

9 Bestimmung der relativen Permeabilität μ_r magnetischer Werkstoffe

9.1 Einführung

Die magnetische Permeabilität ist eine abgeleitete SI-Größe, welche die Durchlässigkeit von Materie für magnetische Felder angibt. Wenn ein elektrischer Strom fließt d.h. elektrische Ladung bewegt wird, so wird ein magnetisches Feld erzeugt. Das magnetische Feld ist durch gewisse Eigenschaften an jedem Punkt des von ihm eingenommenen Raumes gekennzeichnet. Zur grafischen Darstellung des magnetischen Feldes bedient man sich so genannter in sich geschlossener Feldlinien, welche die Richtung der wirkenden Kraft anzeigen. Fließt nun ein elektrischer Strom durch einen elektrischen Leiter, so bildet sich in dessen Umgebung ein Magnetfeld, und zwar so, dass die Feldlinien den elektrischen Strom im Sinne einer Rechtschraube umfassen (Abb. 9.1 a). Wickelt man nun einen elektrischen Leiter zu einer Spule, so konzentrieren sich

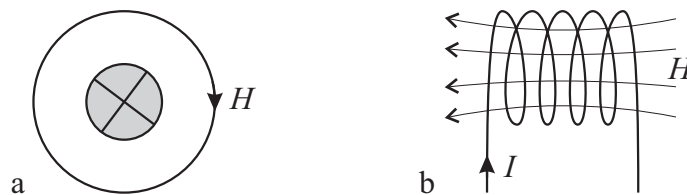


Abbildung 9.1: a) Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters; b) Magnetfeld im Inneren einer stromdurchflossenen Spule

die magnetischen Feldlinien im Inneren dieser Spule (Abb. 9.1 b). Man spricht von einem gerichteten Magnetfeld. Das magnetische Feld hat an jeder Stelle des Raumes eine bestimmte Richtung und Intensität, die eine von außen messbare Kraftwirkung bestimmen. Diese Feldintensität hat die Bezeichnung “magnetische Induktion” oder “magnetische Flussdichte” und wird mit dem Formelzeichen B [Vs/m^2] gekennzeichnet. Um einen Zusammenhang zwischen dem Entstehen des magnetischen Feldes und dem verursachenden Strom zu erhalten, führt man eine neue Größe ein, die sogenannte magnetische Erregung bzw. magnetische Feldstärke H [A/m]. B und H sind voneinander abhängig und über die magnetische Feldkonstante, die sogenannte absolute Permeabilität μ_0 miteinander verknüpft:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (9.1)$$

mit

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \quad (9.2)$$

Dies gilt für eine Spule, die sich ausschließlich im Vakuum befindet. Wird nun in das Innere der stromdurchflossenen Spule aus Bild 1b Materie eingebracht, so wird dadurch das magnetische

Feld beeinflusst. Diese Beeinflussung wird durch einen materialabhängigen Wert beschrieben, die relative Permeabilität μ_r . Es gilt dann die Beziehung:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu \cdot H \quad (9.3)$$

Der Einfluss der Materie auf die Ausbildung des magnetischen Feldes ist auf die Wirkung von Elektronenringströmen im Innern der Atome zurückzuführen, die einerseits infolge der Bewegung der Elektronen um die Atomkerne und andererseits durch die Rotation der Elektronen um die eigene Achse (Spin) auftreten.

9.1.1 Werkstoffgruppen

Man unterscheidet hinsichtlich der Größe der relativen Permeabilität 3 verschiedene Fälle:

Diamagnetismus Diamagnetisch nennt man Materialien, die die Tendenz haben, aus einem Magnetfeld herauszuwandern, bzw. bei denen die Dichte der Feldlinien eines extern angelegten Magnetfeldes in der Probe abnimmt. Wenn ein äußeres magnetisches Feld auf Materie einwirkt, kann man sich modellhaft vorstellen, dass in jedem Atom oder Molekül ein Kreisstrom induziert wird, oder dass ein Elektron auf seiner "Kreisbahn" um den Atomkern und durch "Rotation um sich selbst" ein Magnetfeld erzeugt, das dann ausgerichtet wird.

Beim Diamagnetismus hat man eine Permeabilität $\mu_r < 1$.

Materialien: Halogene, Halbleiter (Si, Ge, Br), Cu, Au, sowie W.

Paramagnetismus Paramagnetische Substanzen zeigen die Tendenz, in ein Magnetfeld hineinzuwandern. Wird eine unbewegliche, paramagnetische Probe in ein externes Magnetfeld eingebracht, so verdichten sich dessen Feldlinien innerhalb der Probe. Paramagnetisches Verhalten findet man bei Substanzen mit ungepaarten Elektronen, z. B. elementarem Sauerstoff, da sich die Spinnmomente der Elektronen parallel zum äußeren Magnetfeld ausrichten und dieses so verstärken. Nicht nur der Spin, auch der Bahndrehimpuls, der ungepaarten Elektronen steuert einen Anteil zum Paramagnetismus bei. Alle Substanzen haben einen diamagnetischen Anteil, der aber durch den meist um zwei Zehnerpotenzen größeren paramagnetischen Anteil überwogen wird. In der Summe ergibt sich dann paramagnetisches Verhalten. Dieses ist temperaturabhängig und nimmt mit steigender Temperatur ab, da die zunehmende Wärmebewegung der Teilchen zu einer größeren Unordnung der Spin-Orientierung führt.

Beim Paramagnetismus hat man eine Permeabilität $\mu_r > 1$.

Materialien: Alkalimetalle, Tb, Gd, Sauerstoff.

Ferromagnetismus Der Ferromagnetismus beschreibt ein kooperatives Phänomen von Festkörpern, welches dadurch charakterisiert ist, dass elementare magnetische Momente eine

parallele Ordnung aufweisen. Die Bereiche gleicher Magnetisierung werden *weiß'sche Bezirke* oder auch *Elementarmagnete* genannt. Sie treten in Größen von 0,01 mm bis 1 mm auf und sind im unmagnetisierten Zustand nicht einheitlich orientiert. Die Übergangsbereiche zwischen den weiß'schen Bezirken, in denen sich die Magnetisierung ändert, heißen *Blochwände*. Deren Verschiebung entspricht der Magnetisierung der Substanz und ist mit einem Arbeitsaufwand verbunden. Die *Arbeit*, die benötigt wird um die weiß'schen Bezirke gleich auszurichten (z.B. durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes), kann aus der *Fläche der Hysteresekurve* ermittelt werden.

Beim Ferromagnetismus hat man eine Permeabilität $\mu_r \gg 1$.

Materialien: Fe, Co, sowie Ni.

Von technischer Bedeutung ist hier der für Eisen typische Ferromagnetismus, der im wesentlichen noch bei Kobalt und Nickel zu finden ist. Diese Stoffe sind wegen ihrer sehr großen Permeabilität ($\mu_r(\text{Eisen}) = 1000$) in der elektrotechnischen Anwendung insbesondere für Übertrager und Transformatoren von Bedeutung.

9.1.2 Hysterese, Neukurve, Sättigungsmagnetisierung, Remanenz, Koerzitivfeldstärke

Mit Gl. 9.3 sind Induktion B und Feldstärke H durch eine eindeutige Beziehung in Zusammenhang gebracht. Diese Beziehung gilt tatsächlich für dia- und paramagnetische Stoffe. Bei einer Reihe von Stoffen, zu denen in erster Linie Eisen, Kobalt und Nickel zählen, besteht erstens keine Linearität zwischen B und H , und zweitens steht der Wert der magnetischen Induktion B nicht eindeutig in Zusammenhang mit der magnetischen Feldstärke H . Vielmehr hängt B von der Art und Weise ab, wie der entsprechende Wert von H erreicht wurde, d.h. von der Vorgeschichte des Magnetisierungsvorgangs. Den Zusammenhang zwischen der magnetischen Induktion B und der magnetischen Feldstärke H gibt man in diesen Fällen durch die Magnetisierungskurve (Hysteresekurve), die die Beziehung $B = f(H)$ veranschaulicht, an. Kenngrößen dieser Kurve sind unter anderem die Sättigungsmagnetisierung B_S , die Remanenz B_R , sowie die Koerzitivfeldstärke H_C .

Die in Bild 9.2 dargestellte Neukurve ergibt sich, wenn ein magnetischer Werkstoff vom unmagnetischen Zustand ausgehend magnetisiert wird. Dieser Zustand liegt vor, wenn das Material über seinen Curiepunkt erhitzt worden ist. Meist genügt auch ein sorgfältiges abmagnetisieren mit Wechselfeldern. Die Neukurve ist praktisch mit der Kommutierungskurve identisch, welche die Verbindungslinie der Endpunkte (B_S) aller Hysteresekurven, bei zunehmender bzw. abnehmender Ansteuerung, darstellt.

Im Material selbst treten verschiedene Prozesse auf, sogenannte Wandverschiebungen und Drehprozesse, die zum Teil irreversibel sind. Man erhöht H solange, bis das Material vollständig

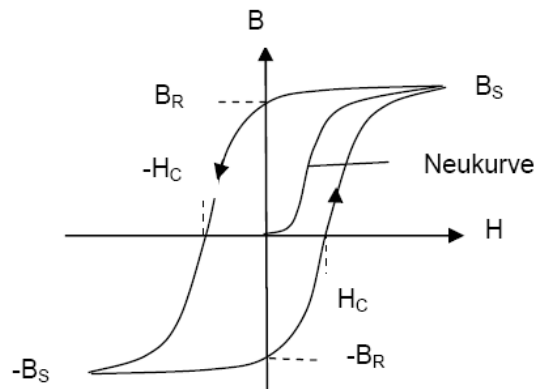


Abbildung 9.2: Hysterese eines ferromagnetischen Werkstoffs

magnetisiert ist (Sättigungsmagnetisierung B_S). Verkleinert man nun H , so nimmt auch die magnetische Induktion B ab. Dies geschieht jedoch nicht entlang des gleichen Kurvenzuges wie bei steigender Feldstärke, sondern selbst wenn der Strom verschwindet und H zu Null wird bleibt im Material eine gewisse Restmagnetisierung vorhanden, die so genannte Remanenz B_R . Das Nachlaufen von B hinter H nennt man Hysterese. Um die Remanenz zum Verschwinden zu bringen, d.h., das Material wieder zu entmagnetisieren, muss man eine magnetische Feldstärke der Größe H_C in entgegengesetzter Richtung aufwenden. Die Feldstärke H_C nennt man Koerzitivfeldstärke. Nach ihrer Größe teilt man die Stoffe auch in magnetisch harte ($H_C > 50 \text{ A/cm}$) und magnetisch weiche ($H_C < 10 \text{ A/cm}$) Materialien ein. Bei weiterer Erhöhung von H in entgegengesetzter Richtung erhält man auch eine entsprechend umgekehrte Magnetisierung $-B_S$. Erfolgt nun eine Vergrößerung der magnetischen Feldstärke in positiver Richtung, so bleibt die Induktion B wieder hinter der Feldstärke zurück, so dass der Bereich $-B_S$ bis H_C durchlaufen wird. Steigt H weiter, so erhält man eine Schleife, die Hystereseschleife /-kurve genannt wird. Bei Anlegen einer wechselförmigen magnetischen Anregung der Frequenz f wird die Hysterese des ferromagnetischen Materials periodisch durchlaufen.

Die Hysteresekurve zeigt also den Zusammenhang zwischen der magnetischen Feldstärke und der magnetischen Induktion für einen geschlossenen Ummagnetisierungszyklus, welcher entsteht, sobald eine Spule an eine Wechselspannungsquelle angeschlossen ist. Ihre Form ist stark vom Werkstoff abhängig. Weichmagnetische Werkstoffe zeichnen sich durch eine sehr schmale Hysteresekurve aus, wogegen hartmagnetische Werkstoffe, wie Dauermagnete, eine sehr breite Hysteresekurve besitzen. Im Verlauf der einzelnen Magnetisierungszyklen wird ein bestimmter Energiebetrag verbraucht, welcher der Magnetisierungsstromquelle entnommen wird. Diese Energie wird im Magnetwerkstoff in Wärme umgesetzt und man bezeichnet sie als Ummagnetisierungsverluste oder auch Hystereseverluste. Diese Verluste entsprechen der von der Hysteresekurve umschlossenen Fläche.

9.2 Vorbereitungen

9.2.1 Allgemein

Bereiten Sie sich mit Hilfe der Einleitung, den Vorlesungsunterlagen und mit weiteren Quellen (Bibliothek, Internet) ausführlich vor. Sollten Fragen offen bleiben, wenden Sie sich bitte rechtzeitig an einen Betreuer oder Herrn Schneider, R. -1325, WA 73.

9.2.2 Fragen zur Vorbereitung

Beantworten Sie bitte zur Vorbereitung dieses Versuches schriftlich folgende Fragen:

1. Erläutern Sie bitte folgende Begriffe:
 - Magnetfeld/magnetische Induktion
 - Permeabilität
 - Elementarmagnet/Weiß'sche Bezirke/Blochwände
 - Hysterese
 - Neukurve
 - Sättigungsmagnetisierung/Remanenz/Koerzitivfeldstärke
 - Magnetisierungsverluste
2. Beschreiben Sie den Vorgang der Magnetisierung, angefangen vom entmagnetisierten Zustand, anhand des Verlaufes der Hysteresekurve.
3. Was versteht man unter Anfangspermeabilität?
4. Zeichnen Sie den qualitativen Verlauf von $\mu_r(H)$ und $\mu_r(f)$.

9.3 Versuchsdurchführung

Ziel dieses Versuchs ist die Bestimmung der relativen Permeabilität μ_r . Bei ferromagnetischen Werkstoffen ist dies stark von der magnetischen Feldstärke H und von der Frequenz f abhängig. Im Laufe des Versuchs werden wir die Hysteresekurve zweier entsprechender Materialien bei unterschiedlicher Aussteuerung aufnehmen. Hieraus ergeben sich charakteristische Kenngrößen wie Sättigungsmagnetisierung, Remanenz oder Koerzitivfeldstärke. Weiterhin werden die Neukurven aufgenommen und in der Folge die relative Permeabilität als Funktion der magnetischen Feldstärke $\mu_r = f(H)$ skizziert.

Wie aus Gleichung 9.3 ersichtlich ergibt sich μ_r aus der Bedingung

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} \quad (9.4)$$

Zur Messung von H und B greifen wir auf eine Übertrageranordnung nach Abb. 9.3 zurück. Primärseitig besteht die Schaltung aus einem Funktionsgenerator der über einen Widerstand

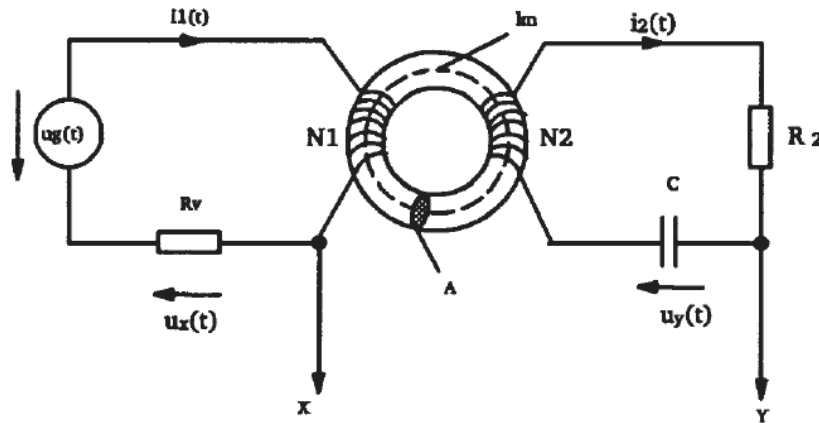


Abbildung 9.3: Schaltung zur Darstellung der Hysterese

(Messshunt R_V) mit der Primärwicklung (Windungszahl N_1) verbunden ist. Der Spannungsabfall über R_V ist proportional der eingprägten magnetischen Feldstärke H . Zusammen mit der mittleren Feldlinienlänge l_m ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$H(t) = \frac{N_1 \cdot i_1(t)}{l_m} = \frac{N_1}{l_m \cdot R_V} \cdot u_x(t) = K_H \cdot u_x(t) \quad (9.5)$$

mit

$$l_m = \frac{d_i + d_a}{2} \cdot \pi \quad (9.6)$$

Sekundärseitig wird die Ausgangsspannung auf einen R - C -Tiefpass gegeben. Nach dem Induktionsgesetz gilt:

$$u(t) = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (9.7)$$

Hieraus ist ersichtlich, dass die in der Sekundärwicklung (Windungszahl N_2) induzierte Spannung der zeitlichen Ableitung der magnetische Induktion B proportional ist. Durch Integration mit Hilfe der Tiefpassschaltung

$$u_y(t) = \frac{1}{RC} \int u_{ind} \cdot dt \quad (9.8)$$

ergibt sich

$$B(t) = \frac{R_2 \cdot C}{N_2 \cdot A} \cdot u_y(t) = K_B \cdot u_y(t) \quad (9.9)$$

A bezeichnet hierbei die Querschnittsfläche der Probe.

9.3.1 Aufnahme der Hysteresekurve

Bauen Sie die Schaltung gemäß Abb. 9.3 auf. Als Generatorspannung $U_g(t)$ dient die Spannung eines Funktionsgenerators die über einen Leistungsverstärker zur Verfügung gestellt wird. Zur Darstellung wird ein Oszilloskop im x-y-Betriebsmodus verwendet. Der Spannungsabfall u_x über R_V liefert die Auslenkung in x-Richtung, der Spannungsabfall u_y über C sorgt für die y-Auslenkung – Kontaktieren Sie das Oszilloskop entsprechend.

Protokollieren Sie die Parameter Ihres Aufbaus und der von Ihnen zu vermessenen Proben. Siehe hierfür auch Tabelle 9.1 auf Seite 125.

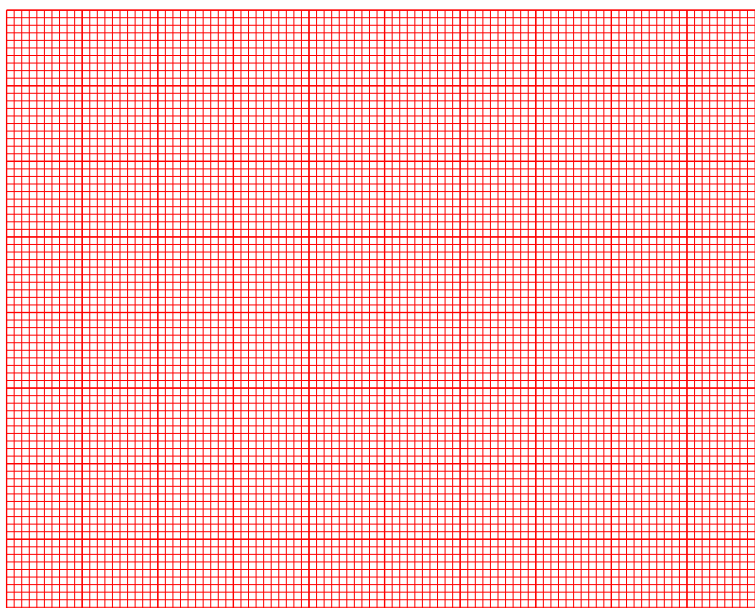
Probe 1:	
-----------------	--

d_a / mm	d_i / mm	h / mm	R_V / Ω	N_1 / [-]	N_2 / [-]	R_2 / Ω	C / nF

Funktionsgenerator:	Frequenz f	Generatorspannung $U_{g_{ssmax}}$
Einstellung für Probe 1:		

Nach Abnahme durch den Betreuer nehmen Sie die Schaltung in Betrieb:

Stellen Sie eine vollständige Hysteresekurve möglichst formatfüllend auf dem Oszilloskop dar und skizzieren Sie diese Darstellung. Protokollieren Sie die Einstellungen des Oszilloskops.



Lesen Sie die entsprechenden Spannungswerte für B_S , B_R und H_C ab und errechnen Sie unter Zuhilfenahme der Hilfsgrößen K_H und K_B die eigentlichen Werte.

l_m / mm	A / m^2	$K_H / \frac{\text{A}}{\sqrt{\text{m}}}$	$K_B / \frac{\text{s}}{\text{m}^2}$	$\mu_0 / \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$
				$0.4 \cdot \pi \cdot 10^{-6}$

	Spannung U / V	berechnete Werte
Sättigungsmagnetisierung B_S		
Remanenz B_R		
Koerzitivfeldstärke H_C		

9.3.2 Bestimmung der relativen Permeabilität μ_r

Es soll die relative Permeabilität μ_r in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke H gemessen und anschließend in einem Diagramm dargestellt werden. Hierzu wird wieder der Aufbau aus 9.3.1 verwendet.

In der Folge werden nun die Messwerte für die Ermittlung von H und B aufgenommen. Gemessen wird immer zwischen den Maximalpunkten — bei voller Aussteuerung also zwischen B_S und $-B_S$. Es werden somit die Werte U_{xpp} und U_{ypp} in Abhängigkeit von der Generatorspannung U_g auf dem Oszilloskop abgelesen.

$$U_{xpp} = 2U_{xp} = 2U_x \quad \text{sowie} \quad U_{ypp} = 2U_{yp} = 2U_y \quad (\text{p für engl. Peak = Spitze}) \quad (9.10)$$

Zur leichteren Messung wird die Hysteresekurve auf dem Oszilloskopschirm verschoben und somit nicht immer symmetrisch angezeigt. So ist es wichtig erst U_{pp} zu messen und dann auf U_p umzurechnen!

Kontrollieren Sie regelmäßig die Symmetrie des Verstärkers und regeln Sie diese nach! Fragen Sie hierzu Ihren Betreuer!

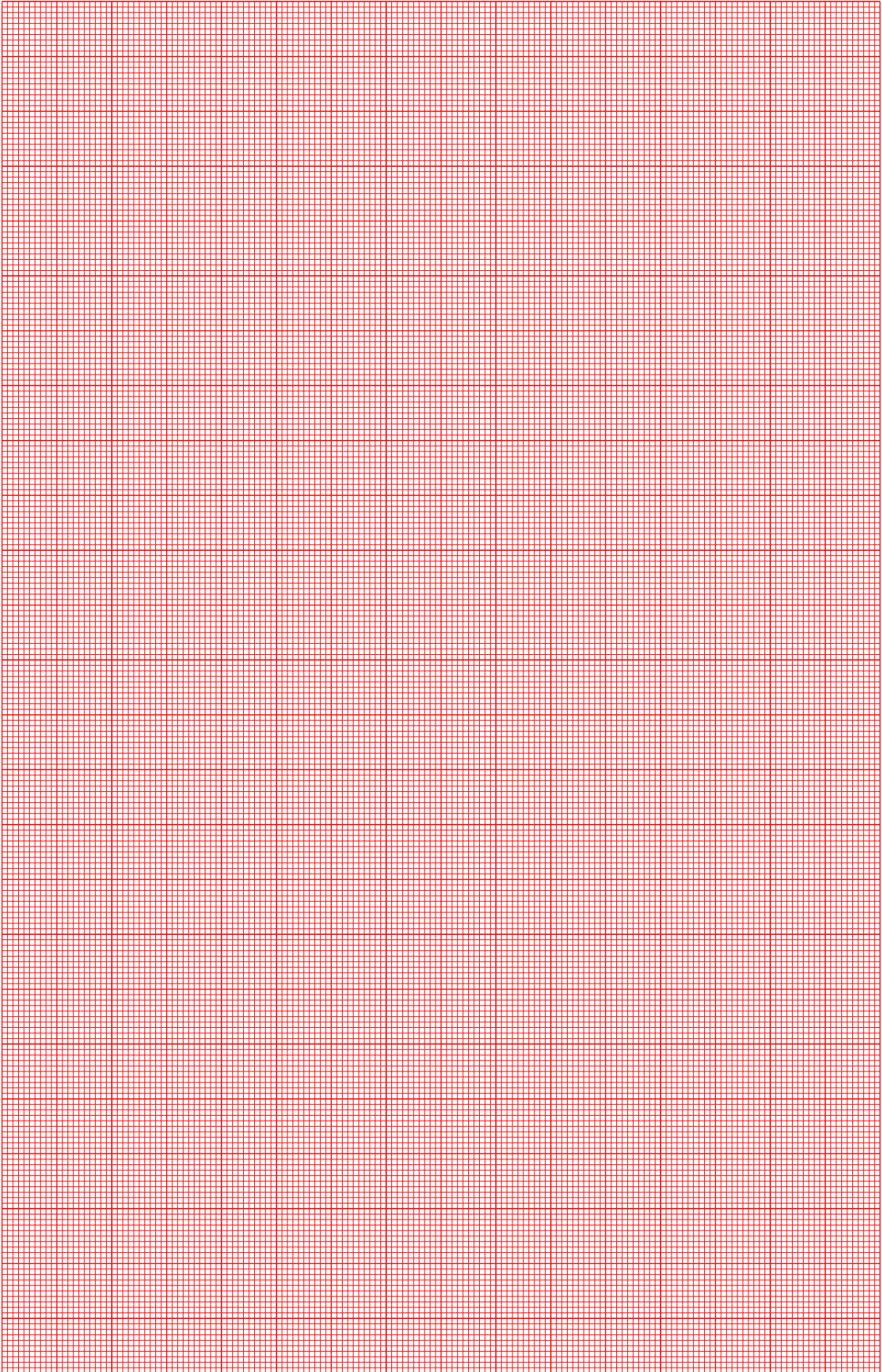
U_g ist nun von $U_{g_{ssmax}}$ startend in 0,2V Abständen zu verringern und die abgelesenen Werte sind in die Tabelle einzutragen. Weiterhin sollen die magnetische Induktion B , sowie die magnetische Feldstärke H ermittelt und damit die relative Permeabilität μ_r bestimmt werden.

In den folgenden beiden Diagrammen sind die Funktionen $\mu_r = f(H)$ sowie $B = f(H)$ grafisch darzustellen.

Interpretieren Sie die μ_r -Kurve.

Was stellt die zweite Kurve $B = f(H)$ dar?





9.3.3 Aufnahme der Hysteresekurve und Bestimmung der relativen Permeabilität μ_r für die zweite Probe

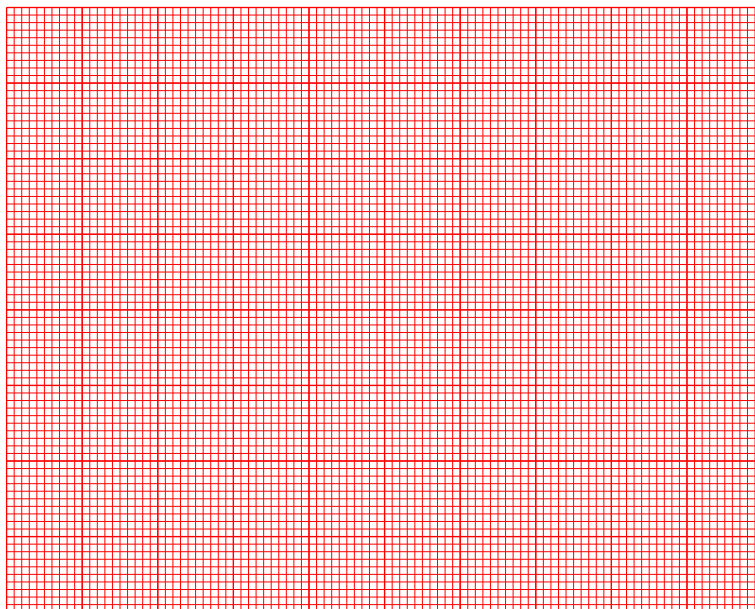
Protokollieren Sie die Parameter Ihres Aufbaus und der von Ihnen zu vermessenen Proben. Siehe hierfür auch Tabelle 9.1 auf Seite 125.

Probe 2:	
-----------------	--

d_a /mm	d_i /mm	h /mm	R_V /Ω	N_1 /[-]	N_2 /[-]	R_2 /Ω	C /nF

Funktionsgenerator:	Frequenz f	Generatorspannung U_{gssmax}
Einstellung für Probe 2:		

Nach Abnahme durch den Betreuer nehmen Sie die Schaltung in Betrieb und skizzieren Sie die Darstellung. Protokollieren Sie die Einstellungen des Oszilloskops.



Lesen Sie die entsprechenden Spannungswerte für B_S , B_R und H_C ab und errechnen Sie unter Zuhilfenahme der Hilfsgrößen K_H und K_B die eigentlichen Werte.

Zur Bestimmung der relativen Permeabilität μ_r ist U_g wieder von U_{gssmax} startend in 0,2V Abständen zu verringern und die abgelesenen Werte in die Tabelle einzutragen. Weiterhin sollen

l_m / mm	A / m^2	$K_H / \frac{\text{A}}{\sqrt{\text{m}}}$	$K_B / \frac{\text{s}}{\text{m}^2}$	$\mu_0 / \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$
				$0.4 \cdot \pi \cdot 10^{-6}$

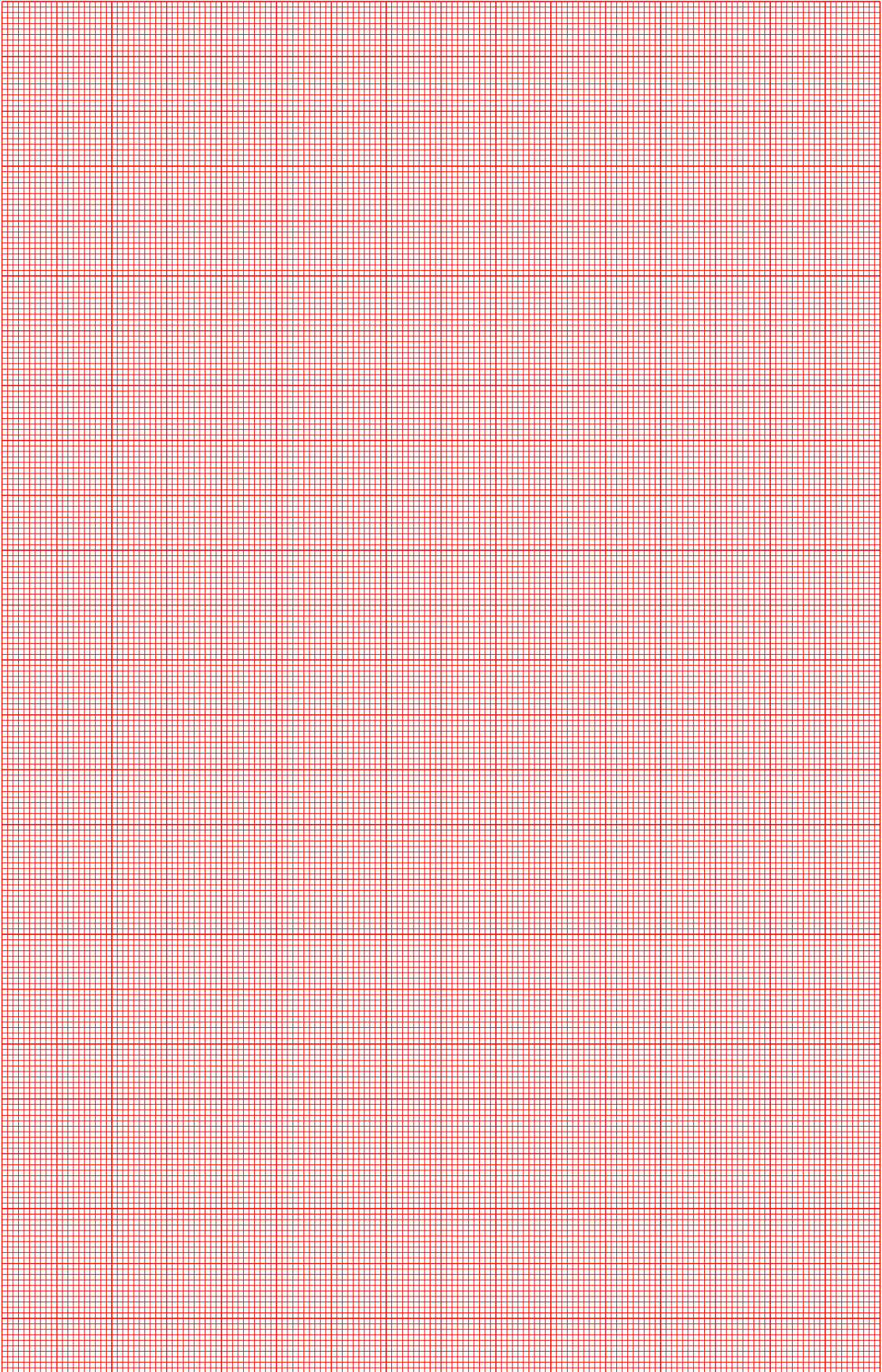
	Spannung U / V	berechnete Werte
Sättigungsmagnetisierung B_S		
Remanenz B_R		
Koerzitivfeldstärke H_C		

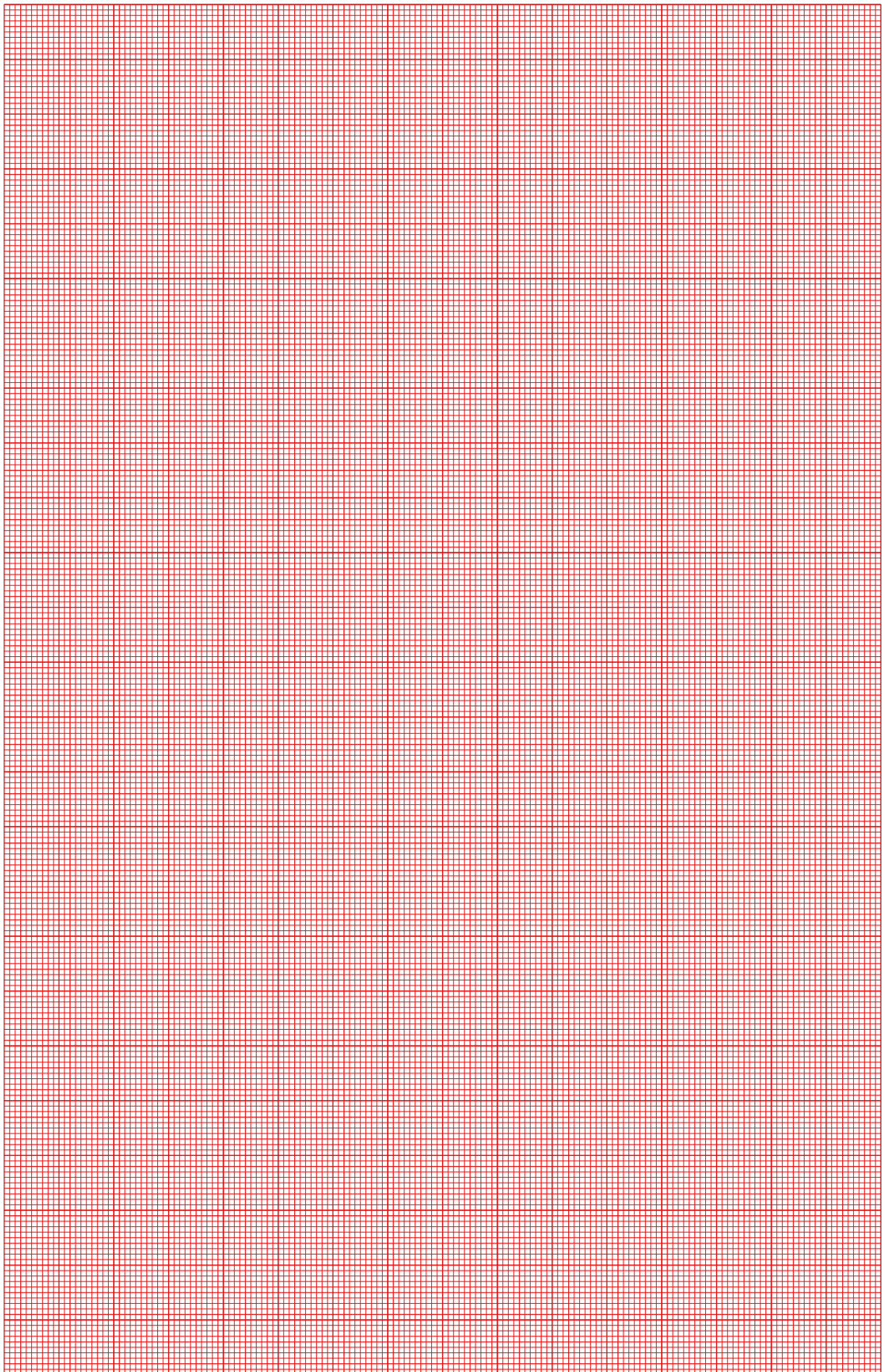
die magnetische Induktion B , sowie die magnetische Feldstärke H ermittelt und damit die relative Permeabilität μ_r bestimmt werden.

In den folgenden beiden Diagrammen sind die Funktionen $\mu_r = f(H)$ sowie $B = f(H)$ grafisch darzustellen.

Interpretieren Sie die μ_r -Kurve.

Was stellt die zweite Kurve $B = f(H)$ dar?





Aufbau-Nr.	Material	Windungen prim./sek.	D_a / mm	D_i / mm	h / mm	R_V / m Ω	R_2 / k Ω	C_2 / nF	f / Hz	U_{Gmax} / V
mWS 01	Ferrit	10/50	55	30	20	220	100	100	1k	5,4
mWS 02	Ferrit	10/50	55	30	20	220	100	100	1k	5,7
mWS 03	Trafoperm	20/100	93	75	15	220	100	1000	50	2,2
mWS 04	Vitrovac	10/90	50	40	20	220	100	100	100	5
mWS 05	Vitrovac	10/40	50	40	20	220	100	100	100	5
mWS 06	Ferrit	5/25	35,5	22,9	12,7	220	100	100	1k	1,5
mWS 07	Ferrit	5/25	35,5	22,9	12,7	220	100	100	1k	1,5
mWS 08	Trafoperm	25/40	93	75	15	220	100	680	70	1,7
mWS 09	Ferrit	5/25	35,5	22,9	12,7	220	100	100	1k	1,5

Tabelle 9.1: Parameterübersicht der unterschiedlichen Proben.

9.4 Literatur