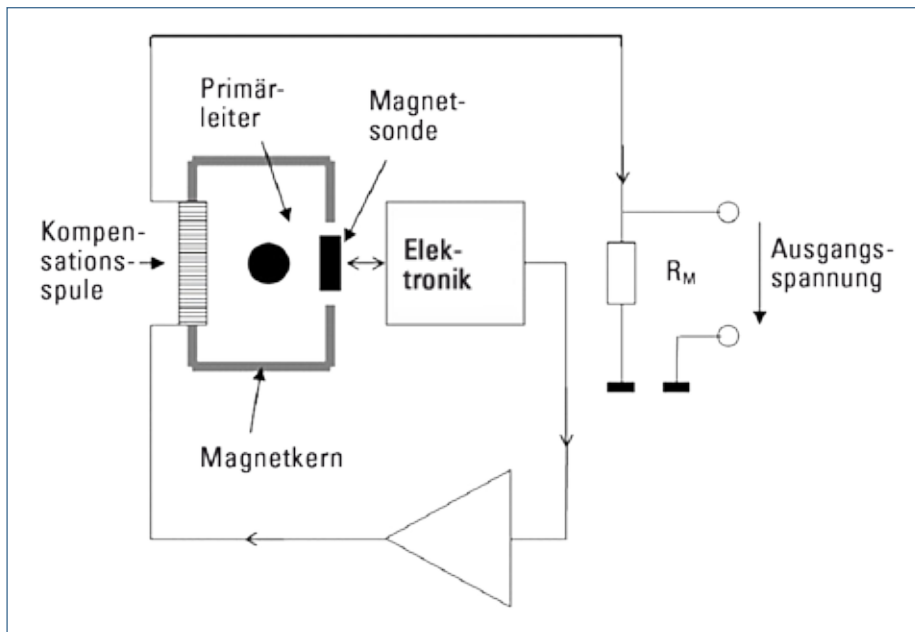


Präzises und quasi verlustfreies Messen aller Stromformen

In der Leistungselektronik wird die Messung von Strömen jenseits einiger 100 A immer wichtiger. Genaue Messergebnisse liefert das Prinzip des Kompensations-Stromsensors mit Magnetsonde.

KLAUS REICHERT *



bieten außerdem eine inhärente galvanische Trennung zwischen Last- und Signalstromkreis und erfüllen dabei einschlägige Normen, wie beispielsweise EN61800 oder UL508. Typische Messbereiche reichen von einigen Ampere bis zu 2500 A. Ihr Gesamtfehler liegt unter 0,4%, der Linearitätsfehler unter 0,1%. Die Temperatur- und Langzeitstabilität der Offsetgrößen liegen im Bereich einiger 100 ppm. Diese Genauigkeiten werden von konkurrierenden Messprinzipien wie Hall-Effekt-Sensoren oder Shunts mit galvanischer Trennung nicht erreicht.

Die Anwendungsmöglichkeiten für Stromsensoren decken die gesamte Bandbreite der getakteten Leistungselektronik ab. Sie reichen von der Erfassung der Motorströme in Frequenzumrichter über die DC-, AC- und Fehlerstromerfassung in Photovoltaik-Wechselrichter bis hin zur Stromerfassung in Schweißinvertern oder unterbrechungsfreien Stromversorgungen.

Bei den zu messenden Betriebsströmen der typischen Anwendungen handelt es sich um Gleichströme oder Wechselströme bis zu mehreren 100 Hz mit hoher Amplitude. Sie werden überlagert von den Taktströmen der Leistungshalbleiter, die sich im ein- bis mittleren zweistelligen kHz-Bereich bewegen, und mit Oberwellen bis in den dreistelligen Bereich. Deren Amplitude ist um eine Größenordnung niedriger. Kompensationssensoren mit magnetischer Sonde sind für dieses Spektrum optimal geeignet.

Bei dem von der Firma VACUUMSCHMELZE entwickelten Prinzip des Kompensations-Stromsensors mit Magnetsonde (Bild 1) wird der Leiter, welcher den zu messenden Primärstrom trägt, durch einen Magnetkern geführt. Die Magnetsonde detektiert das Vorhandensein eines Magnetfeldes im Luftspalt des Kerns. Die Elektronik des Sensors wertet das Sondersignal aus und treibt einen daraus abgeleiteten Strom durch die Kompensationsspule. Dieser Kompensationsstrom ist proportional zum Primärstrom, besitzt

Bild 1: Das Funktionsprinzip des Kompensationssensors mit Magnetsonde.

Bei den Hochenergie-Anwendungen wie Windkraft oder Solarwechselrichter, aber auch in der elektrischen Antriebstechnik, versucht man, die Leistung der einzelnen Inverter-Einheiten zu erhöhen, um deren Zahl trotz steigender Gesamtleistung so niedrig wie möglich zu halten. Ebenfalls eine Rolle spielt die Spannungsgrenze der Niederspannungsrichtlinie 2006/95/EG von 1000 V Wechselstrom bzw. 1500 V Gleichstrom. Um eine Auslegung der Geräte nach der Mittelspannungsrichtlinie zu vermeiden, erhöht man eher den Strom.

Die Genauigkeit der Stromerfassung spielt an vielen Messstellen eine große Rolle, zum Beispiel für das präzise Bestimmen von Mo-

tordrehmomenten in Antrieben oder von Einspeiseströmen in das öffentliche Netz (unter Vermeidung von Gleichstromanteilen), um nur einige wenige Beispiele zu nennen. Mit einer genauen Stromerfassung lassen sich auch Leistungshalbleiter besser ausnutzen, da man aufgrund von Messunsicherheiten größere Sicherheitsabstände zu den Grenzen von deren Safe Operating Area einplanen muss. Eine große Bandbreite der Stromerfassung hilft bei der Auslegung eines Regelkreises hoher Regelgüte und ermöglicht eine sichere Kurzschlussstromerfassung.

Kompensations-Sensoren mit magnetischer Sonde

Stromsensoren nach dem Kompensationsprinzip (Closed Loop) mit magnetischer Sonde, auch Fluxgate-Sonde genannt, messen praktisch alle Stromformen von Gleichstrom bis zu Wechselströmen im Bereich von 100 oder 200 kHz, und das quasi verlustfrei. Sie



* Klaus Reichert
... ist Leiter Produktmarketing Industrieanwendungen bei Vacuumschmelze (VAC), Hanau.

jedoch die umgekehrte Polarität. Hierdurch wird ein magnetischer Fluss auf Null geregelt, den der Primärstrom im Kern erzeugen würde. Die Magnetsonde fungiert also als Nullfelddetektor, und der Kompensationsstrom ist ein exaktes Abbild des Primärstroms.

Die Bandbreite des beschriebenen Regelkreises liegt bei unter 10 kHz. Sie ist für die Bandbreite des gesamten Sensors jedoch nicht entscheidend, denn bei höheren Frequenzen funktioniert sein Magnetkreis als Stromtransformator. In der Konsequenz bildet der Kompensationsstrom, beziehungsweise die über den Messwiderstand abfallende Spannung, den Primärstrom präzise ab, und zwar im Frequenzbereich von Gleichstrom bis typischerweise 100 oder 200 kHz.

Die Besonderheit der Magnetsonde

Eine Besonderheit der hier betrachteten Stromsensoren ist die von der VAC entwickelte Magnetsonde, bei der es sich um eine Anwendung des Fluxgate- oder Sättigungskernsonden-Prinzips handelt. Bei dieser Sonde wird das Feld im Luftspalt des Magnetkerns nicht wie sonst üblich von einem Hallelement erfasst, sondern von einer Spule mit offenem Magnetkreis, die Teil eines selbstschwingenden Kreises ist und wechselseitig in die Sättigung getrieben wird (Bild 2, links). Ein auf sie einwirkendes externes Feld verschiebt die magnetische Symmetrie des Kerns und ändert damit das Tastverhältnis eines abgeleiteten PWM-Signals (Bild 2, rechts). Hieraus wird wiederum der Kompensationsstrom abgeleitet.

Die Arbeitsfrequenz der Sonde liegt bei 400 kHz oder höher, also weit oberhalb des nutzbaren Frequenzbereiches. Die Sonde hat eine hohe eigene Verstärkung, das erzeugte Signal somit eine hohe Amplitude. Es muss nicht wie bei Hallelementsonden aus dem mV-Bereich verstärkt werden mit entspre-

chenden Nachteilen wie Verstärkerrauschen und -drift. Die Genauigkeit der Sonde hängt außerdem ausschließlich von der physikalisch bedingt immer nahezu perfekten Symmetrie der Hystereseschleife ab und nicht von ihrer Steigung oder der Sättigungsinduktion des Materials. Eigenschaften, die einer (wenn auch nur geringen) Temperaturabhängigkeit unterliegen.

Vorteile durch moderne Werkstoffe

Kompensations-Stromsensoren mit magnetischer Sonde erreichen, über anwendungstypische Temperaturbereiche betrachtet, etwa die doppelte Genauigkeit von Kompensationssensoren mit Hallelement als Nullfelddetektor und ein mehrfaches der Genauigkeit von direktabbildenden (Open Loop) Sensoren.

Der Kern der Magnetsonde besteht aus einem gerade einmal 20 µm dünnen Streifen aus dem amorphen Werkstoff VITROVAC mit Z-förmiger Hystereseschleife. Dieser Werkstoff bietet eine für die Anwendung optimale Kombination aus hartem Sättigungsverhalten, hoher Permeabilität im nicht gesättigten Zustand und niedrigen Verlusten.

Der Hauptmagnetkern des Sensors besteht aus PERMENORM, einer 50%igen Nickel-Eisen-Legierung, die eine geringe Koerzitivfeldstärke und somit eine leichte Magnetisierbarkeit aufweist, wodurch Offset und Hysterese des Sensors klein gehalten werden können. Die Werkstoffexpertise eines führenden Herstellers von Magnetwerkstoffen führt hier also zu optimalen Ergebnissen am fertigen Produkt Stromsensor.

Der Regelkreis: Die Elektronik der Kompensationssensoren mit Magnetsonde der VACUUMSCMELZE wurde zum überwiegenden Teil in einen IC integriert. Bild 3 zeigt den Regelkreis des Kompensationssensors. Er unterteilt sich in die Funktionsblöcke Magnetsonde, IC und Kompensationswicklung.

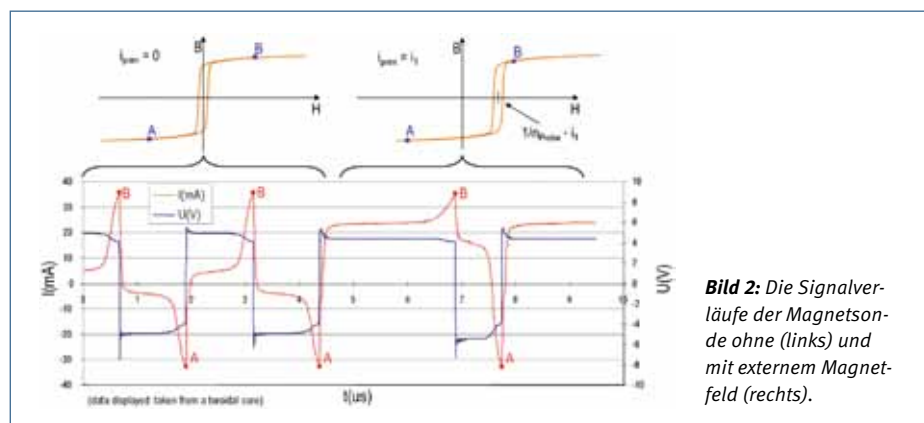


Bild 2: Die Signalverläufe der Magnetsonde ohne (links) und mit externem Magnetfeld (rechts).

Need Power? Think GlobTek

Smarte Batterie-Ladegeräte bieten Drei-Phasen-Betrieb

Erhältlich in 4, 2V, 8,4V oder 12,6V-Versionen bei 1A für Ein- oder Mehrfach-Batterie-Konfigurationen, bietet GlobTeks GTM91128 Familie an Li-Ionen Batterie-Ladegeräten drei Ladeoptionen: Konditionierung, Konstantstrom sowie Konstantspannung. Die Universal Eingangs-Geräte bieten eine Minimalstromladung mit Abschaltautomatik und Timer-Unterstützung sowie eine LED-Lampe, die den Ladezustand anzeigt. Ein weiteres Produktmerkmal sind die kundenspezifisch austauschbaren Anschlüsse für [...weitere Informationen unter www.globtek.de](http://www.globtek.de)



Medizintechnisch zugelassene Open-Frame Netzgeräte liefern bis zu 240W

Geeignet für zahlreiche medizintechnische sowie ITE- und PoE-Anwendungen, liefert die GTM91110P240 Familie an Open-Frame AC/DC Schaltnetzteilen von GlobTek bis zu 240W in einem 3 x 5 Inch Footprint. Die Geräte sind werkseitig mit Ausgängen von 12 bis 55V (in 0,1V Schritten) ausgestattet. Erhältlich in Klasse I oder II Version, besitzen die 1,75 Hochspannungsnetzteile eine Effizienz von 85% bei Volllast und zeichnen sich durch Produktmerkmale wie Active PFC, eingebauter EMV-Filter, 12V Lüfter-Ausgang [...weitere Informationen unter www.globtek.de](http://www.globtek.de)

Akku-Pakete liefern Ladezustands-Daten

Mit seiner wiederaufladbaren Stromversorgung für mobile und Remote-Geräte, eröffnet das BL3100C1865004S1PSQA Li-Ionen Akku-Pack von GlobTek die Möglichkeit, den Ladezustand des Gerätes jederzeit abzulesen. Das 14,4V-Pack bietet eine Kapazität von 3,1Ah sowie eingebaute Überstrom-Schutzschaltung. "Mittlerweile sollte jede Batterie, die in heutigen Geräten eingesetzt wird, Informationen über den Ladezustand liefern, da die Laufzeit eines Gerätes essenziell für dessen Leistungsfähigkeit ist." [...weitere Informationen unter www.globtek.de](http://www.globtek.de)



www.globtek.de

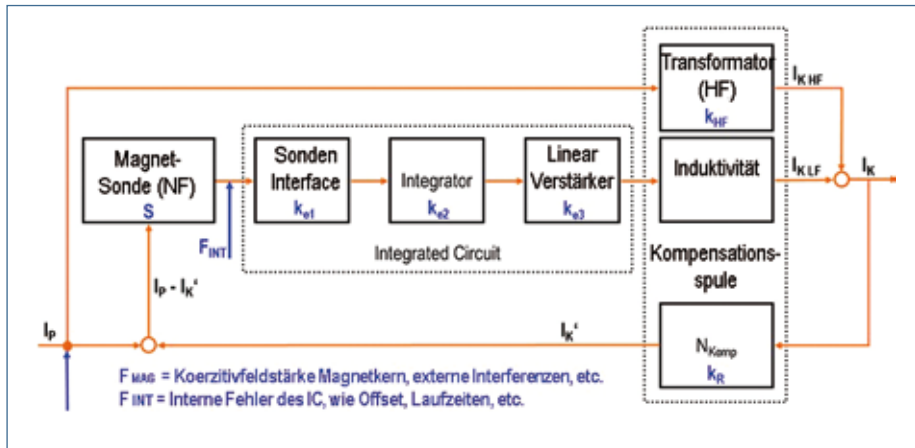


Bild 3. Der Regelkreis Stromsensor

Die ausführliche Übertragungsfunktion als Formel finden Sie in der Bildergalerie des detaillierten Online-Artikels unter der Beitragsnummer 42366443:

In dieser Formel steht I_k für Kompensationsstrom, S für Steilheit der Sonde, k_e für Verstärkung der Elektronik, k_{HF} für „Verstärkung“ Transformator (für hohe Frequenzen), k_R für „Verstärkung“ Kompensationswicklung (Windungszahl) und I_p für Primärstrom. Der linke Term der Formel beschreibt die grundsätzliche Übertragungsfunktion des gesamten Regelkreises; der mittlere den Einfluss des Fehlers F_{MAG} (welcher durch die Kernhysterese und externe Einstreuungen entsteht). Der rechte Term beschreibt den Einfluss des Fehlers F_{INT} , (der die Fehler der Elektronik, wie Offset und Verzögerungen, wiedergibt). Nimmt man die Leerlaufverstärkung der Elektronik als unendlich an und vernachlässigt man den HF-Pfad (transformatorische Kopplung), so vereinfacht sich die Übertragungsfunktion zu der Formel 2, die Sie ebenfalls in der Bildergalerie finden.

Es wird sichtbar, dass der Fehler F_{INT} im umgekehrten Verhältnis der Sondensteilheit in die Übertragungsfunktion eingeht. Der durch die Elektronik des Sensors eingebrachte Fehler wird also durch die hohe Eigenverstärkung der Sonde niedrig gehalten.

Elektronik nahezu vollständig integriert

Wie schon erwähnt, wurde die Elektronik der Sensoren nahezu vollständig in einem applikationsspezifischen Schaltkreis integriert. Dieser stellt eine gemeinsame Entwicklung von VAC mit einem führenden Hersteller hochwertiger analoger und digitaler ICs dar. Der Schaltkreis enthält unter anderem das gesamte Signal Processing für Kompensationsensoren mit Magnetsonde, einen Differenzverstärker für das über dem Messwider-

stand abgegriffene Signal, eine hochpräzise Referenzspannungsquelle, sowie eine Reihe von Kontroll- und Überwachungsfunktionen.

Somit hat der IC alle notwendigen Funktionsblöcke für Stromsensoren mit Strom- oder Spannungsausgang an Bord. Durch die Integration reduziert sich die Baugröße der Sensoren, und durch die drastisch reduzierte Anzahl von Bauelementen verbessern sich Messzahlen für die Zuverlässigkeit wie MTBF und FIT-Rate.

Sensoren im Bereich sehr hoher Ströme, etwa im Bereich $I_{eff} = 1000$ A, arbeiten bislang ausschließlich nach den Prinzipien Open Loop oder Closed Loop mit Hall-Effekt-Sonden. Sensoren mit Fluxgate-Sonden sind bisher nur im eher exotischen Segment höchster Genauigkeiten und leider auch höchster Preise vertreten.

Mit den Typen T60404-P4640-X1xx stellt die VACUUMSCHMELZE die ersten Mitglieder einer neuen Sensorfamilie für den Nennstrom 1000 A_{eff} und Messbereichen bis +/-2500 A



Bild 4: Die Bauform der neuen VAC-1000-A-Hochstromsensoren.

vor (Bild 4). Hier wurde das von VAC entwickelte Prinzip des Kompensationssensors mit Magnetsonde zum ersten Mal im Bereich der Erfassung sehr hoher Ströme angewendet. Zur Verfügung stehen Versionen für +/-15 V und +/- 24 V Versorgungsspannung und verschiedenen Anschlussvarianten. Die Ausgangsgröße ist ein Strom im Verhältnis 5000:1 des Primärstromes.

Technische Vorteile „hochtransformiert“

Durch das Sondenprinzip stehen die Vorteile des niedrigen Abbildungsfehlers und der hohen Temperatur- und Langzeitstabilität nun auch im Hochstrombereich zur Verfügung. Der hochpermeable Kernwerkstoff PERMENORM mit niedriger Koerzitivfeldstärke sorgt für einen niedrigeren Offset und eine geringere Hysterese des Messsignals im Vergleich zu den üblicherweise verwendeten Kernen aus Eisen-Silizium. Die Auslegung des Nullfeld-detektor-Systems erfolgt in einer neuartigen Weise, die den Magnetfluss gleichmäßiger über den gesamten Eisenweg des Kerns kompensiert. So kann trotz des niedrigen Kernquerschnitts der Messbereich groß, die Fremdfeldempfindlichkeit aber klein gehalten werden.

Der Messbereich übersteigt den anderer am Markt erhältlichen 1000-A-Sensoren zum Teil deutlich (siehe dazu die Tabelle in der Bildergalerie des detaillierten Online-Artikels mit der Beitragsnummer 42366443. Sie enthält zudem weitere Diagramme in den Bildern 7 bis 10). Diese erreichen je nach Randbedingungen noch nicht einmal einen Spitzenstrom von $1000 \text{ A} \cdot \sqrt{2}$, eigentlich notwendig um 1000-A-Wechselstrom abbilden zu können. Die Tabelle zeigt die Messbereiche der VAC-Hochstromsensoren unter verschiedenen Randbedingungen. Noch höhere Ströme lassen sich für kurze Zeit (etwa 1 ms) mittels transformatorischer Kopplung abbilden. Bild 5 belegt die nahezu perfekte Linearität des Sensors über den Messbereich bei Raumtemperatur (Messungen an 10 Prüflingen, übereinandergeplottet). Bild 7 gibt den relativen Fehler bei der kritischsten Temperatur (untere Temperaturgrenze, -40 °C, 9 Prüflinge) wider. Die Genauigkeit nimmt gegenüber Raumtemperatur kaum ab. Bild 8 zeigt die Sprungantwort bei einem Primärstrom Impuls von 1000 A. Das Ausgangssignal folgt dem Eingangssignal ohne sichtbares Einschwingen.

Die Bilder 9 und 10 dokumentieren die Fremdfeldempfindlichkeit des Sensors, dargestellt als Abhängigkeit des Abbildungsfehlers von der Lage des Rückleiters des Primär-(Gleich-)Stroms in äußerer Nähe zum

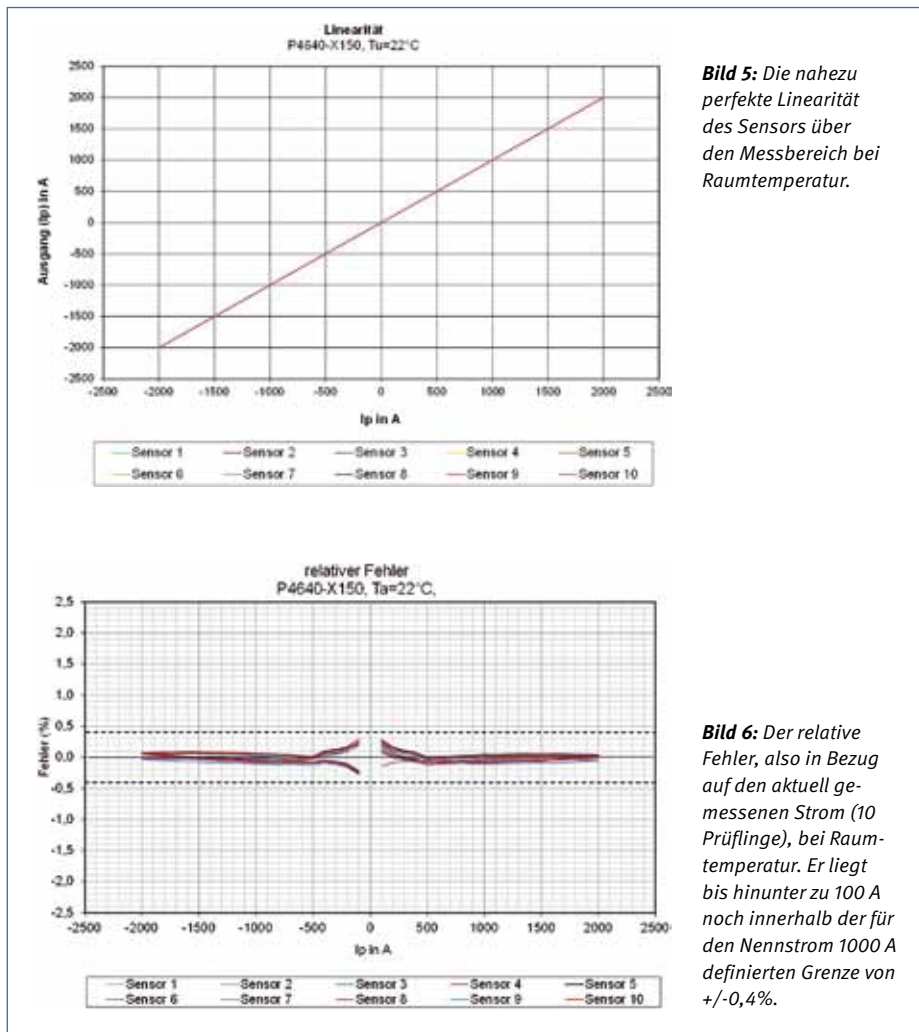


Bild 5: Die nahezu perfekte Linearität des Sensors über den Messbereich bei Raumtemperatur.

Bild 6: Der relative Fehler, also in Bezug auf den aktuell gemessenen Strom (10 Prüflinge), bei Raumtemperatur. Er liegt bis hinunter zu 100 A noch innerhalb der für den Nennstrom 1000 A definierten Grenze von +/-0,4%.

Sensor. Die geringe Abhängigkeit ermöglicht mehr Freiheiten bei der Auslegung der leistungselektronischen Applikation.

Nicht zu vernachlässigen bei Kompensationsensoren sind die internen Verluste, welche vor allem in den Endstufentransistoren entstehen, die den Kompensationsstrom treiben. Sie tragen maßgeblich zur Eigenerwärmung des Sensors bei. Der hier besprochene Sensor arbeitet an dieser Stelle mit Pulsweitenmodulation, wodurch die Verluste im typischen Arbeitsbereich der Transistorstufe deutlich geringer ausfallen als bei Produkten mit linearer Endstufe. Bei vollem Nennstrom liegt die Eigenerwärmung des Sensors lediglich bei rund 10 K.

Der bereits beschriebene niedrige Kernquerschnitt und die Auslegung des Kerns als mehrteiliger Rechteckkern sorgen dafür, dass das Fenster des Sensors größer ausgelegt werden kann als bei den gegebenen Außenabmessungen sonst üblich: Maße von 40,5 mm x 40,5 mm (mit Abschrägungen an zwei gegenüberliegenden Ecken) erlauben das Durchführen von Primärleitern mit erhöhtem

Platzbedarf. Hierzu gehören z.B. Aluminium- anstatt Kupferschienen, gestapelte Schienen, abgewinkelte Schienen (beim Einführen!) oder Kabel mit Kabelschuhen.

Kompatibel zu markt gängigen Bauformen

In seinen Leistungsdaten setzt sich der VAC-Sensor also zum Teil deutlich von den am Markt eingeführten anderen Produkten ab. Bei neu zu entwickelnden Anwendungen lassen sich diese zum Vorteil des Gesamtgerätes nutzen. Bei den Außenabmessungen (B x T x H = 90 mm x 34 mm x 95 mm ohne Fußwinkel), den Befestigungsmöglichkeiten und den elektrischen Anschlüssen ist er jedoch zu markt gängigen Bauformen kompatibel. Er kann also vorhandene Sensoren gleicher Bauform in den meisten Fällen ersetzen, wobei die Eignung immer durch den Anwender in seiner spezifischen Applikation überprüft werden muss. // KU

VACUUMSCHMELZE (VAC)
+49 (0)6181 380

FLÜSSIGKEITSKÜHLUNG

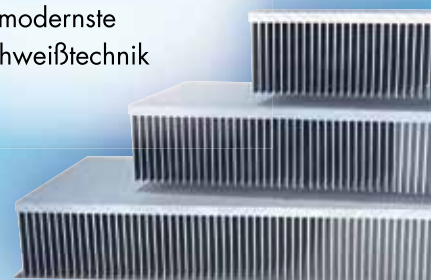
kundenspezifische Lösungen

hohe Kühlleistung durch eingearbeitete Kupfer- oder Edelstahl Innenrohre



FEINVERRIPPTER HOCHLEISTUNGSKÜHLKÖRPER

variable Breiten durch modernste Reibschweißtechnik



HOCHEFFIZIENTE WÄRMELEITPASTE

siliconhaltig · siliconfrei

lieferbar in verschiedenen Gebinden

austerlitz electronic gmbh
Ludwig-Feuerbach-Straße 38
D-90489 Nürnberg

Telefon: +49 (0)911/5 97 47-0
Telefax: +49 (0)911/5 97 47-89
E-Mail: kuehltec@austerlitz-electronic.de
Internet: www.austerlitz-electronic.de