

# Shuntbasierte Stromsensoren für die Antriebstechnik

*Benjamin Seel, Peter Schneider*  
*Isabellenhütte Heusler GmbH & Co. KG*  
*Eibacher Weg 3-5 | 35683 Dillenburg | Deutschland*

## Neue Technologien ermöglichen hochpräzise shuntbasierte Strommessung auch für Phasenströme

Die Produktfamilie der IPC Phasenstromsensoren ermöglicht durch die hohe interne Isolation, ihre hohe Genauigkeit und den kompakten Aufbau eine sehr präzise Phasenstrommessung in Umrichtern zur direkten digitalen Datenverarbeitung. Des Weiteren erlauben die herausragenden Eigenschaften der elektronenstrahl-geschweißten Shunts wie z.B. der niedrige Widerstandswert, die hohe Leistungsfähigkeit und der innere Wärmewiderstand, verbunden mit den vielfältigen Anpassungsmöglichkeiten eine hervorragende mechanische Integration in unterschiedlichste Systeme.

**Keywords:** shuntbasierte Stromsensoren, Phasenstrommessung, Sigma-Delta-Modulator, digitaler Ausgang, 1-Bit-Datenstrom, hohe Isolationsfestigkeit, hohe Präzision

### Steigende Anforderungen an die Strommessung in der Antriebstechnik

Die Industrie-Automatisierung stellt immer höhere Anforderungen an die heutige Antriebstechnik. Moderne Motoren und Antriebssysteme übernehmen inzwischen deutlich komplexere Funktionen als ein einfaches Antreiben wie z.B. dynamische Drehzahl-, Positions- und Drehmomentregelung. Dafür sind präzise und schnell arbeitende leistungselektronische Stellglieder als Antriebseinheiten zur Steuerung und Antrieb der Motoren notwendig. Diese Einheiten, im Allgemeinen auch Umrichter genannt, benötigen viele Messgrößen, Parameter und komplexe Modelle, um einen möglichst optimalen Antrieb der Motoren entsprechend der Anforderungen aus den Applikationen heraus realisieren zu können.

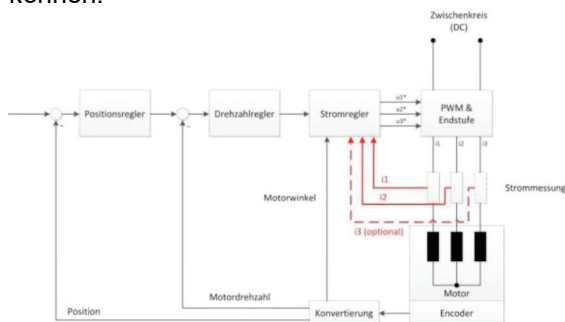


Abb. 1: Schematische Darstellung eines typischen Regelkreises im Umrichter und der Phasenstrommessungen

Auch wenn inzwischen daran gearbeitet wird, verschiedene Messgrößen bzw. die Sensoren durch Modellierungen zu ersetzen, so ist und bleibt der Phasenstrom eine der wichtigsten Informationen, welche die Reglereinheiten in den Umrichtern als gemessene Größe benötigen. Bedingt durch die oben genannten hohen Anforderungen an Antriebssysteme steigen auch die Anforderungen an die Stromsensoren hinsichtlich Präzision, Geschwindigkeit, und Baugröße.

### Verschiedene physikalische Effekte ermöglichen unterschiedliche Technologien zur Strommessung

Ein Strom, welcher durch einen elektrischen Leiter fließt, verursacht verschiedene physikalische Effekte, die unterschiedliche Technologien zur Strommessung ermöglichen:

- Magnetische Induktion
- Hall Effekt
- Magnetoresistiver Effekt
- Magnetooptischer Effekt (Faraday Effekt)
- Spannungsabfall (Ohm'sches Gesetz)

Die magnetfeldbasierten Stromwandler, wie z.B. Open-Loop-, Closed-Loop-, Flux-Gate- oder AMR-Sensoren, nutzen die ersten drei physikalischen Effekte, um den fließenden Strom im Mess- bzw. Ausgangssignal abzubilden. Der Magnetooptische Effekt (Drehung der Lichtwelle durch das Magnetfeld) wird bisher auf Grund der teuren und aufwändigen Auswertetechnologien eher

selten eingesetzt. Auf die Nutzung des Spannungsabfalls über einen Shunt wird weiter unten genauer eingegangen.

### Nutzung von Stromwandlern (magnetfeldbasierten Stromsensoren) zu Strommessung

Auch wenn in neuen Umrichter-Generationen der Trend eindeutig zu einer vollständig digitalen Signalverarbeitung geht, werden bis heute für die Phasenstrommessung in den meisten Fällen magnetfeldbasierte Stromwandler mit analogen Ausgängen eingesetzt.

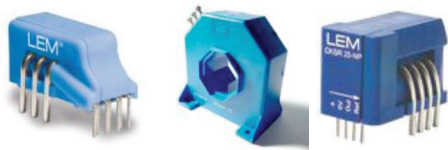


Abb. 2: gängige Open-Loop (O/L)-, Closed-Loop (C/L)- und Flux-Gate-Stromsensoren (von links nach rechts) der Fa. LEM[1]

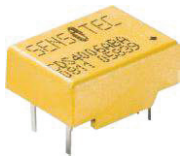


Abb. 3: AMR-Stromsensor der Fa. Sensitec[2]

Die möglichen Vorteile, welche die Wahl zu Gunsten eines Stromwandlers zur Strommessung beeinflussen, sind bekannt:

- Intrinsisch isoliert (galvanische Trennung zwischen Primärleiter und Sekundärseite)
- Günstig (aber abhängig von Technologie und Messbereich)
- Kompakt (aber abhängig von Technologie und Messbereich)
- (bisher) ausreichend genau

Es gibt aber auch mögliche Nachteile, die den Einsatz von Stromwandlern zur Strommessung verhindern oder zumindest einschränken können:

- Abhängigkeit von externen Feldern (Pseudosignale, Offset-Fehler, Messfehler)
- Durch Übersteuerung oder externe Felder Hysterese-Effekte und dadurch Verschiebung der Kennlinie möglich
- Je nach Technologie systembedingtes Rauschen (z.B. bei O/L und Flux-Gate)
- Je nach Technologie zusätzliche externe Beschaltung (Bürden-Widerstand) benötigt

- Trotz intrinsischer Isolation Koppelkapazitäten zwischen Primär- und Sekundärkreis
- Analogere Ausgang

### Nutzung des Spannungsabfalls über einem Messwiderstand (Shunt) zur Strommessung

Im Gegensatz zu Stromwandlern kommt das Ohm'sche Gesetz, also die Messung eines durch einen fließenden Strom verursachten Spannungsabfalls über einem Messwiderstand (Shunt) vergleichsweise selten zur Strommessung in Umrichtern zum Einsatz.

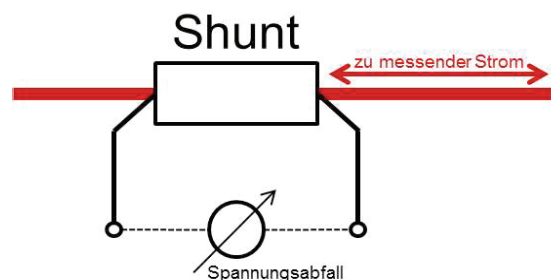


Abb. 4: Schematische Darstellung der Strommessung mittels Messung des Spannungsabfalls über einen Shunt

Gründe dafür können die bisherigen Vorbehalte und scheinbaren Nachteile sein, wie z.B.:

- Keine intrinsische galvanische Trennung
- Zu hohe Induktivitäten
- „nur für kleine Leistungen einsetzbar“
- Zu teuer
- Separate High-Side-Versorgung benötigt
- Zu geringe Genauigkeit der Messkette
- Ohm'sches Gesetz nur vordergründig einfach, da es keinen idealen Widerstand und

In der Vergangenheit waren viele dieser Einwände und Nachteile auch berechtigt. Z.B. gibt es keine ideale Spannungsmessung zur Ermittlung des fließenden Stromes sondern sie oft durch äußere und parasitäre Einflüsse stark beeinflusst, wie folgende Gl. (1) zeigt:

$$U = R \cdot I + U_{th} + U_{offset} + U_{ind} + U_{iext} + \dots$$

Des Weiteren gibt es auch keinen idealen Widerstand, sondern der exakte Widerstandswert, dessen Kenntnis Voraussetzung für die korrekte Berechnung des fließenden Stromes ist, hängt auch von mehreren Einflussfaktoren ab, wie z.B. von der Temperatur (T), der Zeit (t), der Querschnittsfläche (A), der Permeabilität ( $\mu$ ),

der Dichte ( $\rho$ ), der Leistung ( $P$ ), der Frequenz ( $f$ ) und weiteren, siehe dazu Gl.(2):

$$R = R(T, t, A, \mu, \rho, P, f, \dots)$$

Doch die Fortschritte in der Technik und die inzwischen verfügbaren Technologien machen den größten Teil dieser Störgrößen beherrsch- und kompensierbar, so dass die „alten“ Einwände ggü. der shuntbasierten Strommessung auch für Phasenströme nicht mehr haltbar sind.

### ISA-WELD® Shunts der Isabellenhütte

Die massiven, in unterschiedlichster Ausprägung verfügbaren ISA-WELD® Shunts der Isabellenhütte unterscheiden sich deutlich vom altbekannten DIN-Shunt, sowohl in der Form als auch in den physikalischen Eigenschaften.



Abb. 5: DIN-Shunt

Die ISA-WELD® Shunts bestehen im Wesentlichen aus drei Bändern, welche in einem Endlosverfahren per Elektronenstrahl zusammenschweißt werden. Die beiden äußeren Kupfer-Bänder dienen als Anschluss des Shunts zur Stromeinprägung, das dazwischenliegende Widerstandsmaterial stellt den eigentlichen Widerstand dar.

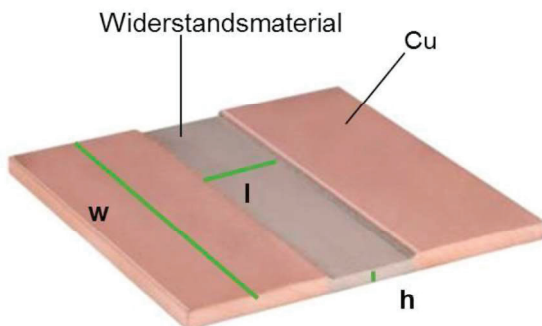


Abb. 6: Schematische Darstellung eines ISA-WELD® Shunts

Die Eigenschaften der Shunts werden hauptsächlich durch die speziell entwickelten Legierungen wie Manganin®, Zeranin® und Noventin® bestimmt. So berechnet sich z.B. der Widerstandswert  $R$ , wie in Gl. (3) dargestellt, aus dem spezifischen

Widerstandswert  $\rho$  verrechnet mit den Dimensionen des Widerstandsstreifens zusammen.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{\rho \cdot l}{w \cdot h}$$

Die direkte Verbindungstechnologie zwischen den Kupferanschlüssen und dem Widerstandsmaterial in Verbindung mit vielfältigen mechanischen Bearbeitungsmöglichkeiten ermöglichen die Kreation einer großen Palette sehr leistungsfähiger Shunts, die sich u.A. durch folgende Eigenschaften auszeichnen:

- Extrem niederohmig (bis 1  $\mu\Omega$ , „Standard-Werte“ sind z.B. 20  $\mu\Omega$  oder 100  $\mu\Omega$ )
- Sehr leistungs- und überlastfähig (z.B. 15 W kontinuierlich bei 100  $\mu\Omega$ )
- Geringe Induktivitäten (z.B. <1 nH bei 100  $\mu\Omega$ )
- Geringer TK des Widerstandswertes
- Sehr gute Langzeit-Stabilität
- Exzellente Linearität

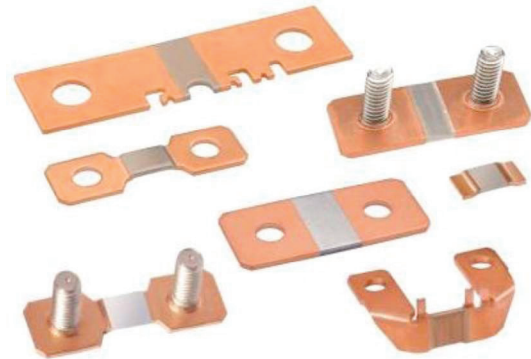


Abb. 7: Verschiedene Ausführungen von ISA-WELD® Shunts

### ISA-WELD® Shunts mit Präzisions-Elektronik gleich Präzisions-Stromsensor

Die ISA-WELD® Shunts in Kombination mit einer Präzisionselektronik ergeben eine hervorragende Basis für shuntbasierte Stromsensoren. Im Falle der Phasenstromsensoren wurde eine neu verfügbare Variante im Bereich der Sigma-Delta A/D-Wandler herangezogen und auf die produktspezifischen Anforderungen angepasst. Aus dem dadurch möglichen kosten-effizienten „Single-Chip-Design“ entstand die IPC-Produktfamilie.

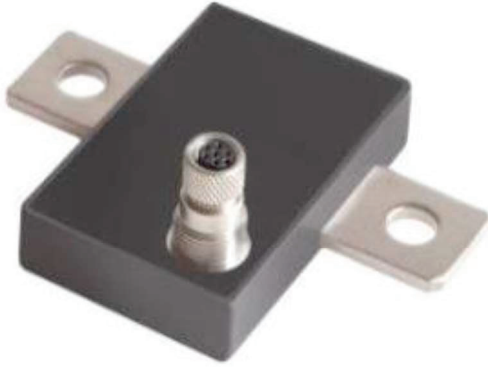


Abb. 9: Derivat der IPC Phasenstromsensor Produktfamilie (bis 500 A)

Diese Sensoren sind durch folgende Eigenschaften hervorragend auf die Messung der Phasenströme in Umrichtern zugeschnitten:

- Modularer Aufbau mit nominalen Messbereichen zwischen 100 A<sub>RMS</sub> und 2500 A<sub>RMS</sub>
- Gain und Offset über Temperatur abgeglichen
- Kompaktes Design (in Bezug auf den hohen Messbereich)
- Sehr hohe interne galvanische Trennung nach IEC-60664-1
  - 1000 V<sub>RMS</sub> / 1500 V<sub>DC</sub> working voltage
  - 4400 V<sub>RMS</sub> transient overvoltage
  - 8000 V impulse voltage (1,2/50 µs)
- Bis zu 20 MHz externer MCLK (hohe Abtastrate)

#### Verarbeitung des 1-Bit-Datenstromes

Der digitale 1-Bit-Datenstrom erlaubt dem Kunden eine sehr flexible Weiterverarbeitung und Auswertung der Messwerte, z.B. kann der gleiche Datenstrom parallel durch mehrere Dezimationsfilter laufen, die sich auf Grund unterschiedlicher Überabtastraten (Oversampling ratio, kurz OSR) in Datenausgaberate und Rauschen unterscheiden und so der Datenstrom für eine schnelle Überstromerkennung und gleichzeitig für die präzise Regelung verwendet wird.

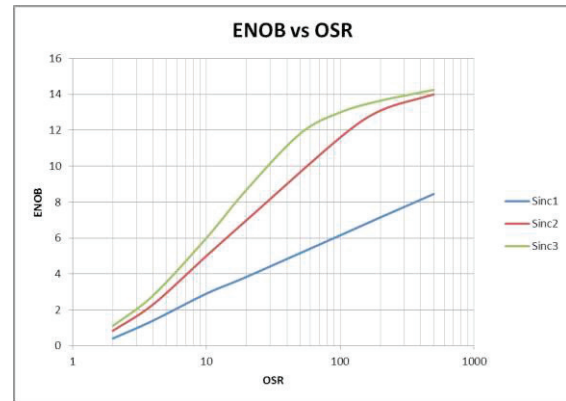


Abb. 9: Erreichbare ENOB (effective number of bits) in Abhängigkeit des OSR und des gewählten Dezimationsfilters

Neben der Möglichkeit zur Realisierung des Dezimationsfilters einen entsprechenden IC zu verwenden[3] gibt es vermehrt Hersteller, die Schnittstellen zum direkten Einlesen des 1-Bit-Datenstromes eines externen Sigma-Delta-Modulators in Mikrocontroller integrieren. Als weitere Möglichkeit ist der notwendige VHDL-Code zur Realisierung eines Dezimationsfilters in einem DPLD oder FPGA frei verfügbar.

#### Performance der IPC Phasenstromsensoren (beispielhaft)

Die folgenden Messungen wurden mit einem sinc3-Dezimationsfilter und einem OSR = 256 aufgenommen und zeigen beispielhaft die Performance der IPC Phasenstromsensoren hinsichtlich Genauigkeit und Linearität über Temperatur und Messbereich.

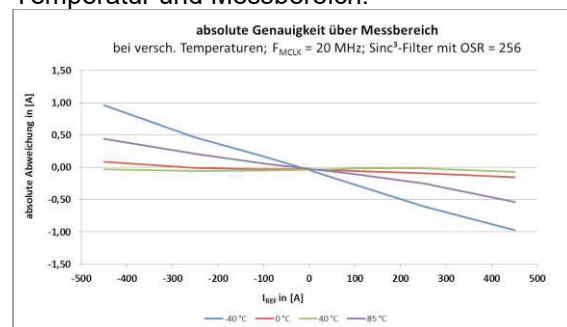


Abb. 10: Absolute Abweichung in Ampere über Temperatur und Messbereich

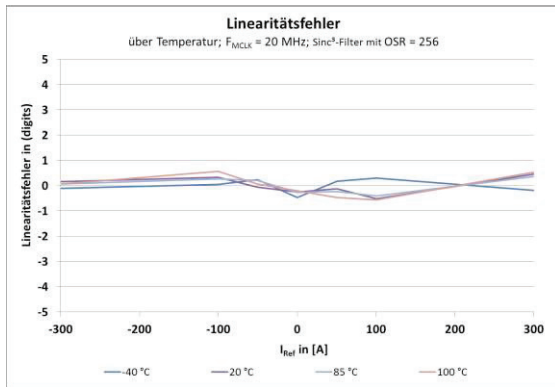


Abb. 11: Linearitätsfehler in digits über Temperatur und Messbereich

Durch den modularen Aufbau ist eine Individualisierung auf bestimmte Kundenanforderungen, wie z.B. hinsichtlich der Shunt-Geometrie, den Möglichkeiten zur mechanischen Integration, der Schnittstellenanbindung oder dem Packaging, schnell und kostengünstig umzusetzen, um so Kunden die bestmögliche Lösung für Ihre Applikation zu liefern.

#### Literatur- und Quellennachweis

- [1] [www.lem.com](http://www.lem.com)
- [2] [www.sensitec.com](http://www.sensitec.com)
- [2] <http://www.ti.com/product/AMC1210>