Alnico-II bricht der Ton förmlich zusammen."*

Oder: *"Pickups mit Alnico-II-Magneten sind in ihrem Klangcharakter weicher, besitzen weniger Höhen, sind leiser, runder und etwas weniger dynamisch."*

Aber auch: *"Der Pickup verliert Dank seines Alnico-2-Magneten nicht an Höhen."*

Oder: *"Alnico-2 entspricht ziemlich genau einem gealterten Alnico-5-Magnet."*

Alnico-V:

"Alnico-V = klarer/kräftiger Sound, drahtigerer Twäng, kräftigere Bässe."

Aber auch: *"Alnico-V = bluesiger Grundcharakter mit angenehm runder Note."*

Sowie: *"Alnico-V = Schnelle Ansprache und leicht undifferenzierte Wiedergabe."*

Oder: *"Stärkere Magnete bringen weniger Höhen."*

Aber auch: *"Der stärkere Alnico-V-Magnet klingt brillanter."*

Alnico-VIII:

"Die größere magnetische Kraft des Alnico-8-Magneten ergibt Sustainverlust."

Aber auch: *"Lautere Pickups verfügen über mehr Sustain."*

Sowie: *"Alnico-8: Der Tonabnehmer hat auch bei starkem Anschlag eine hohe Ausgangsleistung mit geringer Kompression."*

Quellen zu Kap. 4.4.1.7: Gitarre & Bass, Musik Produktiv; Rockinger; E-Gitarren (Day et al.).

Wohl kaum ein Händler, der in seinen **Werbeunterlagen** Tonabnehmer anpreist, macht sich die Mühe, durch Austausch der Magnete die hiervon verursachten Klangunterschiede zu erforschen. Er vergleicht vielleicht zwei Gitarren, eine klingt höhenbetonter als die andere, die eine hat Alnico-V-Magnete in den Tonabnehmern, die andere hingegen Alnico-II-Magnete, und schon ist die Ursache klar. Bzw. der Werbetext fertig. Auch für Fachbuchautoren stellen die Regeln der Physik gelegentlich eine echte Herausforderung dar:

"Nach Angaben von Magnetherstellern sollen sich Alnico-Magnete im Laufe der Jahre nicht wirklich entladen, sondern ihre Gauß-Werte und damit ihre magnetische Kraft über lange Zeit beibehalten. Auf der anderen Seite behauptet die Tonabnehmer-Industrie, dass Fender-ähnliche Pickups bereits nach 2 Jahren und Gibson-ähnliche Pickups nach 3 Jahren merklich an magnetischer Leistung verlieren. Diese scheinbare Diskrepanz lässt sich jedoch erklären, denn offensichtlich scheint dieser vermeintliche Leistungsverlust hauptsächlich ein Nachlassen der "Merkfähigkeit" der Pickup-Magnetizität zu sein. Das bedeutet, dass bei Störungen des Magnetfeldes durch die schwingende Saite die Teilchen älterer Magnete schneller in Unordnung geraten (und dann kurzfristig an magnetischer Kraft verlieren) können als nagelneue Magnete (E-Gitarren, Day et al.)" Natürlich hat ein Magnet eine Kraft, er kann z.B. einen Eisennagel von der Tischplatte wegziehen. Diese Kraft würde man aber nicht in **Gauß**, sondern in Newton messen. Mit der Einheit Gauß wird die magnetische Flussdichte bedacht, was dasselbe Autorenkollektiv jedoch anders definiert: *"Die Maßeinheit der Feldstärke ist das Gauß"*. Nein, zumindest nicht in der wissenschaftlichen Literatur; diese definiert als Maßeinheit der Feldstärke das **Oersted** (Amerika), bzw. A/m (Europa). Day et al. haben aber auch der Maßeinheit Oersted eine Größe zugewiesen: *"Die Widerstandskraft gegen Entmagnetisierung"*. Nicht völlig daneben, hier denkt man an Koerzitivfeldstärke, und die misst man tatsächlich in Oersted bzw. in A/m. Allerdings bietet der Name *"Widerstandskraft"* schon wieder eine Basis für Verwechslungen. Auch *"magnetische Leistung"* ist so ein Begriff, der leicht missverstanden werden kann, denn Leistung misst man in PS, oder Watt, oder Nm/s.

Wenn ein Autor versucht, schwierige technische Zusammenhänge mit einfachen, musikergängigen Begriffen zu erläutern, macht er sich immer angreifbar und riskiert, bei zu rigoroser Vereinfachung kritisiert zu werden. Es hilft aber nicht wirklich, aus Gründen der Vereinfachung eingeführten Bezeichnungen neue Bedeutungen zuzuweisen. Natürlich wird auch der Wissenschaftler kritisiert, der im Bemühen um Exaktheit und Vollständigkeit aus seinen nichtlinearen Differentialgleichungen nicht mehr herausfindet. Deshalb meint auch Udo Pippel in G&B 4/2006: *'Vorsicht also, wenn jemand in Sachen Gitarrenbox mit **Wissenschaft** kommt. Der Mann* hat dann wahrscheinlich was falsch verstanden. Man macht am besten sogar einen großen Bogen um diese Leute.'* Und an anderer Stelle: *'Wozu also der ganze theoretische Quatsch?'* Udo Pippel schreibt allerdings auch: *'Es gibt unzählig dieser Vorurteile, die jedoch schon ähnlich manifestiert erscheinen wie das Kleine Einmaleins. Wer entscheidet eigentlich solchen Mist? Untermauert werden diese Thesen durch zahlreiche Gitarrenbücher von berühmten (oder einfach nur berüchtigten) Gitarrenbauern, die sich dort tatsächlich anmaßen, festzulegen, wie viel eine Telecaster wiegen darf oder wie ein Stratocaster-Pickup eingestellt werden muss'.* Und nochmals aus dem Gitarrenbuch *E-Gitarren*: *'Wenn Pickups sich länger in der Nähe von Wechselstromfeldern wie Transformatoren oder starken Wärmequellen befinden, gerät ihre magnetische Struktur ebenfalls völlig durcheinander und sie altern schneller.'* Ja, ab 500°C wird's tatsächlich kritisch – da gerät aber nicht nur die magnetische Struktur durcheinander, sondern auch der tonerzeugende Gitarrist: Mächtig schnelles Altern!

* Gemeint ist Dr. Bose, Lautsprecher-Entwickler und M.I.T.-Dozent "mit undurchsichtigem Formelwerk."

Es ist klar, dass der Magnet an der Tonerzeugung mit beteiligt ist: Ohne Magnet kein Ton. Es ist auch klar, dass der Magnet selbst nicht klingt. Alnico-II klingt nicht anders als Alnico-V, es klingt gar nicht, wenn nicht die Saite schwingt. Streng wissenschaftlich betrachtet. Man kann aber durchaus den Beckmesser zuhause lassen und weniger elaboriert vom "*Klang des Magneten*" sprechen, wenn man damit seine Wirkung auf die Übertragungseigenschaft meint. Wie "*klingt*" nun Alnico-V? Anders als Alnico-II? Und wenn ja, warum?

Maßgeblich für die in der Wicklung induzierte Spannung ist die *Änderung* der Flussdichte. Ein starkes Magnetfeld bewirkt gar nichts, solange es sich nicht ändert. Damit sich die Flussdichte ändern kann, muss die Saite in einem ortsabhängigen, **inhomogenen Magnetfeld** schwingen. Wäre das Magnetfeld an jedem Ort dasselbe, würde keine Spannung entstehen. Die Inhomogenität des Feldes kann durch das Magnetmaterial beeinflusst werden, aber auch durch die Form des Magneten. Beim Austausch eines Magneten kann sich aber auch die Permeabilität ändern, und damit die Tonabnehmerresonanz. Und/oder die Wirbelstrombedämpfung (Resonanzgüte). Es darf also keinesfalls von einem monokausalen Verhalten ausgegangen werden, bei dem *eine* Ursache *eine* Wirkung hervorbringt, bzw. jede Wirkung auf *eine* Ursache zurückgeführt wird. Die Zusammenhänge sind vielmehr kompliziert und multifaktoriell.

Die Schwierigkeiten beginnen schon bei der Materialspezifikation. Abb. 4.10 zeigt, dass es verschiedene Alnico-V-Legierungen gibt. In der Tonabnehmer-Literatur finden sich aber keine Hinweise auf Untergruppen, nur eben: "Alnico-V". "The holy grail". "The originally PAF". Obwohl nicht einmal Seth Lover sagen konnte, welches Magnetmaterial wann verbaut wurde. Und wieviele Windungen da draufgewickelt wurden. Hatte Eric's Lieblings-Paula nun Alnico-II oder Alnico-V? Leider ist sie ja nicht mehr auffindbar (bzw. hängt in Japan, in ca. 17 Tresoren – und jede ein Original!). Kommt nun der überirdische Klang der Roy-B-Gitarre vom Alnico-III-Magnet, oder davon, dass schon alte Telecaster-Pickups mit Widerständen jenseits der 11-Kilo-Ohm-Marke gesichtet wurden? Oder doch vom Gitarrist??

Abb. 4.11 fasst die **Hysteresestreuungen** zusammen. In dieser Grafik wurden auf der Basis vieler Alnico-Werkstoffe Gebiete definiert, in denen die Hystereseschleifen verlaufen. Man erkennt die Streuungen, und die grundsätzlichen Unterschiede. Alnico-II ist geringfügig stärker als Alnico-III, aber deutlich schwächer als Alnico-V. **Abb. 4.11b** unternimmt den Versuch, aus der Vielzahl der Möglichkeiten Einzelkurven anzugeben – ohne aber den Beweis liefern zu können, dass gerade diese Kurven die authentischen bzw. bestgeeigneten sind.

Beim Vergleich unterschiedlicher Magnetmaterialien ist zuallererst zu definieren, in welchen Magnetkreis der Magnet eingebaut wird: Singlecoil oder Humbucker (oder Sonderbauform). Singlecoil-Tonabnehmer mit Zylindermagneten, wie sie ursprünglich für die Stratocaster entwickelt wurden, haben außer dem Magnet keine weiteren Ferromagnetika. Der magnetische Lastwiderstand wird durch die Form des Magneten definiert, bzw. streng genommen durch die Form des ihn umgebenden Luftraumes. Häufig beträgt das Länge/Durchmesser-Verhältnis ca. 4, woraus ein **Arbeitspunkt** nahe des Hystereseknies resultiert. **Abb. 4.11** zeigt zwei Lastgeraden für $L/D = 3$ und $L/D = 4$. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass Literaturangaben differieren [23, 25], und die Neigung der Geraden durch Nachbarmagnete verringert wird. Grob vereinfacht kann trotzdem gefolgert werden: Bei Tonabnehmern mit Zylindermagneten erzeugt Alnico-V ein Magnetfeld, das ungefähr doppelt so stark ist wie das von Alnico-II oder Alnico-III. Die in der Abbildung am Schnittpunkt abzulesende Flussdichte entsteht aber nicht am Ort der Saite, sondern im Zentrum des Magneten (neutrale Ebene, Kap. 5.4.1).

Wäre der Magnetkreis ein lineares System, ergäbe sich ein einfacher Zusammenhang: Die Saitenschwingung verändert den magnetischen Widerstand z.B. um 1%, und damit auch den Fluss um 1%. Verdoppelt man durch Austausch des Magneten den statischen Fluss, so verdoppelt sich damit auch der absolute Wechselfluss, und folglich verdoppelt sich auch die induzierte Spannung – der erzeugte Ton wird lauter, und ggf. verzerrter. Da der Magnetkreis aber nichtlinear ist, wird bei Flussverdoppelung die Spannung etwas weniger als verdoppelt. Gleichzeitig verkürzt sich die Magnet-Aperturlänge (Kap. 5.4.4), und der aperturbedingte Höhenabfall wirkt sich schwächer aus, d.h. der Tonabnehmer klingt minimal brillanter. Ein zusätzlicher Brillanzgewinn könnte beim Singlecoil mit **Zylindermagneten** aus der Tatsache entstehen, dass stärkere Magnete eine kleinere reversible Permeabilität besitzen – die Induktivität wird dadurch kleiner, die Resonanzfrequenz des Tonabnehmers höher, die Resonanz-Güte minimal größer (Kap. 5.9.3). Als gegenläufiger Prozess wird aber wegen stärkerer Wirbelströme ein Höhenverlust eintreten: Die elektrische Leitfähigkeit von Alnico-V ist ca. 40% größer als die von Alnico-II. Welcher Effekt überwiegt, ist schwer vorhersagbar, in den meisten Fällen wird der stärkere Magnet wohl einen leichten Brillanzgewinn bewirken.

Bei Singlecoil-Tonabnehmern mit **Balkenmagnet** ist das Magnetfeld am Ort der Saite schwächer als bei Singlecoil-Tonabnehmern mit Zylindermagneten. Die Magnet-Aperturlänge ist deshalb tendenziell größer, der aperturbedingte Höhenabfall etwas stärker. Die reversible Permeabilität des Magneten spielt fast keine Rolle, er wird nämlich von keinem nennenswerten Wechselfluss durchströmt. Beispielsweise ändert sich der Impedanzfrequenzgang des SDS-1 nicht messbar, wenn die beiden Balkenmagnete entfernt werden. Beim P-90 haben die Magnete einen kleinen Einfluss, sie vergrößern die Spuleninduktivität um ca. 10%.

Beim Gibson-typischen **Humbucker** haben die Magnete fast keinen Einfluss auf die Tonabnehmer-Impedanz. Das in ihnen fließende magnetische Wechselfeld ist unbedeutend, und deshalb spielen reversible Permeabilität und Wirbelstromdämpfung praktisch keine Rolle. Magnet-Apertur und absolute Empfindlichkeit hängen hingegen – wie beim Singlecoil – von der Magnetstärke ab. Der Arbeitspunkt vieler Alnico-bestückter Humbucker liegt unterhalb des Hysterese-Knies, in einem eigentlich unzuweckmäßigen Bereich. Die in Kap. 5.4.1 angegebene Tabelle zeigt, dass die statischen Magnetflussdichten der untersuchten Humbucker kleiner sind als die der meisten Singlecoils.

Mechanische Eigenschaften von Alnico-Magneten:

Dichte: Ungefähr 7 g/cm^3 .

Härte: 45 – 60 HRC, spröde, Bruchgefahr, formbar nur durch Gießen u/o Sintern + Schleifen.

Spez. Widerstand: $0.45 - 0.7 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Alnico-V leitet etwas besser als Alnico-II.

Zum Vergleich: Neusilber = $0.3 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, Cu = $0.018 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, Fe = $0.1 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

Keramikmagnete (Ferrite) sind hingegen Nichtleiter.

Reversible relative Permeabilität: Ca. 4 – 6, bei stärkeren Magneten tendenziell kleiner.

Alnico zeigt gute Korrosionsbeständigkeit, ist aber nicht vollkommen rostbeständig.

Sintermagnete haben höhere mechanische Festigkeit als Gussmagnete, ihre magnetischen Daten sind aber etwas schlechter. Falls die Gussmagnete aber Lunkereinschlüsse (Hohlräume) aufweisen, ist auch deren Qualität reduziert.

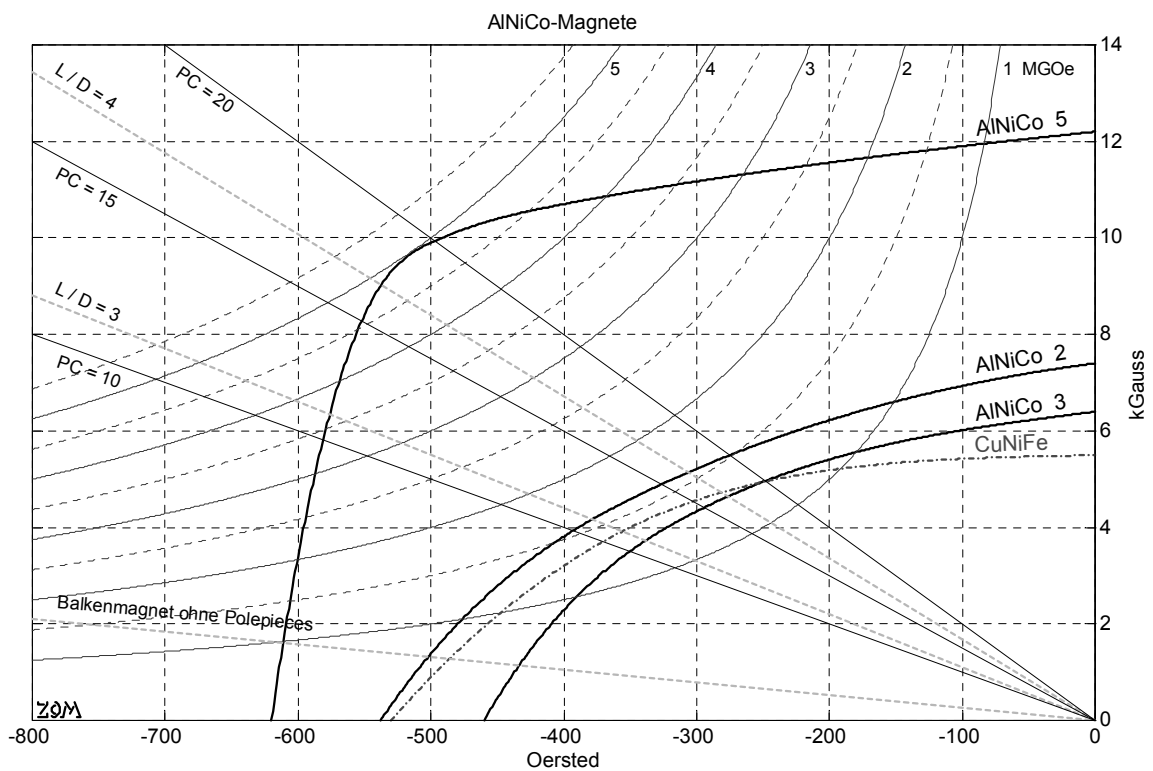
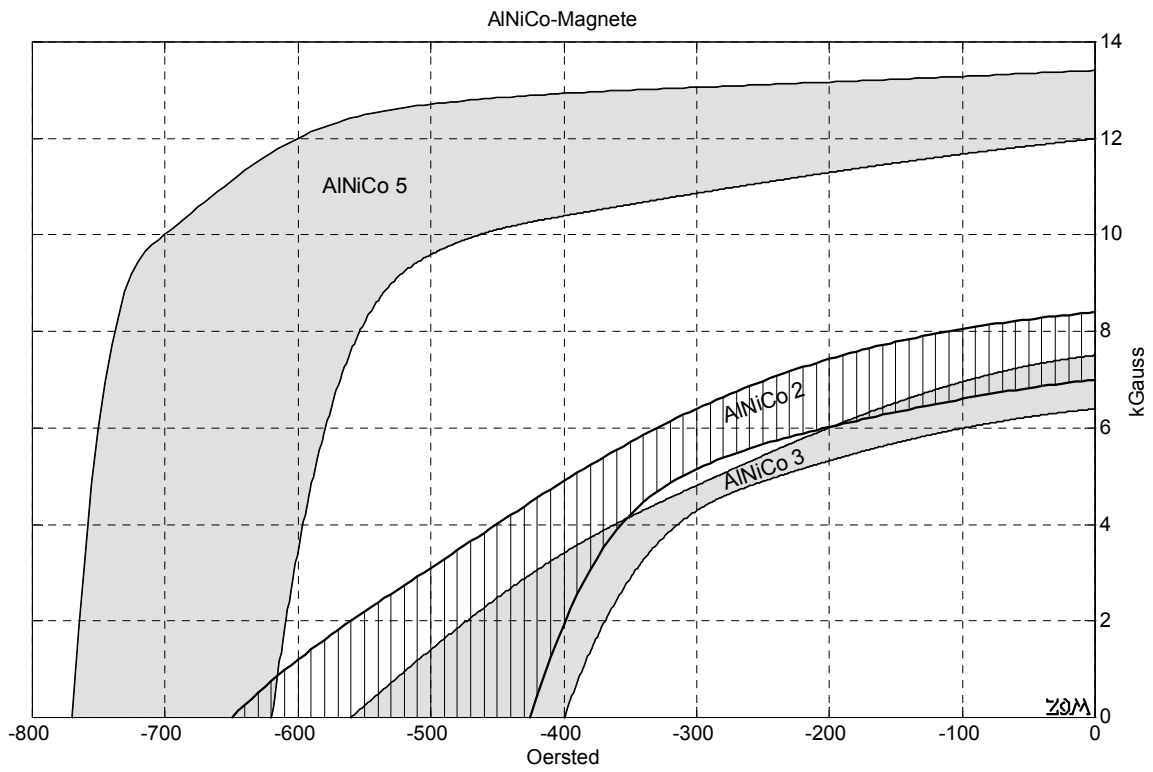


Abb. 4.11: B/H -Bereiche typischer AlNiCo-Magnete; in diesen Bereichen verlaufen die Hysteresekurven (oben).
 Unteres Bild: B/H -Kurven von AlNiCo-Gussmagneten, aus alten Datenblättern. $1\text{Oe} = 80\text{A/m}$, $10\text{kG} = 1\text{T}$.
 L/D = Länge / Durchmesser. PC = Permeance Coefficient