

Ringbandkerne für FI-Schalter

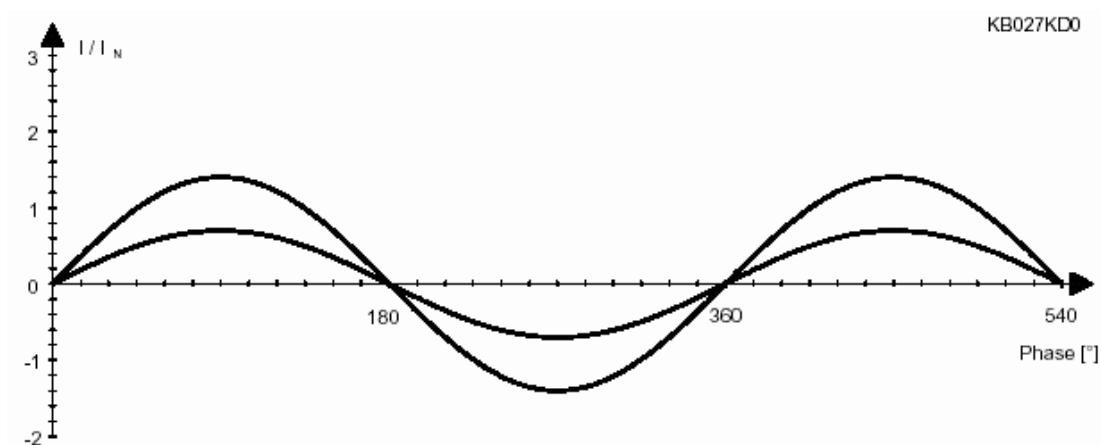
Netzunabhängige Fehlerstrom-Schutzschalter („FI-Schalter“) sind in der Elektroinstallationstechnik weit verbreitet. Der hohe Sicherheitswert des Schalters zeigt sich nicht nur bei indirekter Berührung, sondern vor allem als Personenschutz beim direkten Berühren unter Spannung stehender Teile (Nennfehlerstrom $I_{\Delta N} \leq 30 \text{ mA}$).

Kristalline VAC-Werkstoffe, wie ULTRAPERM und PERMAX, haben bei der Entwicklung der hoch empfindlichen FI-Schalter eine entscheidende Rolle gespielt. Durch die konsequente Optimierung unserer kristallinen Werkstoffe auf höchste Permeabilität (ULTRAPERM 250) und auf hohe Linearität bei großem Induktionshub (ULTRAPERM F80) können wir eine breite Basis für neue Lösungen anbieten.

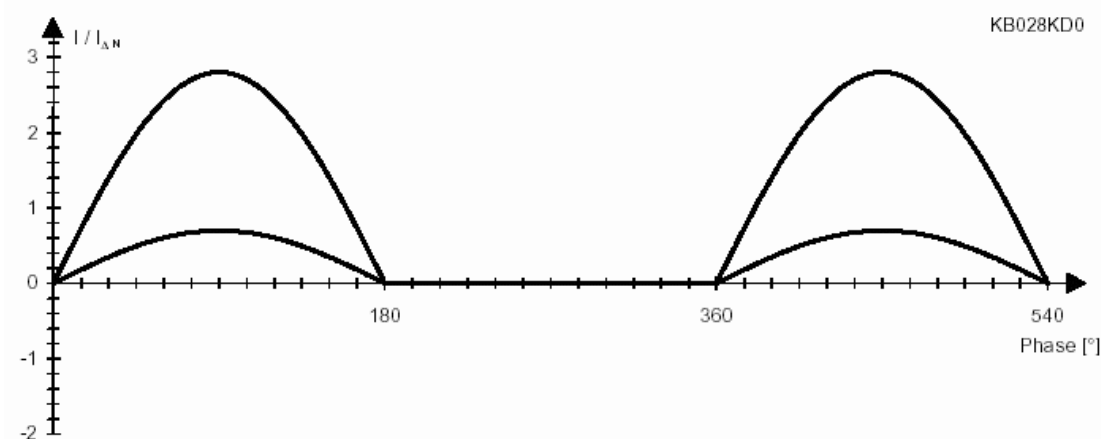
Die Einführung des nanokristallinen Werkstoffs VITROPERM in jüngster Zeit mit seinen hervorragenden weichmagnetischen Eigenschaften hat insbesondere im Anwendungsgebiet der pulsstromsensitiven, aber auch bei wechselstromsensitiven FI-Schutzschaltern für neue Impulse gesorgt. Hier sind innovative Lösungen für den Schalterkonstrukteur möglich geworden, die die Grenzen der kristallinen Legierungen weit überschreiten.

Anwendungen und Werkstoffe

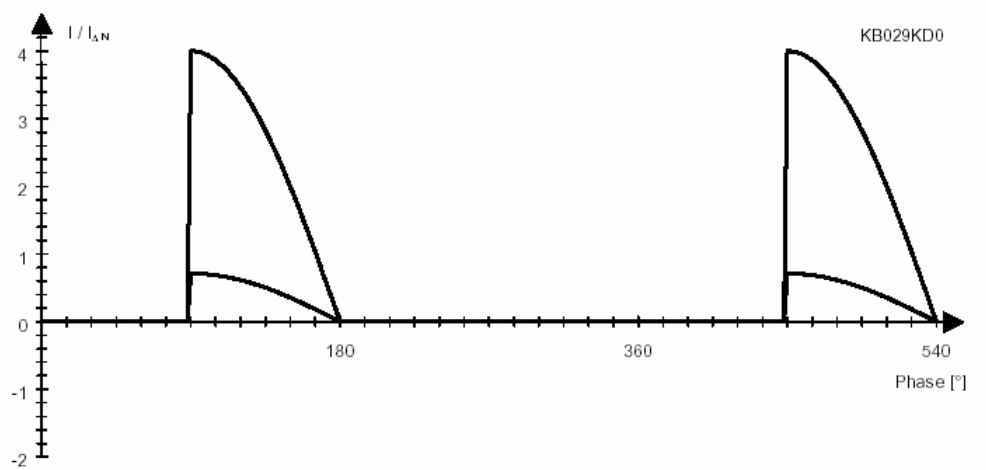
Abhängig vom vorgesehenen Einsatz gelten für FI-Schalter gestufte Nennfehlerströme $I_{\Delta N}$, die in internationalen Regelwerken festgelegt sind; die zugehörigen unteren und oberen Fehlerstromgrenzwerte ergeben sich aus diesen Nennwerten:



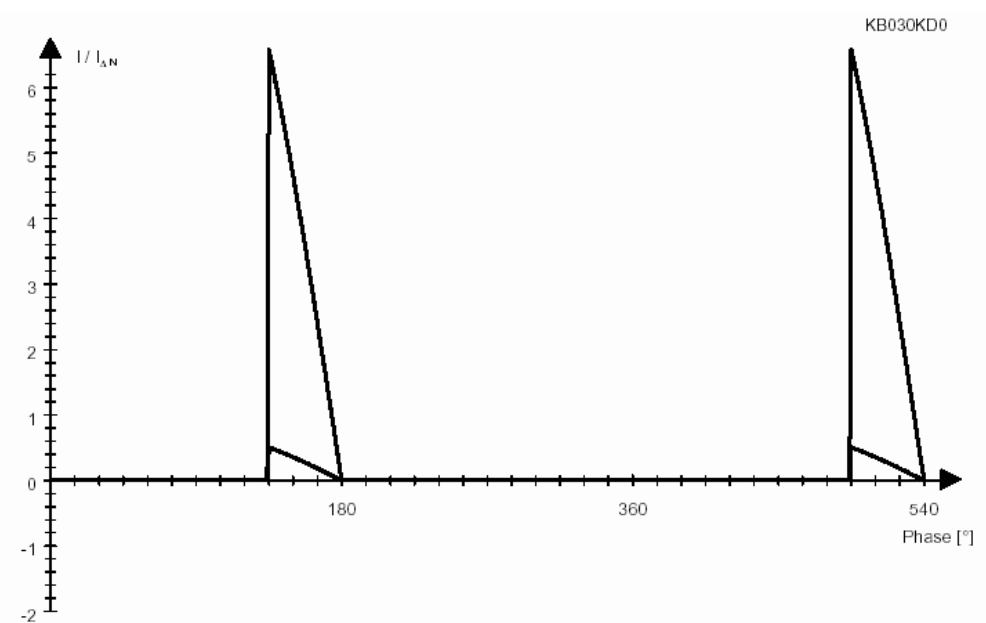
Fehlerstromverlauf Sinus



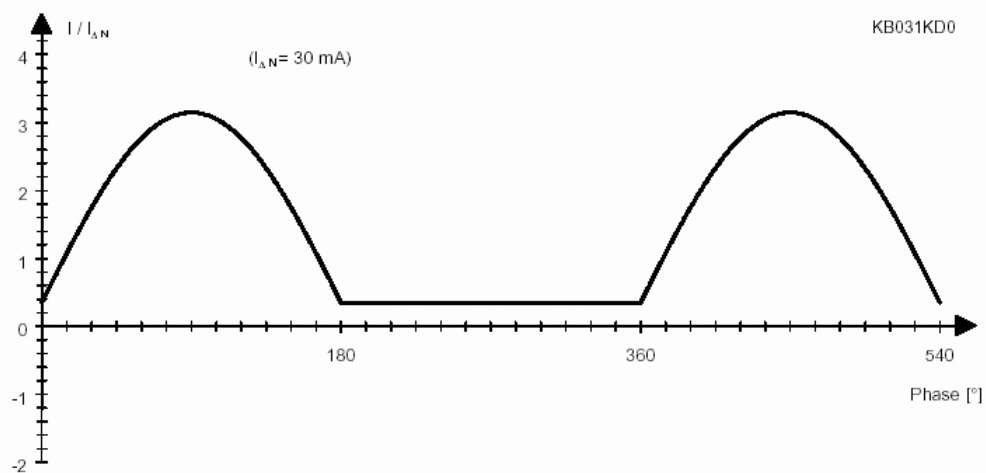
Fehlerstromverlauf Sinushalbwellen



Fehlerstromverlauf Halbwelle Phasenanschnitt 90°



Fehlerstromverlauf Halbwelle Phasenanschnitt 135°



Fehlerstromverlauf Halbwelle und Gleichstromüberlagerung 6 mA

Auf $I_{\Delta N}$ bezogene Grenzwerte für den Fehlerstrom

Fehlerstrom-Verlauf	Sinus	Sinus- halbwelle	Halbwelle Phasenanschnitt		Halbwelle + Gleichstromüberlagerung 6 mA
			90°	135°	
obere Auslösegrenze					
Effektivwert	$1,0 \times I_{\Delta N}$	$1,4 \times I_{\Delta N}$	$1,4 \times I_{\Delta N}$	$1,4 \times I_{\Delta N}$	$1,4 \times I_{\Delta N} + 6\text{mA}$ $((2,8 \times I_{\Delta N} + 12 \text{ mA})^2 - 85,6 \text{ mA}^2 - 1,64 \text{ mA})^{1/2}$
Spitzenwert	$1,4 \times I_{\Delta N}$	$2,8 \times I_{\Delta N}$	$4,0 \times I_{\Delta N}$	$6,6 \times I_{\Delta N}$	
untere Auslösegrenze					
Effektivwert	$0,50 \times I_{\Delta N}$	$0,35 \times I_{\Delta N}$	$0,25 \times I_{\Delta N}$	$0,11 \times I_{\Delta N}$	
Spitzenwert	$0,71 \times I_{\Delta N}$	$0,71 \times I_{\Delta N}$	$0,71 \times I_{\Delta N}$	$0,52 \times I_{\Delta N}$	

Durch die Vielzahl von Werkstoffen und deren Modifikationen, die uns zur Verfügung stehen, können wir für die sich daraus ergebenden konstruktiven Anforderungen immer eine optimale Kernlösung anbieten:

Werkstoffe für pulsstromsensitive FI-Schutzschalter

Anwendungsbereich (Nennauslösestrom $I_{\Delta N}$ [mA])	Werkstoff	Dichte [g/cm ³]	B _S [T]	Permeabilität μ_{15}
10 - 100	VITROPERM 800 F	7,35	1,2	160 000
	VITROPERM 800 F	7,35	1,2	135 000
	ULTRAPERM F80	8,70	0,74	110 000
Anwendungsbereich (Nennauslösestrom $I_{\Delta N}$ [mA])	Werkstoff	Dichte [g/cm ³]	B _S [T]	Permeabilität μ_{50}
300-500	VITROPERM 500 F	7,35	1,2	20 000 - 80 000

Werkstoffe für wechselstromsensitive FI – Schutzschalter

Anwendungsbereich (Nennauslösestrom $I_{\Delta N}$ [mA])	Werkstoff	Dichte [g/cm ³]	B _S [T]	Permeabilität μ_{15}
10 - 100	ULTRAPERM 200/250	8,7	0,74	200 000 - 300 000
	ULTRAPERM 10	8,7	0,74	100 000 – 200 000
300 - 500	PERMAX M	8,25	1,5	50 000
	PERMENORM 5000 H2	8,25	1,55	12 000
10 - 100 (Auslösekreise mit serieller Kapazität)	ULTRAPERM F60	8,7	0,74	125 000
	VITROPERM 800 F	7,35	1,2	145 000

Für die nur wechselstromsensitiven FI-Schalter werden in der Regel Werkstoffe mit runden Hystereseschleifen eingesetzt. Mit ULTRAPERM, PERMAX M und PERMENORM 5000 H2 können dann, abhängig von den Magnetisierungsbedingungen, d.h. vom Bereich des Nennauslösestroms $I_{\Delta N}$ sehr hohe Induktionsspannungen erzeugt werden.

Als Alternative zur gängigen Leistungsanpassung kann man in wechselstromsensitiven FI-Schaltern, insbesondere bei Nennfehlerströmen ≤ 30 mA, auch eine Serienresonanz in der Nähe der Netzfrequenz realisieren. Hierbei steht die Permeabilität des Kerns nicht notwendigerweise im Vordergrund; die gewünschte Resonanzüberhöhung hängt maßgeblich auch von den Kernverlusten ab. Werkstoffe, die hier eine besondere Eignung besitzen, sind VITROPERM 800 F und ULTRAPERM F60.

Bei FI-Schaltern, die auch pulsierende Gleichfehlerströme erkennen müssen, ist es zunächst erforderlich, dass der Wandler eine lineare Kennlinie bei niedriger Remanenz und damit verbunden einen hohen Induktionshub aufweist. Für

diesen Fall und bei der Forderung nach Nennfehlerströmen mit $I_{\Delta N} = 30$ mA steht als „klassischer“ Werkstoff ULTRAPERM F80 zur Verfügung. In jüngerer Zeit konnten wir für diese Anwendung mit VITROPERM 800 F einen Werkstoff vorstellen, der neben höchsten Anfangspermeabilitäten, vor allem durch seine hervorragenden dynamischen Eigenschaften, ein überlegenes Resonanzverhalten zeigt. Vergleicht man die an den Auslöser übertragene Energie der beiden Werkstoffe bei gleicher Kerngröße und Permeabilität, kann man deutlich das Potential von VITROPERM erkennen.

Auch im Marktsegment der Schalter mit einem Nennfehlerstrom ≤ 100 mA kann durch die Einführung von VITROPERM 500F ein Werkstoff mit einem breiten Spektrum von einstellbaren Permeabilitäten geliefert werden. Somit steht auch hier gegenüber den klassischen Werkstoffen ULTRAPERM F, PERMAX LGF und PERMENORM 5050 LGF eine Alternative mit deutlich besseren magnetischen Eigenschaften zur Verfügung.

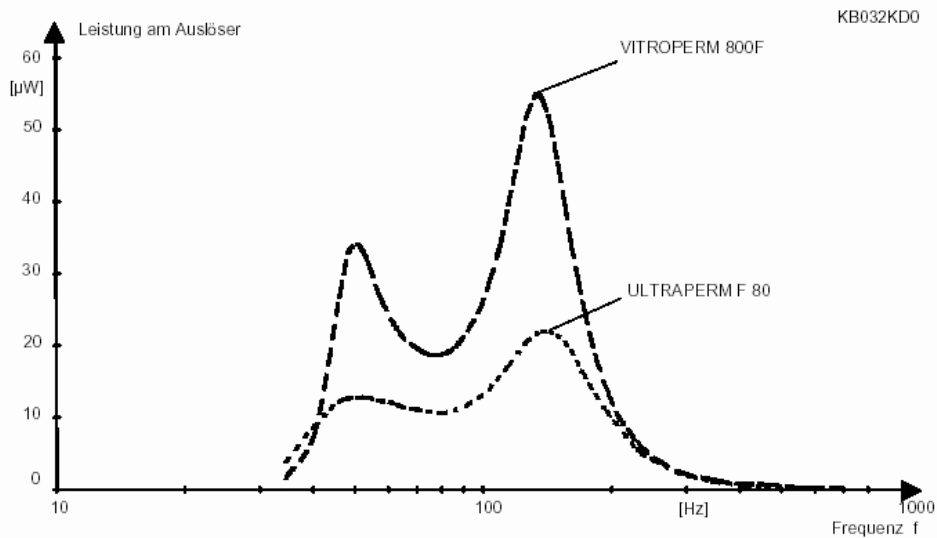
Anwendungsbezogene magnetische Größen

Bei FI-Schaltern, die ausschließlich für sinusförmige Nennfehlerströme ausgelegt sind, ist die Induktion \hat{B} eine anwendungsnahe Größe zur Beschreibung der am Relais wirksamen Spannung. Dies gilt auch für pulsstromsensitive FI-Schalter; diese müssen darüber hinaus jedoch auch bei nicht sinusförmigen Fehlerströmen auslösen.

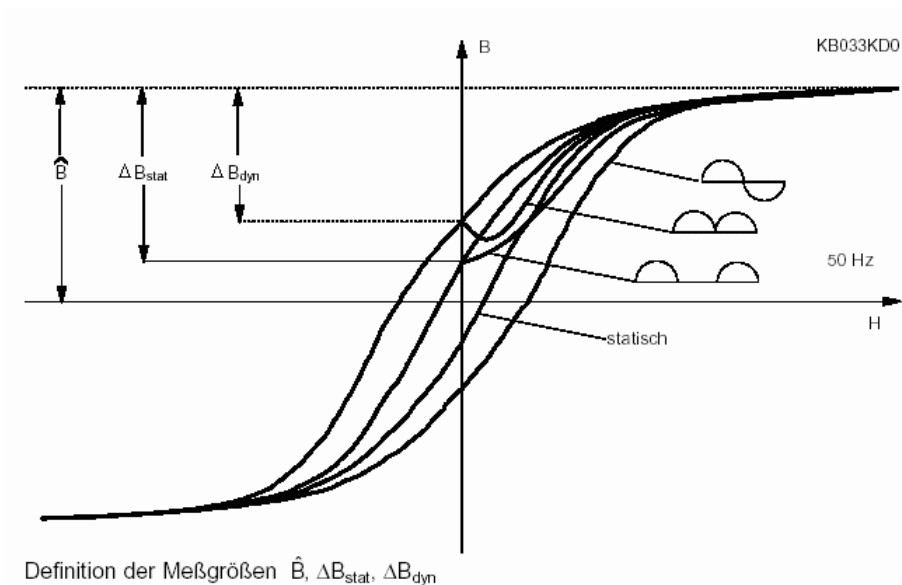
Da in den meisten Applikationen ein unipolarer Haltemagnetauslöser eingesetzt wird, dessen Auslöseverhalten bei pulsierenden Gleichfehlerströmen von deren Polarität abhängig ist, können die tatsächlichen Auslöseströme trotz der symmetrierenden Wirkung des

Sperrkreises recht unterschiedliche Werte annehmen. Der Zusammenhang zwischen dem pulsierenden Fehlerstrom mit der „falschen“ Polarität und der daraus am Haltemagneten resultierenden Sekundärspannung wird am besten durch ΔB_{dyn} beschrieben.

Im Gegensatz dazu stehen Lösungen mit bipolar wirksamen Auslösern, beispielsweise Sperrmagnetauslöser oder Speicherschaltungen mit einer Zweiweggleichrichtung, im Sekundärkreis. Neben \hat{B} erscheint in diesem Anwendungssegment ΔB_{stat} als anwendungsnahe Größe.

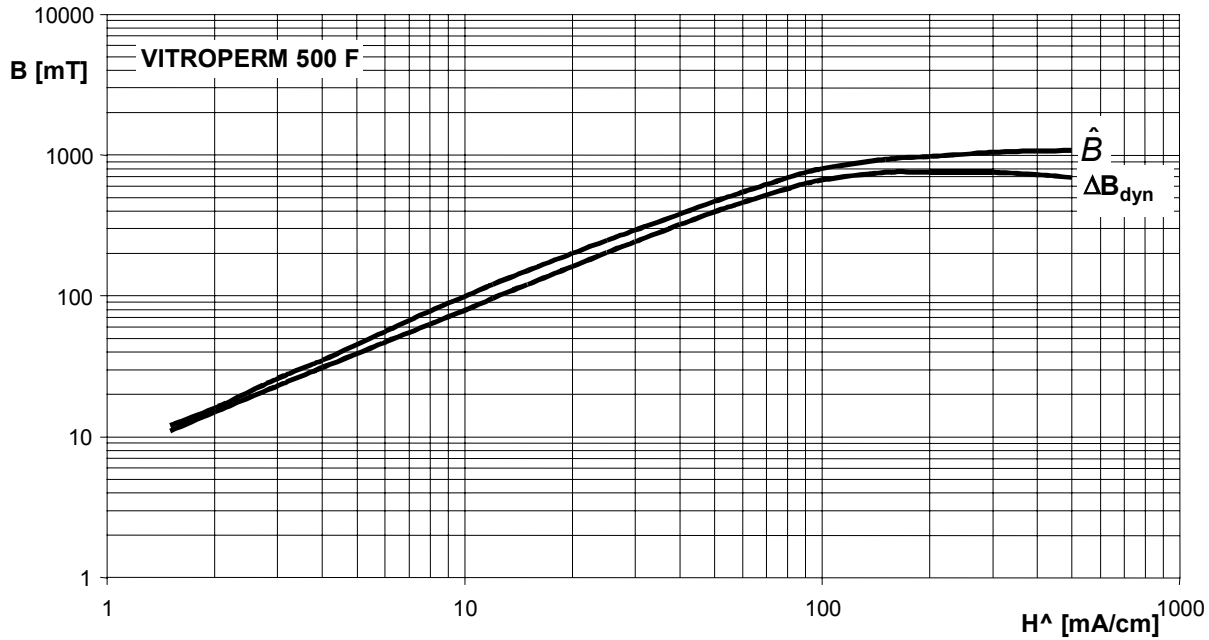


Auslöseleistung am Relais eines pulsstromsensitiven FI-Schalters mit Wandlerkernen aus unterschiedlichen Werkstoffen

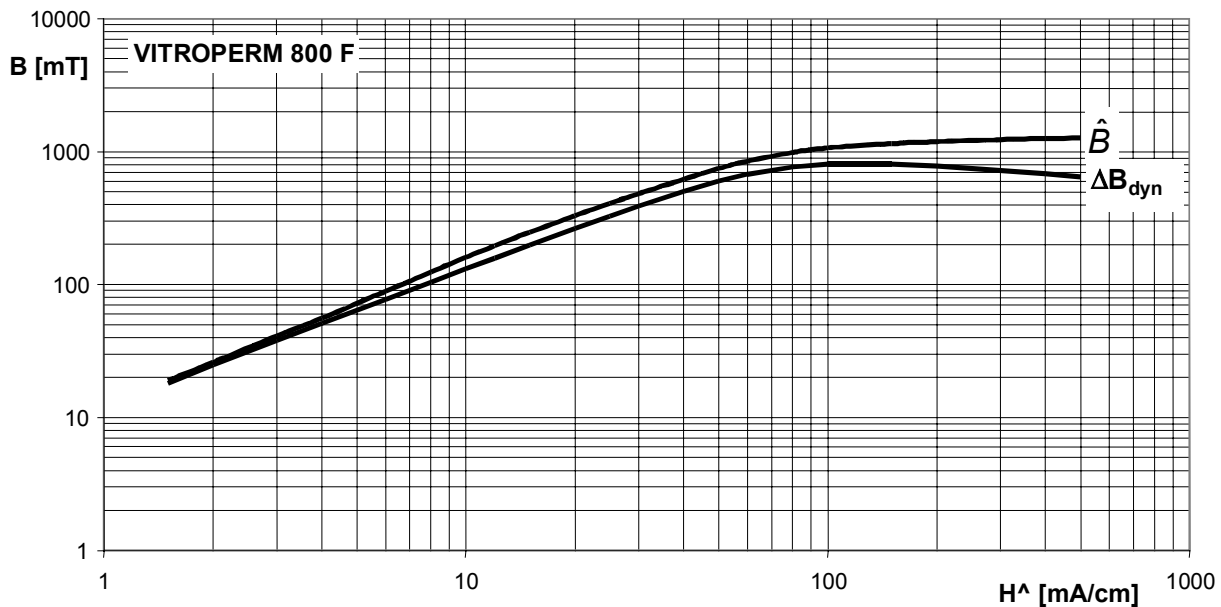


Die **Grenzwertkurven** für die in der Werkstofftabelle genannten Werkstoffe gestatten die Vereinbarung von Liefervereinbarungen für den einzelnen Kerntyp. Zu beachten ist dabei, dass angepasst an die spezielle Anwendung, nur einzelne Punkte geprüft und vereinbart werden können. Die

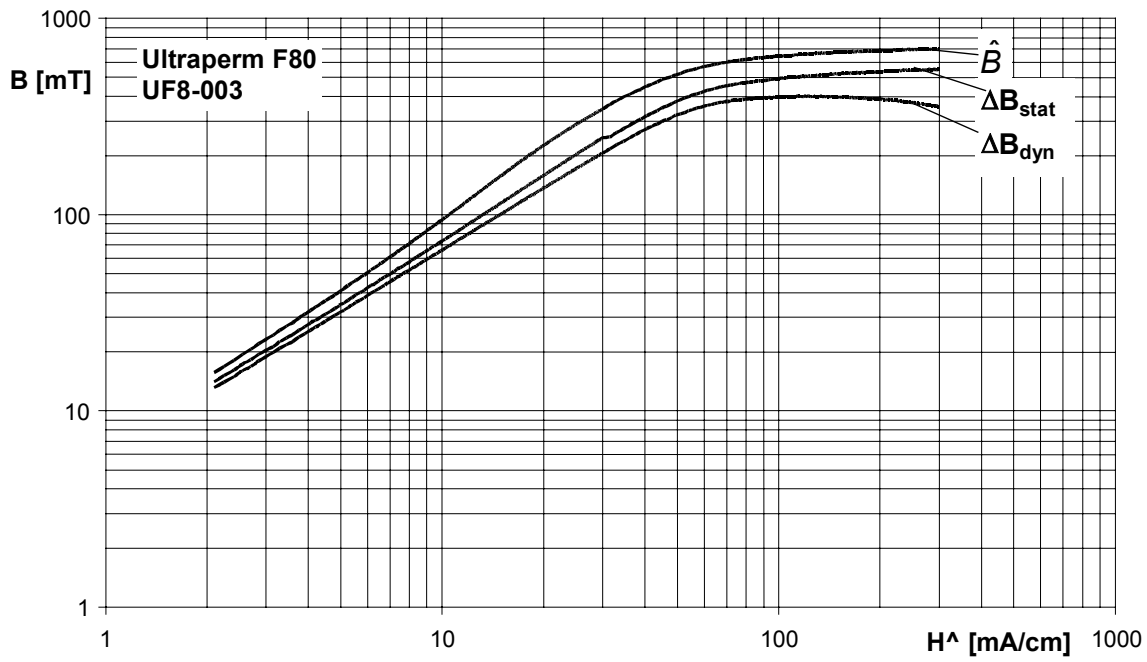
Gültigkeit der Kurven ist auf bestimmte gängige Abmessungsbereiche beschränkt. Bei Kernabmessungen außerhalb dieser Bereiche sind Festlegungen erst nach Rücksprache und technischer Klärung zu treffen.



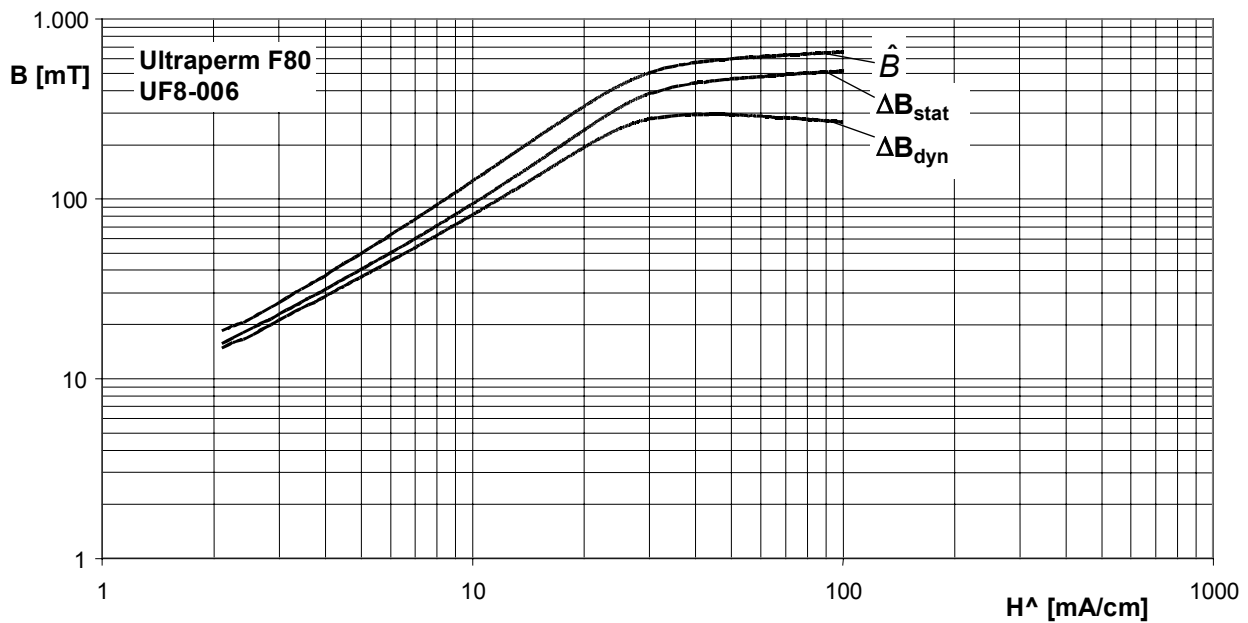
Induktions-Feldstärke-Grenzkurven für **VITROPERM 500F**, Magnetqualität **LHF 580-01**
 $f = 50 \text{ Hz}$



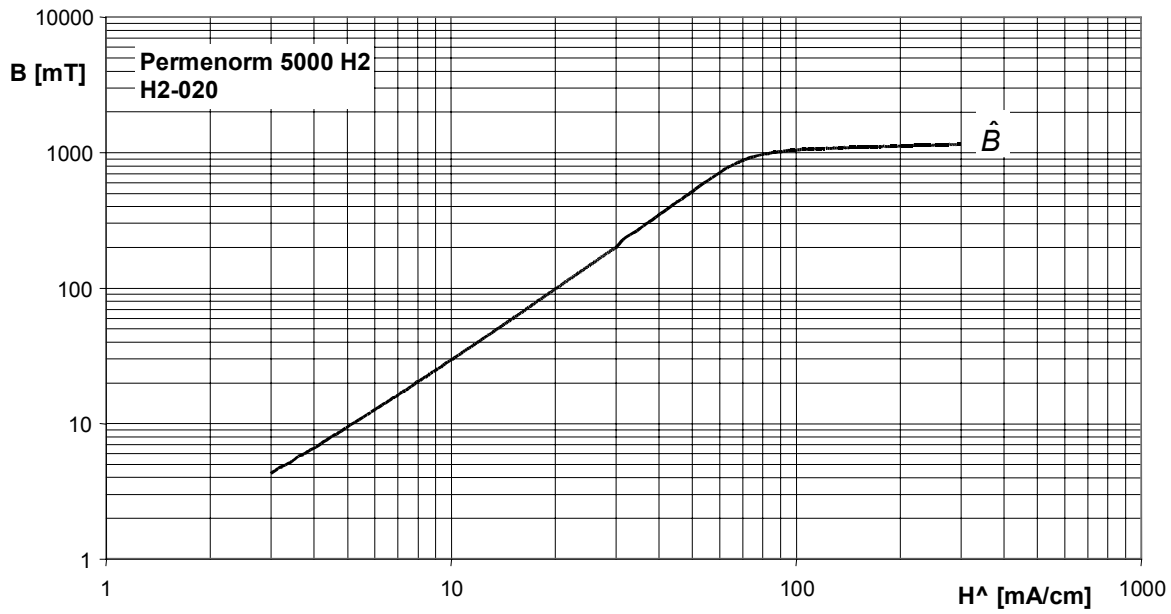
Induktions-Feldstärke-Grenzkurven für **VITROPERM 800F**, Magnetqualität **LPF 585-01**
 $f = 50 \text{ Hz}$



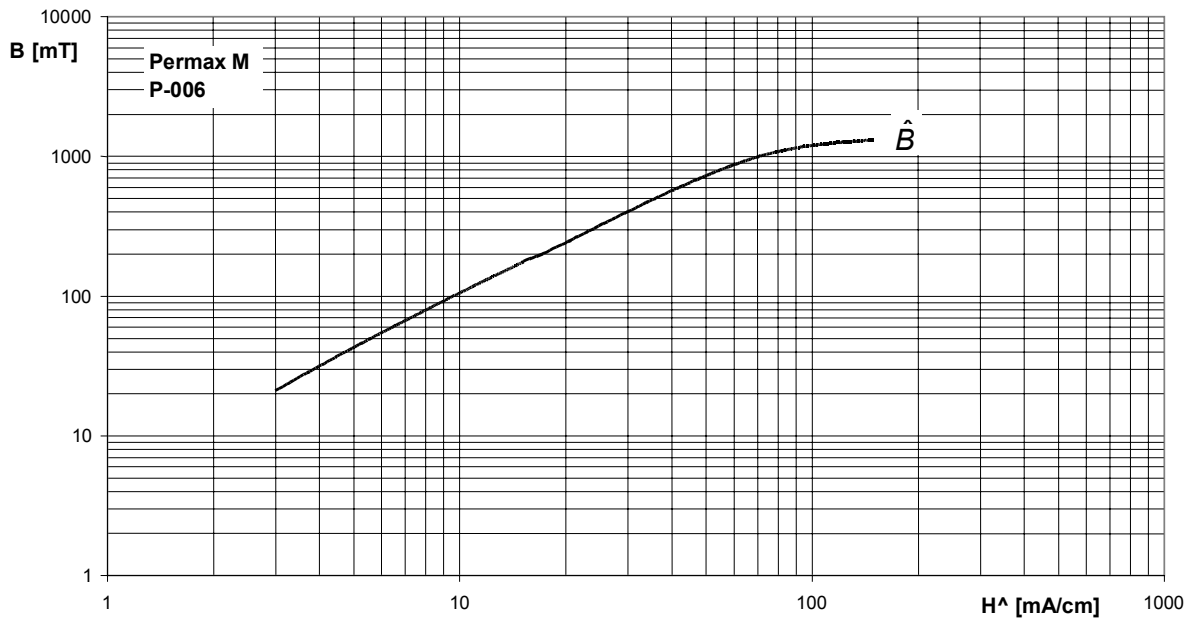
Induktions-Feldstärke-Grenzkurven für **ULTRAPERM F80**, Magnetqualität **UF8-003**
 $f = 50$ Hz



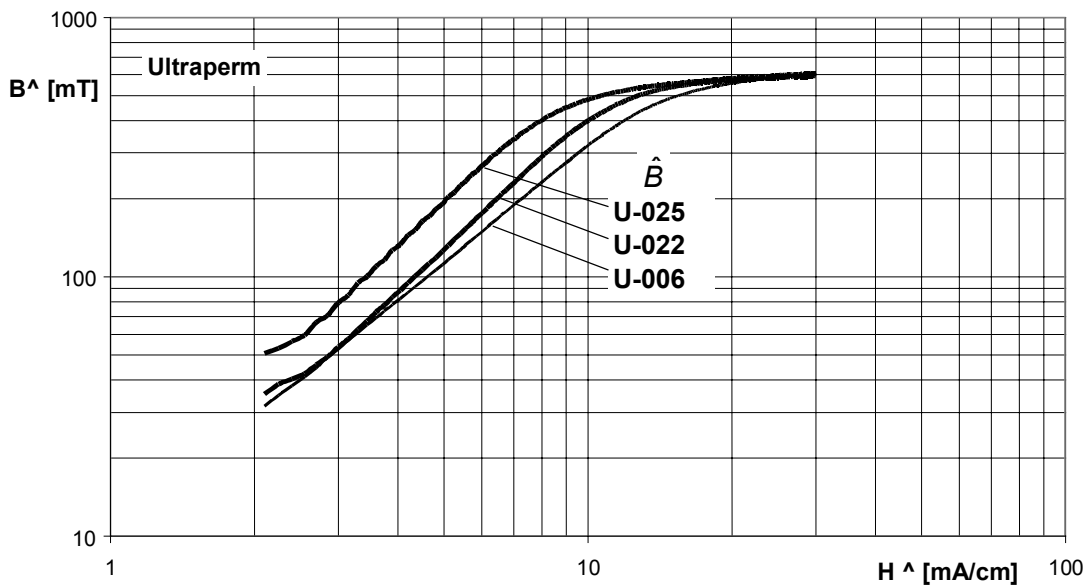
Induktions-Feldstärke-Grenzkurven für **ULTRAPERM F80**, Magnetqualität **UF8-006**
 $f = 50$ Hz



Induktions-Feldstärke-Grenzkurven für **PERMENORM 5000 H2**, Magnetqualität **H2-020**
f = 50 Hz



Induktions-Feldstärke-Grenzkurven für **PERMAX M**, Magnetqualität **P-006**
f = 50 Hz

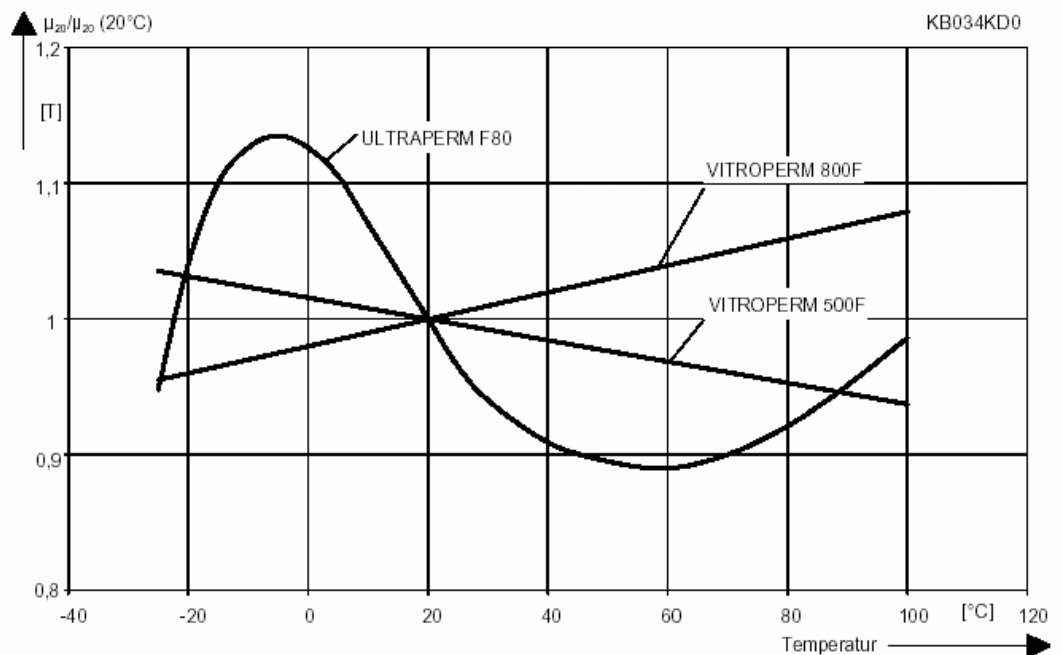


Induktions-Feldstärke-Grenzkurven für **ULTRAPERM 10 / 200 / 250**, Magnetqualität **U-006, U-022, U-025**
 $f = 50 \text{ Hz}$

Temperaturverhalten

Die Größen \hat{B} , ΔB_{stat} , ΔB_{dyn} sowie die daraus ermittelten Permeabilitäten, die ein Maß für die anwendungsorientierten magnetischen Eigenschaften der Kerne darstellen, sind bei kristallinen Werkstoffen je nach Magnetisierungsfeldstärke zum Teil recht ausgeprägt temperatur- und stromformabhängig. Das Temperaturverhalten lässt sich durch Variation der Wärmebehandlung beeinflussen und für die typischen Grenzwerte des Anwendungstemperaturbereichs zwischen beispielsweise $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ und $100 \text{ }^\circ\text{C}$ weitgehend optimieren. Unsere Ringbandkerne werden dabei in der Regel so eingestellt, dass ein Kompromiss zwischen den gewünschten Eigenschaften bei Raumtemperatur und denen bei den Grenztemperaturen vorliegt. Diese Abhängigkeiten liegen bei unserem nanokristallinen Werkstoff VITROPERM in dieser Form nicht vor; hier ist die Temperaturabhängigkeit der Größen \hat{B} , ΔB_{stat} , ΔB_{dyn} und damit auch der Permeabilitäten weitgehend unabhängig von

den Magnetisierungsfeldstärken und Stromformen. Es zeigt sich ein nahezu linearer Verlauf der Permeabilität über der Temperatur, dessen Steigung in erster Linie vom Niveau der Kernpermeabilität abhängig ist. Der Drehpunkt der Kurven befindet sich bei ca. $20 \text{ }^\circ\text{C}$; bei hohen Permeabilitäten findet man einen Anstieg in Richtung $100 \text{ }^\circ\text{C}$, bei niedrigem Permeabilitätsniveau hat die Steigung ein negatives Vorzeichen.



Vergleich der Temperaturabhängigkeit der Permeabilität von kristallinen und nanokristallinen F-Werkstoffen

Ausführung

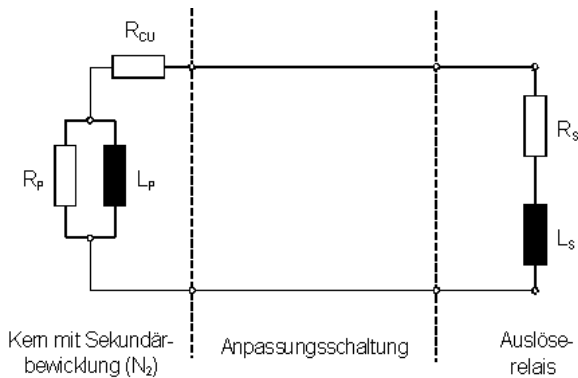
In der Regel werden die Ringbandkerne „fixiert“ geliefert, d.h. im Falle von Kernen für FI-Schutzschalter in Kunststofftröge eingesetzt. Diese werden in den meisten Fällen beigestellt. Die eigentliche Fixierung der Kerne in den Trögen erfolgt klassisch durch Schaumstoffringe, als fertigungsoptimierte Alternative bieten wir das Einkleben mittels eines speziellen dauerelastischen Haftvermittlers an. Für die kostenoptimierte Verarbeitung der Tröge in unserer Fertigung ist eine konstruktive Anpassung an unsere automatischen Eintrogeinrichtungen von entscheidender Bedeutung. Die verwendeten Tröge sollten entweder mit einem Deckel oder einer Halbschale, die ohne Positionierung gefügt werden kann, verschlossen werden. Ein reversibler Schnappmechanismus ist dabei besonders zu bevorzugen. In Fällen, in denen die Außenkontur dieses nicht zulässt, kann mittels wärmebeständigem Klebeband abgebunden werden. Die

Formstabilität der Trogteile ist ein weiterer wichtiger Einflussparameter; hier sollten Materialdicke und –steifigkeit ein verformungsarmes Handling zulassen. Wir möchten auf die Möglichkeit hinweisen, standardisierte VAC Tröge zu verwenden, deren Konstruktion und Materialauswahl eine besonders rationelle Herstellung zulässt und die in einer Reihe von Größen lagermäßig geführt werden. Für die Kennzeichnung der eingetrogten Kerne besteht die Möglichkeit, beim Vorliegen einer genügend großen zusammenhängenden Fläche an der Außenkontur (Deckel/Boden) einen Klartextaufdruck vorzusehen; eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Trogteilen aus eingefärbten Kunststoffmassen. Bei Verwendung von Klebebändern können diese zur Kennzeichnung verwendet werden. Bei Fragen zur Trogkonstruktion bzw. nach bereits vorhandenen Werkzeugen sprechen Sie uns bitte an.

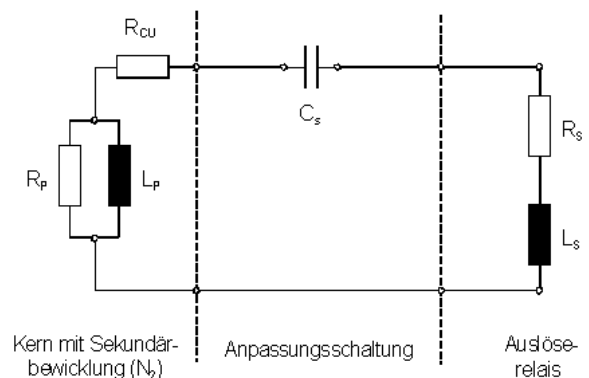
Applikationshinweise / Typen von FI-Schalterkonstruktionen

Durch die Anzahl unterschiedlicher konstruktiver Lösungen sowie der verschiedenen Auslösertypen ergibt sich bei der

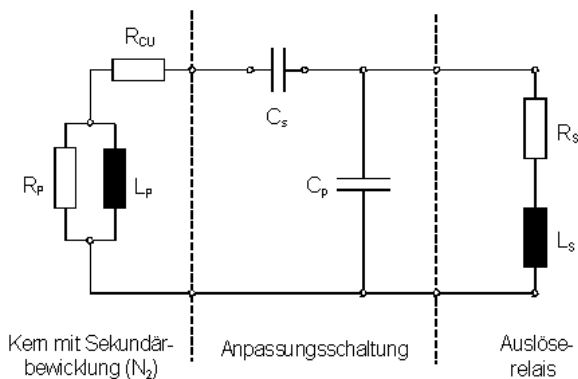
Neukonstruktion eines FI-Schalters eine große Zahl von möglichen Lösungen zur Realisierung des verwendeten Kernels.



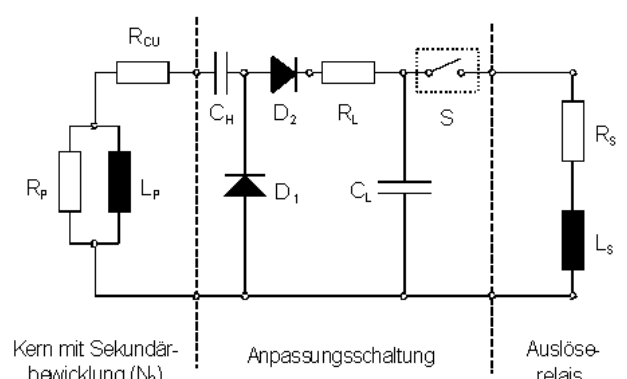
a. wechselstromsensitiver Schalter



b. wechselstromsensitiver Schalter mit Serienresonanzkondensator



c. pulsstromsensitiver Schalter



d. selektiver Schalter

L_p, R_p : Induktivität und Verlustwiderstand des Summenstromwandlers im Parallelersatzschaltbild

L_s, R_s : Induktivität und Verlustwiderstand des Auslöserelais im Serienersatzschaltbild

R_{cu} : Gleichstromwiderstand der Sekundärwicklung

R_L : Ladewiderstand

C_s : Serienresonanzkondensator

C_p : Parallelresonanzkondensator

C_H : Hilfskondensator für Spannungsverdopplung

C_L : Ladekondensator

D_1, D_2 : Halbleitgleichrichter

S: Elektronischer Schwellwertschalter (schematisch)

Wegen der nicht linearen magnetischen Kennlinien gibt es keine einfache Methode, die Anforderungen an den Kern des Summenstromwandlers aus den Vorgaben für den FI-Schalter abzuleiten. Die Konstruktion eines neuen FI-Schalters erfolgt daher in der Regel weitgehend empirisch. Dieser Weg ist bei immer kürzeren Innovationszyklen sehr kostenträchtig; die Verfügbarkeit einer Möglichkeit zur Verkürzung dieses Vorgehens gestattet die Senkung des Aufwandes bei der Projektierung eines neuen Schalters. Wir haben daher eine Simulationsmöglichkeit für FI-Schalter der Typen a., b. und c. geschaffen, die in der Frühphase der Entwicklung für Kerne aus unseren Werkstoffen das Verhalten eines FI-Schalters mit Resonanzkreis mittels numerischer Simulation näherungsweise zu berechnen. Durch eine geeignete Modellierung der einzelnen Komponenten können anhand der Berechnung der erreichten Auslöseströme einer speziellen Konstruktion der optimale Werkstoff, sowie eine angepasste Ausführung ermittelt werden. Dabei ist es erforderlich, dass die Rahmenbedingungen, z.B. die Art der Beschaltung, die Werte für bereits festgelegte Bauelemente sowie die Einsatzbedingungen, bekannt sind. Für die Modellierung des Auslöseverhaltens ist die genaue Kenntnis der Charakteristika des verwendeten Auslöserelais erforderlich. Für die wichtigsten am Markt verfügbaren Relais sind Daten vorhanden. Es ist jedoch auch möglich, für andere Relais den notwendigen Parametersatz zu ermitteln. Durch anwendungsnahe Kompetenz und mit Hilfe unseres Simulationsprogrammes können wir eine weitgehende Unterstützung bei der Entwicklung anbieten. Die Festlegung von Werkstoff, Qualität und Prüfspezifikation sollte dann auf Basis der vorgenannten Informationen, einer ggf.

durchgeführten Simulation und in Rücksprache mit unserem Produktmarketing erfolgen. Gerade durch die Einführung von VITROPERM haben sich einige interessante und innovative Möglichkeiten bei der Schalterkonstruktion ergeben. Mit den sehr guten dynamischen Eigenschaften bei gleichzeitiger hoher Permeabilität lassen sich Konstruktionen realisieren, die mit den eingeführten NiFe-Werkstoffen nicht möglich sind. So kann beispielsweise bei der Konzeption von FI-Schaltern für Nennströme I_N bis zu ca. 63 A und einem Nennfehlerstrom von $I_{\Delta N} \leq 30$ mA die Primärwindungszahl auf eine Windung reduziert werden. Bei $N_1 = 1$ liegt der Arbeitspunkt des Kernes im Bereich der Anfangspermeabilität. Aus diesem Grund sollten die eingesetzten Kerne ein möglichst kleines I_{Fe} haben, damit bei gegebenem Nennfehlerstrom eine möglichst hohe Magnetisierungsfeldstärke erreicht werden kann. Insbesondere von Vorteil sind hier Kerngeometrien, wie man sie aus dem Bereich der FI/LS-Schalter kennt.

Auf der anderen Seite ist es möglich, unter Verwendung mehrerer Primärwindungen äußerst kompakte Kerne einzusetzen, die dem Schalterentwickler einen großen konstruktiven Freiraum geben und somit innovative Produkte erst ermöglichen, wie z.B. in ein in eine Schukosteckdose integrierter FI Schalter. In der Zukunft lassen sich Kombinationen aus VITROPERM- Kernen von wenigen Gramm Gewicht mit hoch empfindlichen Auslöserelais denken. Diese werden nicht nur einen deutlich geringeren Platzbedarf haben als heutige Lösungen, sondern dem Gerätehersteller auch eine Kostenposition verschaffen, die eine Ausweitung seines Geschäfts möglich macht und dafür sorgen wird, dass sich der elektromechanische FI-Schalter auch weiterhin gegenüber anderen Lösungen durchsetzen kann.

Formelanhang

Für die Berechnung der Magnetisierungsfeldstärke \hat{H} aus dem Effektivwert des Stromes gilt bei:
Wechselmagnetisierung (einschließlich Zweiweggleichrichtung):

$$\hat{H} = \frac{i_{RMS} \cdot \sqrt{2} \cdot N_1}{I_{Fe}}$$

Magnetisierung mit Sinushalbwellen:

$$\hat{H} = \frac{i_{RMS} \cdot 2 \cdot N_1}{I_{Fe}}$$

Berechnung der Induktionsamplitude \hat{B} aus dem Gleichrichtmittelwert der Spannung \bar{u} , gültig für beliebige Spannungsformen mit sinusförmiger Grundschwingung.

$$\hat{B} = \frac{\bar{u}}{4 \cdot f \cdot A_{Fe} \cdot N_2}$$

$$\Rightarrow \text{Einheitengleichungen} \quad \left[\frac{Vs}{m^2} \right] = \frac{[V]}{\left[\frac{1}{s} \right] \cdot [m^2]}$$

Bei Zweiweggleichrichtung bzw. Einweggleichrichtung gilt:

$$\hat{B} = \frac{\bar{u}}{2 \cdot f \cdot A_{Fe} \cdot N_2}$$

Einheiten

\hat{H}	$\left[\frac{A}{m} \right]$	Magnetisierungsfeldstärke
\hat{B} ΔB_{dyn} ΔB_{stat}	[T] bzw. $\left[\frac{Vs}{m^2} \right]$	Induktionsamplitude Induktionshub
l_{Fe}	[m]	mittlere Eisenweglänge
A_{Fe}	[m ²]	wirksamer Eisenquerschnitt
f	[Hz] bzw. $\left[\frac{1}{s} \right]$	Frequenz
\bar{u}	[V]	Spannung „Gleichrichtmittelwert“
N_1 N_2		Primärwindungszahl Sekundärwindungszahl