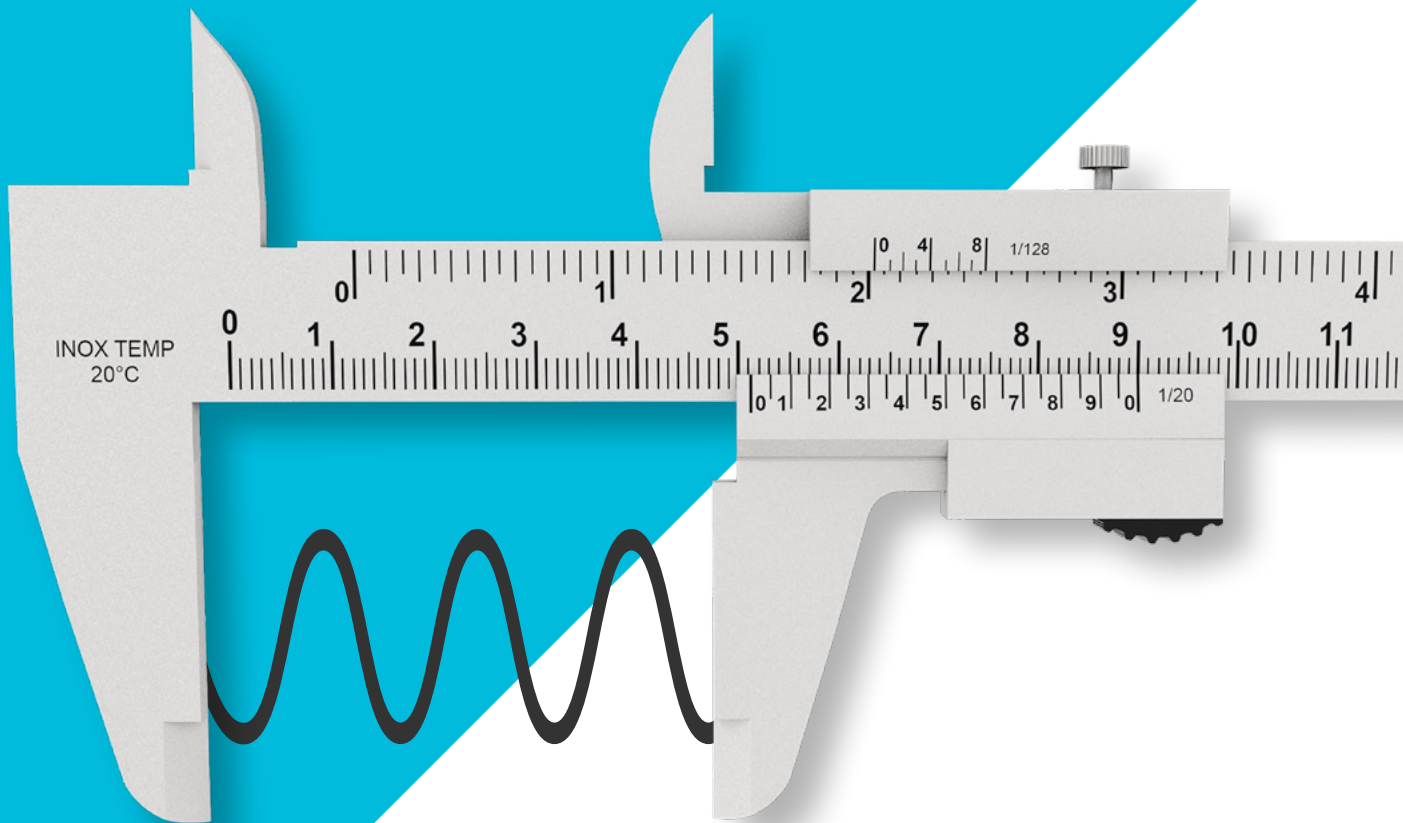


Jeden Tag bessere Ergebnisse - mit RS

Panta Rhei Strommessung



at.rs-online.com



Panta Rhei

Strommessung

Die präzise Messung des Stroms ist mit Blick auf aktuelle Entwicklungen der Energie-Erzeugung und ihres sparsamen Einsatzes in den Fokus vieler Elektronikentwicklungen auch im industriellen Umfeld gerückt. Fotovoltaik oder Elektromobilität sind hier nur zwei exponierte Beispiele. Es gilt, exakte Verbrauchs- und Leistungsdaten zu ermitteln - sei es um etwas zu regeln, abzurechnen oder zu schützen. Essenziell ist immer die Ermittlung des Stromflusses. Dieser Beitrag behandelt die beiden hauptsächlich eingesetzten Techniken ihn zu bestimmen: Die direkte und die indirekte Methode - Messung per Widerstand beziehungsweise per magnetischer Messung.

Die direkte oder Shunt-Strommessung basiert auf dem Ohmschen Gesetz und verleitet zu der Annahme, dass es sich um ein einfach zu beherrschendes Verfahren handelt. Dem ist auch so - wenn man einige Randbedingungen beachtet.

Der Shunt-Widerstand liegt in Reihe mit der Systemlast und erzeugt eine Spannung, die proportional zum Laststrom ist (Bild 1). Sie kann mit Verstärkern wie [Strommessverstärkern](#), [Operationsverstärkern](#), [Differenzverstärkern](#) oder [Instrumentenverstärkern](#) gemessen werden. Dieses Verfahren ist eine invasive Messung des Stroms, da der Shunt-Widerstand und die Messschaltung mit dem überwachten System verbunden sind.

Die direkte Erfassung wird typischerweise verwendet, wenn keine galvanische Trennung erforderlich ist. Ein Widerstand wird in der Regel für Lastströme von weniger als 100A und Spannungen von kleiner 100V eingesetzt.

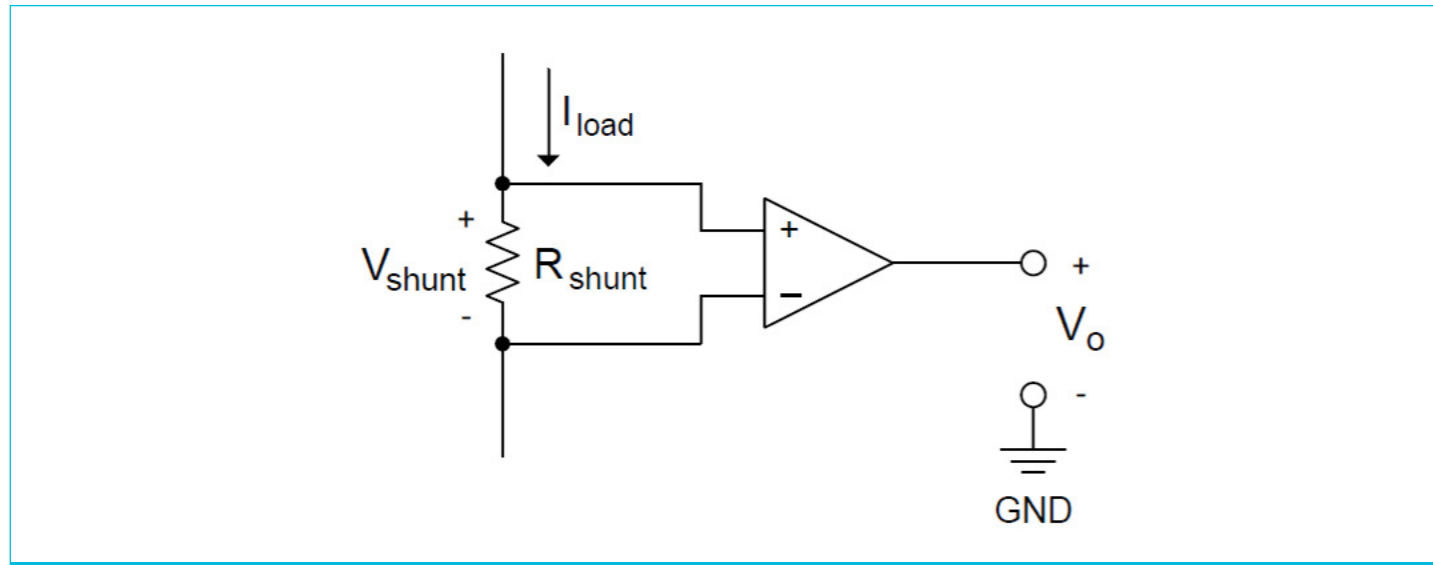


Bild 1. Der Shunt-Widerstand liegt in Reihe mit der Systemlast und erzeugt eine Spannung, die proportional zum Laststrom ist (Bild: Texas Instruments)

Welchen Shunt?

Im Folgenden soll ein wichtiger Faktor aufgezeigt werden, der sich auf die Wahl des Shunt-Widerstands auswirkt. Es ist die Berechnung des maximalen Widerstandswerts für eine Anwendung.

Der Shunt-Widerstand oder R_{shunt} ist der Widerstand, durch den der Laststrom in einer Stromerfassungs-Anwendung fließt. Aufgrund des Ohmschen Gesetzes wird eine als V_{shunt} oder V_{sense} bezeichnete Differenzspannung über R_{shunt} erzeugt, die dann von einem Differenzverstärker gemessen wird.

Die Auswahl des Werts von R_{shunt} basiert hauptsächlich auf zwei Faktoren - der erforderlichen Genauigkeit bei minimalem Laststrom und der Verlustleistung bei maximalem Laststrom und der damit verbundenen Größe und den Kosten des Widerstands.

Für die Ermittlung der minimalen Ungenauigkeit für eine Strommess-Anwendung wird in diesem Fall nur der Offset-Fehler des Verstärkers betrachtet. Er ist die dominierende Fehlerquelle bei niedrigen Lastströmen und bei daraus resultierenden niedrigen Erfassungsspannungen. Bild 2 zeigt auf der linken Seite, dass der Offset-Fehler abnimmt, wenn V_{sense} zunimmt.

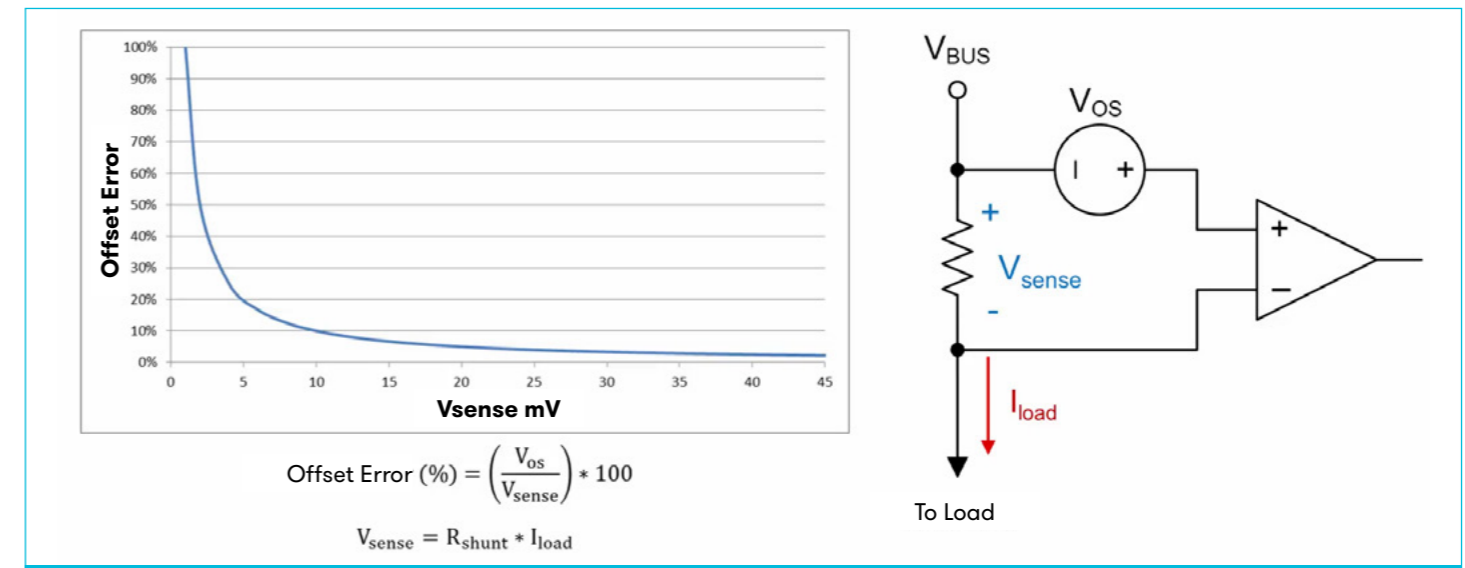


Bild 2. Der Offset-Fehler nimmt ab, wenn V_{sense} zunimmt. (Bild: Texas Instruments)

Je größer die über dem Shunt-Widerstand abfallende Spannung ist, desto genauer kann eine Messung aufgrund der festen Natur von V_{os} durchgeführt werden. Anders gesagt, dieser feste interne Verstärkerfehler führt zu einer größeren Unsicherheit, wenn das Eingangssignal kleiner wird.

Bei Verwendung eines theoretischen Strommessverstärkers mit V_{os} gleich 1mV und einer Messspannung V_{sense} von 1mV, ergibt sich eine Messunsicherheit von 100%, wie die Grafik und die Offset-Fehlerberechnung zeigen. Wenn V_{sense} auf 10mV erhöht wird, sinkt der Messfehler deutlich auf 10%. Die dominante Einschränkung bei minimalem Strom ist also auf den Offset-Fehler zurückzuführen.

Was tut sich bei maximalem Strom? Auf der linken Seite in Bild 3 ist ein Diagramm der Verlustleistung gegenüber dem Shunt-Widerstand für einen festen Laststrom dargestellt (blau). Die Verlustleistung im Shunt-Widerstand ist das Produkt aus der daran anliegenden Spannung und den durch ihn fließenden Strom oder das Produkt aus dem Shunt-Widerstand und dem Quadrat des durch ihn fließenden Stroms.

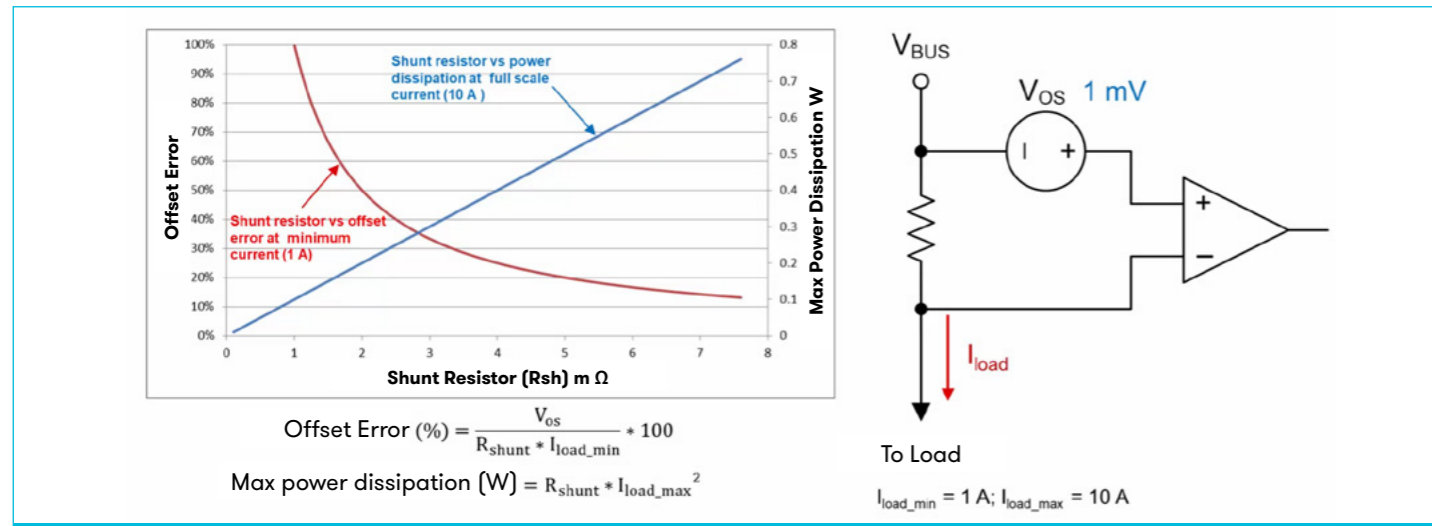


Bild 3. Es gibt einen Kompromiss zwischen der Maximierung der Genauigkeit bei minimalem Strom und der Minimierung der Verlustleistung bei maximalem Strom (Bild: Texas Instruments).

Das Erhöhen des Werts des Shunt-Widerstands vergrößert die über dem Widerstand abfallende Differenzspannung, wodurch der Fehler durch den Verstärker-Offset reduziert wird. Allerdings erhöht sich auch die Verlustleistung über dem Shunt-Widerstand, was in der Anwendung zu Wärme-, Größen- und Kostenproblemen führen kann.

Es gibt einen Kompromiss zwischen der Maximierung der Genauigkeit bei minimalem Strom und der Minimierung der Verlustleistung bei maximalem Strom. In einer Anwendung mit einem minimalen Strom von 1A und einem maximalen Strom von 10A wird ein Verstärker mit V_{OS} gleich 1mV eingesetzt. Die rote Kurve im Diagramm in Bild 3 zeigt die Variation des Offset-Fehlers bei minimalem Strom gegenüber dem Shunt-Widerstand für diese Anwendung. Die blaue Kurve zeigt die Variation der Verlustleistung bei maximalem Strom gegenüber dem Shunt-Widerstand. Die Erhöhung des Shunt-Widerstandswerts verbessert die Stromgenauigkeit, erhöht aber auch die Verlustleistung. Das Verringern des Werts des Widerstands reduziert die Anforderungen an die Verlustleistung, erhöht jedoch den Messfehler.

Um den optimalen Wert für den Shunt-Widerstand zu finden, müssen also sowohl die Genauigkeitsanforderungen der Anwendung als auch die zulässige Verlustleistung bei der Auswahl des Widerstands berücksichtigt werden.

Wenn für diese Anwendung ein 5-Milliohm-Widerstand gewählt wird, beträgt die Verlustleistung bei einem maximalen Laststrom von 10A etwa 0,5W und die Ungenauigkeit bei einem minimalen Laststrom von 1A ist 20%. Wenn man die minimale Ungenauigkeit auf 15% verbessern möchten, kann stattdessen ein Shunt-Widerstand von etwa 6,6 Milliohm gewählt werden.

Diese Wahl kostet jedoch etwa 0,66W Verlustleistung bei Vollaussteuerung. Eine höhere Verlustleistungsanforderung treibt die Größe und die Kosten des Shunt-Widerstands nach oben. Es muss also ein Kompromiss eingegangen werden. In diesem Fall 5% weniger Fehler im Austausch für 32% mehr Verlustleistung und eine mögliche Erhöhung der Widerstandsgröße und -kosten.

Alles drin

Die Verwendung eines Strommessverstärkers mit integriertem Strommesswiderstand "vereinfacht" die Widerstandsauswahl und das PCB-Layout. INA250-, INA253- und INA260-ICs von Texas Instruments verfügen über einen Strommesswiderstand, integriert in das gleiche Gehäuse wie der Current-Sense-Verstärker. Verbindungen zum Strommesswiderstand sind optimiert, um die beste Messgenauigkeit und Temperaturstabilität zu erreichen.

INA250 und INA253 sind Strommessverstärker mit analogem Ausgang, während INA260 ein digitaler Sensor ist, der Strom, Leistung und Spannung durch eine SMBus-Schnittstelle (System Management Bus) ausgibt.

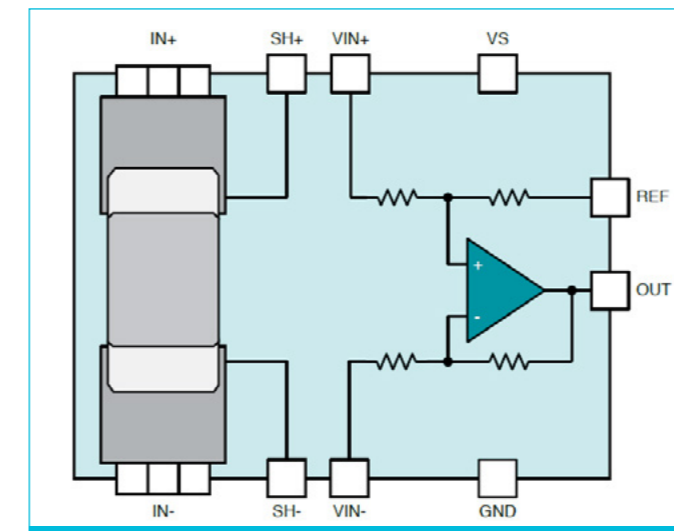


Bild 4. Texas Instruments [INA250](#) - Strommessverstärker mit integriertem Strommesswiderstand (Bild: Texas Instruments).

Bild 4. zeigt das Blockdiagramm des INA250. Dieses IC bietet externe Anschlüsse, die eine Filterung der Messspannung erlauben oder eine direkte Verbindung zum Strommessverstärker ermöglichen. Die Verstärkung des Verstärkerelements ist so optimiert, dass der Fehler der Gesamtsystem-Verstärkung vergleichbar ist mit der Verwendung eines 0,1%-Messwiderstandes oder eines besseren. Die integrierte Shunt-Technologie, die im INA250 verwendet wird, kann Ströme bis zu 15A vertragen. Der Chip hat einen maximalen Gesamtsystem-Verstärkungsfehler von 0,3% bei Raumtemperatur und 0,75% über den Temperaturbereich von -40°C bis 125°C. Die internen Verbindungen zum Strommesswiderstand sind im Gehäuse und für jedes IC kalibriert, um Abweichungen zu beseitigen, die von den Widerstands-Anschlusspunkten ausgehen.

Magnetische Strommessung

Die indirekte oder magnetische Strommessung basiert auf dem Ampere-Gesetz. Gemäß ihm ist das Magnetfeld im Raum um einen Leiter herum proportional zum elektrischen Strom durch diesen Leiter. Durch Platzieren eines Magnetsensors (z. B. eines Hall-Sensors, Bild 5) in der Nähe des stromführenden Leiters wird über dem Sensor eine Spannung erzeugt, die proportional zu dem vom Sensor detektierten Magnetfeld ist.

Dieses Verfahren ermöglicht eine nicht-invasive Messung, bei der die Messschaltung nicht elektrisch mit dem überwachten System verbunden ist. Es macht die magnetische Strommessung zu einer ausgezeichneten Wahl für Hochspannungs- oder dynamische Strommessungen. In der Vergangenheit wurde die indirekte Strommessung typischerweise nur verwendet, um Ströme von 100A oder mehr zu messen. Die Sensoren waren relativ teuer und dem Erfassen von Strömen auf einer Leiterplatte nicht förderlich. Außerdem war oft ein gewisses Maß an magnetischem Design erforderlich, z. B. die Verwendung von Magnetkernen, um den vom Sensor "gesehenen" Magnetfluss zu dämpfen oder zu konzentrieren. Fortschritte in der Technologie und Preissenkungen haben jedoch zu Bauelementen wie [magnetische Stromsensoren](#) im Gehäuse geführt, die relativ kostengünstig und für niedrigere Ströme auf einer Leiterplatte gut geeignet sind.

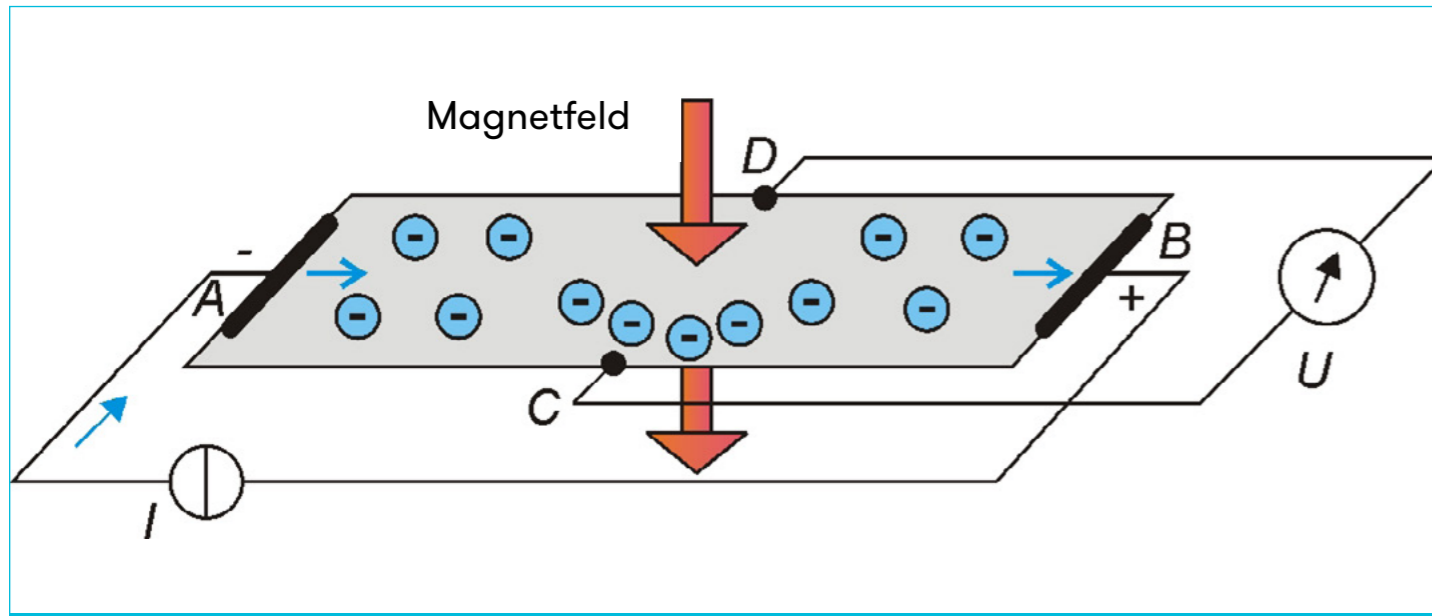


Bild 5. Prinzipielle Wirkungsweise eines Hall-Sensors (Bild: Texas Instruments).

Wie erwähnt, besagt das Ampere-Gesetz, dass das Magnetfeld im Raum um einen Leiter herum proportional zum elektrischen Strom durch diesen Leiter ist. Aber welche Richtung haben die magnetischen Feldlinien? Die Rechte-Hand-Regel ist eine Methode, um dies zu bestimmen. Die magnetischen Feldlinien um einen Leiter bilden konzentrische Kreise, senkrecht um den Leiter herum. Wenn der Daumen der rechten Hand nach oben in die Richtung des Stromflusses (von + nach -) zeigt, krümmen sich die Finger in die gleiche Richtung wie die Richtung der Magnetfeldlinien.

Die Richtung des Magnetfeldes ist für Magnet-Stromsensoren wichtig, da diese Bauteile eine bestimmte Empfindlichkeitsachse haben. Wenn die Richtung des magnetischen Flusses nicht in ihrer Empfindlichkeitsachse verläuft, werden sie das Feld nicht erfassen und keine messbare Ausgabe erzeugen. Beispielsweise reagieren die Sensoren normalerweise empfindlich auf Felder, die senkrecht zur Vorderseite ihres Gehäuses verlaufen.

Es gibt unterschiedliche Implementierungen der Magnetstrommessung, die alle die gleiche grundlegende Physik verwenden, die durch das zuvor beschriebene Ampere-Gesetz gegeben ist. Der Unterschied besteht in der mechanischen und magnetischen Integration der Lösung: Wo wird das Feld erzeugt und relativ zum Stromfluss gemessen? Dieser Lösungsraum kann je nach mechanischer Integration grob in drei verschiedene Typen unterteilt werden.

Modulbasierte Erfassung

Die [modulbasierte Erfassung](#) (Bild 6) verwendet typischerweise einen magnetischen Toroid oder eine andere Geometrie, um das Magnetfeld zu konzentrieren, das durch den stromführenden Leiter erzeugt wird. Bekannteste Beispiele dieser Bauform sind die sogenannten [Stromzangen für Multimeter](#). (Bild 7).

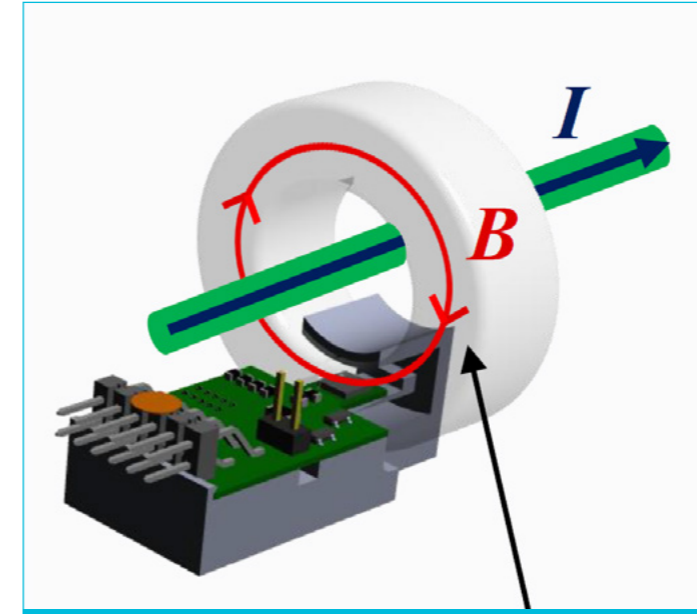


Bild 6. Modulbasierte Erfassung konzentriert das Magnetfeld. (Bild: Texas Instruments)



Bild 7. RS Pro ICMA1 Strommesszange (Bild: RS Components)

Erfassung des Umgebungsfelds

Eine weitere Implementierung der magnetischen Strommessung ist die Erfassung des Umgebungsfelds, das durch eine PCB-Leiterbahn, Sammelschiene oder einen anderen Leiter erzeugt wird (Bild 8). Dies wird unter Verwendung eines linearen [Hallensors](#) in einem festen mechanischen Abstand vom Leiter erreicht. Diese Lösung kann auch einen magnetischen Konzentrador oder eine Abschirmung verwenden, um die Signalpegel zu verbessern oder die Auswirkungen von Streufeldern zu reduzieren.

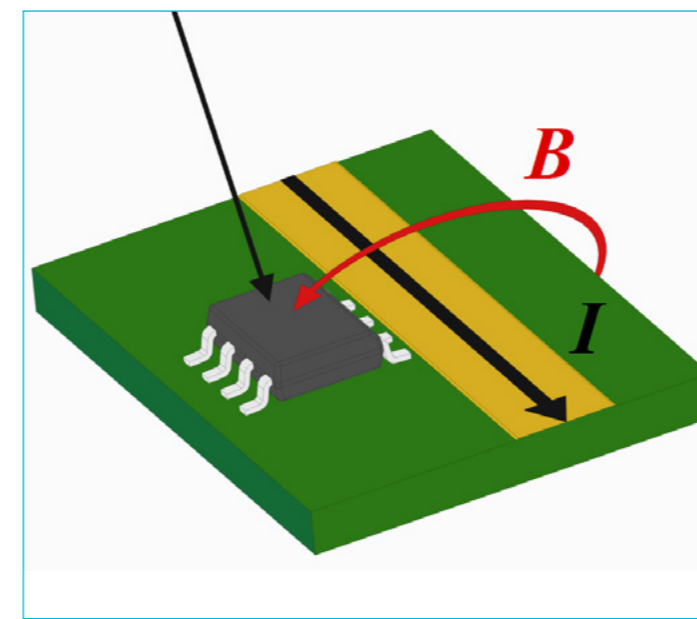


Bild 8. Strommessung durch die Erfassung des magnetischen Umgebungsfelds (Bild: Texas Instruments)

Erfassung im Gehäuse

Der dritte Typ schließlich ist die magnetische Stromerfassung im Gehäuse (Bild 9). Bei dieser Technologie fließt der zu messende Strom tatsächlich durch das Bauelement-Gehäuse, und das durch den Stromfluss durch den Leiterraum erzeugte Magnetfeld wird intern mit einem isolierten Sensor-IC gemessen.

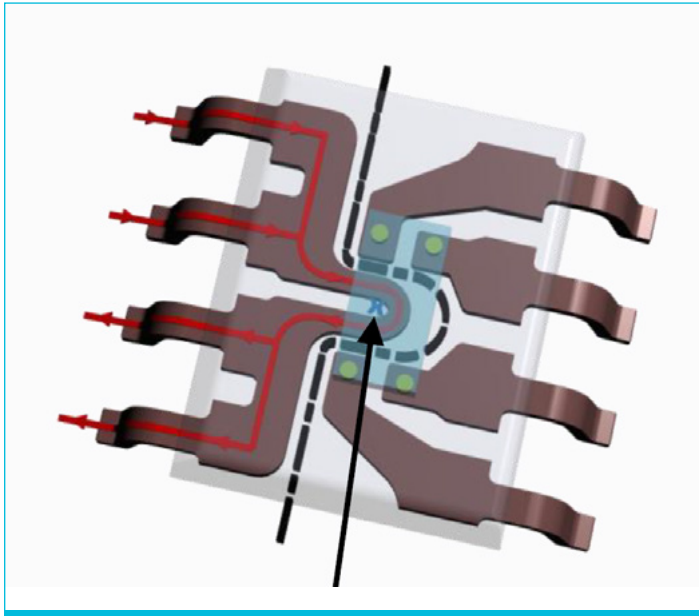


Bild 9. Magnetische Stromerfassung im Gehäuse (Bild: Texas Instruments)

Was sind die Herausforderungen beim Einsatz magnetischer Stromsensoren?

Bei der Entwicklung eines Moduls ist ein erhebliches Maß an mechanischer und magnetischer Konstruktion erforderlich. Dies kann für Ingenieure, die normalerweise im Elektrobereich arbeiten, ein unbekanntes Gebiet sein. Ein Modul kann zwar eine leistungsstarke Sensorlösung schaffen, aber die Komplexität und die Kosten, die mit dem Moduldesign verbunden sind, machen es für viele Anwendungen unerschwinglich.

Umgebungssensoren werden durch den Abstand zum Magnetfeld beeinflusst, das vom stromführenden Leiter erzeugt wird, während Umgebungs- und In-Package-Typen beide anfällig für Störungen durch magnetische Streufelder, andere magnetische Materialien im System und das Layout der gedruckten Schaltung sind. Magnetische Stromsensoren im Gehäuse haben einige weitere einzigartige Herausforderungen, einschließlich der Endlichkeit der Isolationsbarriere und der thermischen Grenzen ihrer Strommessfähigkeiten. Es gibt Lösungen für diese Herausforderungen, zum Beispiel können Streufelder durch den Einsatz von Differentialsensoren oder durch Abschirmung des Sensors gehandhabt werden.

Fazit

Die vermeintlich unkomplizierte Strommessung per Spannungsabfall am Widerstand kann doch, wie oben ausgeführt, den einen oder anderen Fallstrick beinhalten. Sind diese "Fallstricke" bekannt können sie dank einer breiten Auswahl an Messwiderständen - was Ungenauigkeit, Widerstandswert und Temperaturverhalten betrifft - umgangen werden. Auch die Auswahl an Messverstärkern ist umfassend, sodass ein passender Typ für jedes Messproblem gefunden werden kann.

Die magnetische Strommessung galt in der Vergangenheit als Betätigungsfeld für absolute Spezialisten. Hier bietet der Markt mittlerweile sehr gut spezifizierte Standard-Bauelemente, die der Technologie den "Schrecken" nimmt.

Nach Unterlagen von Texas Instruments