

C11.2

Potentialgetrennte Stromsensoren mit magnetoresistiven Sensorelementen

F. Dettmann, U. Loreit, Institut für Mikrostrukturtechnologie und Optoelektronik,
Im Amtmann 6, 35578 Wetzlar, 0644 1/ 71054

Abstract

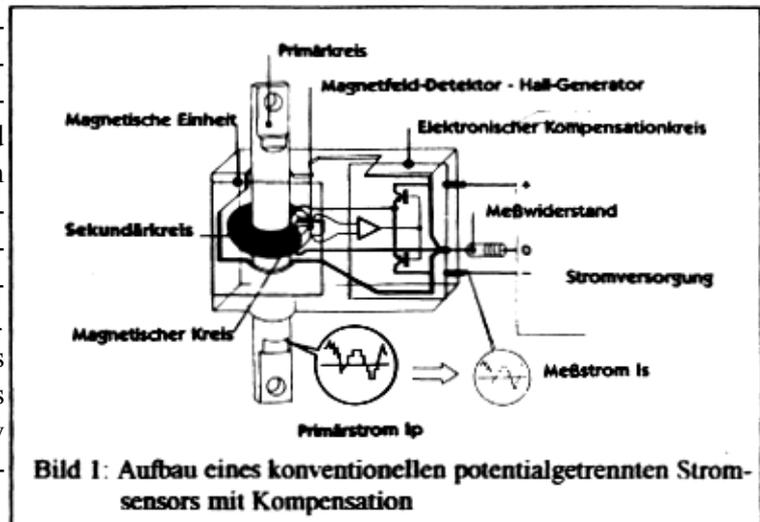
A new magnetoresistive magnetic field sensor element with a chip area of $2 \cdot 1 \text{ mm}^2$ has been developed for application in non-intrusive current sensors. The output voltage of the Wheatstone bridge consisting of magnetoresistive thin film stripes with barberpole structure of equal slope is proportional to the local variation in the magnetic field in the area of the element. Integrated in the thin film structure the element contains a conductor for compensation. A current through this conductor can be used to compensate the magnetic field in the area of the magnetoresistive thin film stripes which arises from the current to be measured. The high sensitivity of the magnetoresistive sensor elements is necessary for the direct measurement of the differences in the magnetic field produced by a suitable arrangement of the input current conductor. Current sensors with equal design of the electronic circuit are possible in a current range from mA to kA. The first current sensors using the newly developed sensor elements have a current range of 20 A. The sensor chip, the circuit, bias field magnets of the magnetization of the magnetoresistive stripes, and the input current conductor are mounted onto a thick film hybrid ceramic carrier with an area of 4 cm^2 . Limited by the properties of the circuit the current sensors operate in a temperature range from $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ to $85 \text{ }^\circ\text{C}$, in a frequency range from 0 Hz up to more than 10 MHz, and a break down voltage between input and output circuit of more than 7.2 kV.

Zusammenfassung

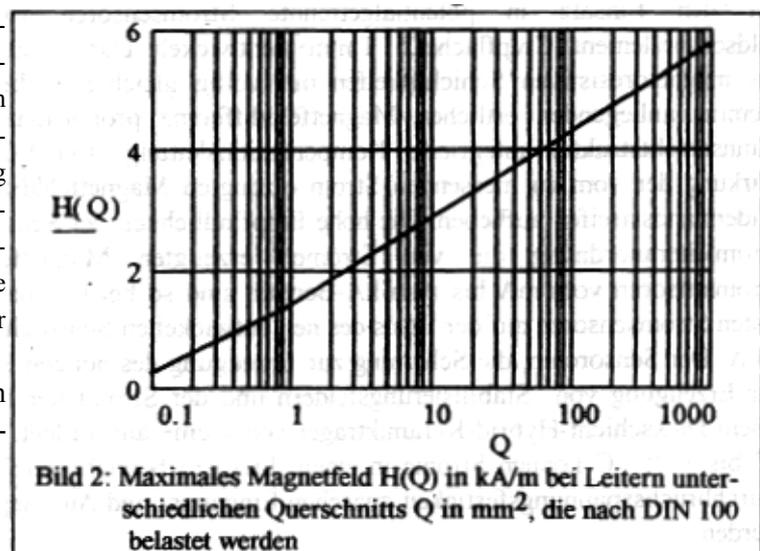
Für den Einsatz in potentialgetrennte Stromsensoren wurde ein neues magnetoresistives Feldsensorelement (Chipfläche $2 \cdot 1 \text{ mm}^2$) entwickelt. Das Ausgangssignal der Widerstandsbrücke, die aus magnetoresistiven Schichtstreifen mit völlig gleicher Barberpolstruktur besteht, ist zu der am Element anliegenden örtlichen Magnetfelddifferenz proportional. Das Element enthält eine in die Dünnschichtstruktur integrierte Kompensationsleitung. Ein Strom durch diese Leitung kann die Wirkung der vom zu messenden Strom erzeugten Magnetfelddifferenz am Ort der magnetoresistiven Widerstandsstreifen aufheben. Die hohe Empfindlichkeit der Sensorelemente gestattet es, bei geeigneter Stromleiteranordnung die von Strömen erzeugten Magnetfelddifferenzen direkt nachzuweisen. Stromsensoren vom mA bis zum kA-Bereich sind so bei gleichem Schaltungsaufbau realisierbar. Die ersten Stromsensoren auf der Basis des neu entwickelten Sensorchips haben einen Strommeßbereich von 20 A. Der Sensorchip, die Schaltung zur Erzeugung des nötigen Kompensationsstromes, Dauermagnete zur Erzeugung von Stabilisierungsfeldern und der Stromleiter für den zu messenden Strom sind auf einem Dickschicht-Hybrid-Keramikträger von 4 cm^2 angeordnet. In einem Temperaturbereich von $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+85 \text{ }^\circ\text{C}$ können Ströme in einem Frequenzbereich von 0 Hz bis mehr als 10 MHz bei einer Durchbruchspannungsfestigkeit zwischen Eingangs- und Ausgangskreis von mehr als 7,2 kV gemessen werden.

1. Einleitung

Moderne potentialgetrennte Stromsensoren nutzen das vom zu messenden Strom erzeugte Magnetfeld und arbeiten zum überwiegenden Teil nach dem Kompensationsprinzip. Der Aufbau solcher Stromsensoren ist schematisch in Bild 1 dargestellt /1/. Als Teil des Primärkreises, in dem der zu messende Strom fließt, tritt ein Stromleiter durch den Sensor. Er ist von der magnetischen Einheit umgeben. Diese besteht aus einem weichmagnetischen geschlitzten Ringkern, auf dem sich eine zum Sekundärkreis gehörende Wicklung befindet. Im Spalt des Ringkernes, wo die magnetische Feldstärke ein Vielfaches des Wertes im freien Raum um den Stromleiter beträgt, ist ein Magnetfeldsensor vorhanden. Üblicherweise werden hier Hallelemente verwendet. Der Sensorausgang ist mit dem elektronischen Kompensationskreis verbunden. Dieser sorgt dafür, daß entsprechend dem Sensorausgangssignal ein Strom in die Wicklung des Sekundärkreises geschickt wird, der den im Ringkern durch den zu messenden Strom erzeugten Magnetfluß gerade aufhebt. Der Strom im Sekundärkreis stellt das Ausgangssignal des Stromsensors dar. Er kann durch Verwendung eines Meßwiderstandes auch in eine proportionale Spannung umgewandelt werden. Der Ausgangsstrom ist um die Windungszahl der Wicklung geringer als der Primärstrom. Als Hauptvorteile eines solchen Stromsensors sind die Unabhängigkeit, von Störmagnetfeldern, auch den von benachbarten Strömen erzeugten, die durch die Verwendung des Ringkerns erreicht wird, und die Unabhängigkeit des Meßwertes von der Nichtlinearität und Temperaturabhängigkeit der Kennlinie des Magnetfeldsensors, die durch das Kompensationsprinzip erhalten wird, zu nennen. Nachteilig sind das große Volumen des Sensors, besonders für hohe Werte des zu messenden Stromes, und die relativ aufwendige Herstellung der Ringkernwicklung.



Die seit längerem bekannten Magnetfeldsensoren aus dünnen ferromagnetischen Schichten, in denen der anisotrope magnetoresistive Effekt auftritt /2/, haben eine wesentlich höhere Magnetfeldempfindlichkeit als Hallelemente. Sie sind deshalb auch geeignet, die in unmittelbarer Nähe von Stromleitern auftretenden Magnetfelder ohne Verstärkung durch einen geschlitzten Ringkern zu messen. Diese Aussage wird durch Bild 2 unterstützt. Hier sind die Magnetfeldstärken, die in der Nähe von Stromleitern existieren, für verschiedene Leiterquerschnitte, die entsprechend der DIN 100 mit ihrem zulässigen Maximalstrom belastet werden, dargestellt.



Vorausgesetzt wurde ein rechteckiger Querschnitt mit einer Breite, die fünfmal größer ist als die Dicke. Der Abstand zum Leiter beträgt 1 mm. Obwohl der Querschnitt und damit auch der Strom in der Darstellung um vier Größenordnungen variiert, steigt die Magnetfeldstärke nur um einen Faktor fünf an. Sie bleibt immer in dem Bereich, der den magnetoresistiven Sensoren sehr gut zugänglich ist.

Die direkte Messung von Strömen mit herkömmlichen magnetoresistiven Sensoren stößt allerdings auf zwei Schwierigkeiten, die beim oben vorgestellten Stromsensorprinzip nicht mehr existieren. Das sind einerseits Probleme, die sich aus der Nichtlinearität und Temperaturabhängigkeit der Kennlinien, die auch bei diesen Sensorelementen vorhanden sind, ergeben und andererseits Probleme, die durch das Vorhandensein natürlicher und technischer Störmagnetfelder gegeben sind. Zur Lösung der Aufgabe wurde deshalb ein neues magnetoresistives Sensorelement entwickelt, das im folgenden Abschnitt vorgestellt wird. Danach wird der Aufbau des potentialgetrennten Stromsensors mit diesem neuen Element beschrieben und es werden an Sensormustern erhaltene Meßergebnisse diskutiert.

2. Feldgradienten-Sensorelement mit integrierter Kompensationsleitung

Ein magnetoresistives Sensorelement besteht aus Widerständen, die durch ferromagnetische Dünnschichtstreifen mit Barberpolstrukturen /2; 3; 4; 5/ gebildet werden. Der Widerstand der Dünnschichtstreifen ändert sich durch Einwirkung der Magnetfeldkomponente in der Schichtebene, die senkrecht auf der Streifenlängsrichtung steht. Die Magnetfeldkomponente in Streifenlängsrichtung verringert die Empfindlichkeit der Widerstandsänderung. Die senkrecht zur Schichtebene gerichtete Komponente hat keine Wirkung. Die Widerstandsänderung ist von der Feldrichtung abhängig und in einem begrenzten Feldbereich linear. Zur Unterdrückung des Einflusses von Temperaturänderungen ist es üblich, Brückenschaltungen zu verwenden. Auch in dem neuen Feldgradienten-Sensor ist eine Brücke realisiert. Diese ist im oberen Teil von Bild 3 als elektrisches Schaltbild dargestellt. Auf die vier Brückenwiderstände 1 bis 4 wirkt neben dem Magnetfeld des zu messenden Stromes noch das Feld des Stromes I_k der durch den schematisch dargestellten

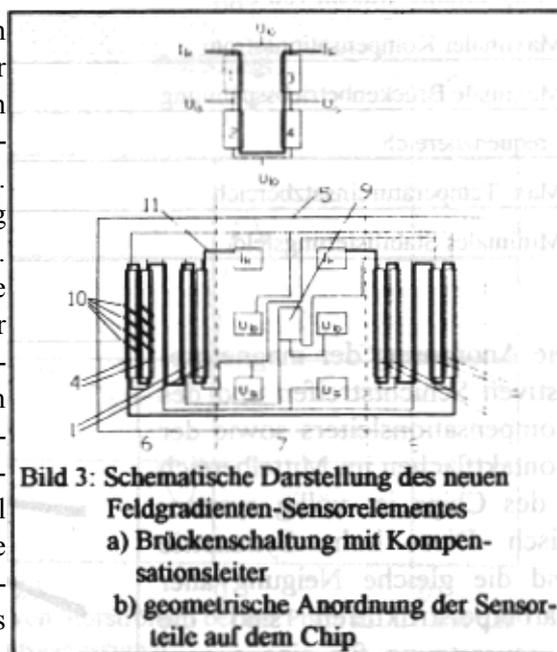


Bild 3: Schematische Darstellung des neuen Feldgradienten-Sensorelementes
a) Brückenschaltung mit Kompensationsleiter
b) geometrische Anordnung der Sensorteile auf dem Chip

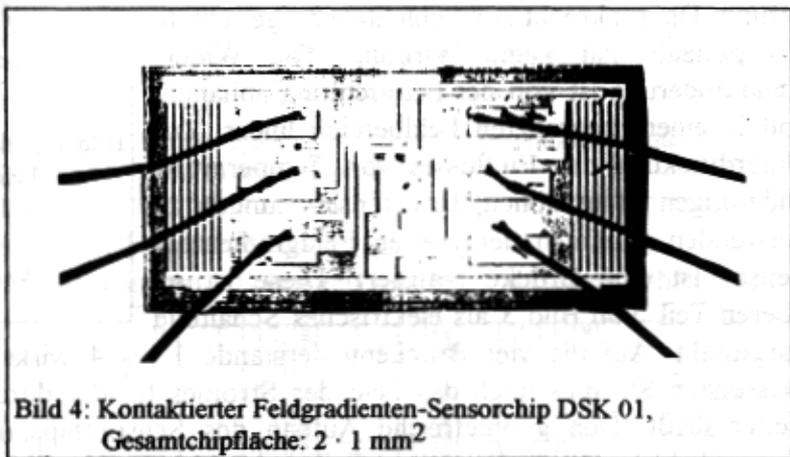
Leiter fließt. Den geometrische Aufbau des Sensorchips, in dem diese Brückenschaltung verwirklicht ist, zeigt der untere Teil des Bildes 3. Die mit 1 und 4 sowie die mit 2 und 3 bezeichneten, in der Brückenschaltung jeweils diagonal angeordneten Widerstände liegen hier in den Bereichen 6 und 8 der Chipfläche direkt nebeneinander. Sie bestehen jeweils aus zwei hintereinandergeschalteten Schichtstreifen. Alle Schichtstreifen tragen eine Barberpolstruktur 10 mit gleichem Winkel, wie sie der Einfachheit halber nur für den Widerstand 4 dargestellt ist. Ein homogenes Magnetfeld wird deshalb alle vier Widerstände um den gleichen Betrag ändern und die Brückenausgangsspannung U_a bleibt unverändert. Besteht jedoch eine Differenz in der Feldstärke in den Bereichen 6 und 8, so werden die entsprechenden Widerstände ungleich geändert und es kommt zu einem Ausgangssignal. Das Ausgangssignal wird besonders groß, wenn die Feldrichtungen in den Bereichen 6 und 8 entgegengesetzt sind. Es ist jedoch nicht vorgesehen, die zu dem einwirkenden Magnetfeld gehörige Ausgangsspannung der Sensorbrücke anzuzeigen. Auch hier wird das Kompensationsprinzip angewendet. Das

Ausgangssignal U_a wird einem Verstärker zugeführt, der seinen Ausgangsstrom in den integrierten Leiter I_K einspeist. Dort bewirkt er, daß das äußere Magnetfeld gerade aufgehoben wird. Die dazu nötige Leitungsführung ist dem unterem Teil des Bildes 3 zu entnehmen. Die Auswertung des Meßsignales kann dann wie üblich so erfolgen, daß der Kompensationsstrom als Ausgangsgröße dient oder eine an einem Widerstand daraus gewonnene Spannung.

Tabelle 1: Kennwerte des Feldgradienten-Sensorelementes mit integrierter Kompensation

Brückenwiderstand	R_B	1,5...2,5	$k\Omega$
Kompensationsleiterwiderstand	R_K	50 70	Ω
Isolationswiderstand zwischen R_B und R_K	R_{ISO}	≥ 20	$M\Omega$
Durchschlagspannung zwischen R_B und R_K	U_D	≥ 100	V
Feldkonstante des Kompensationsleiters	K_H	60	A/m/mA
Empfindlichkeit der Brücke	S_U	3...3,5	mV/V/kA/m
Offsetspannung der Brücke (abgeglichen)	U_{off}/U_B	0,3	mV/V
Temperaturkoeffizient von U_{off}	T_{KO}/U_B	≤ 1	$\mu V/V$
Maximaler Kompensationsstrom	I_{kM}	50	mA
Maximale Brückenbetriebsspannung	U_{BM}	15	V
Frequenzbereich	f_a	0... 10	MHz
Max. Temperatureinsatzbereich	T_a	-273..200	$^{\circ}C$
Minimales Stabilisierungsfeld	H_X	2	kA/m

Die Anordnung der magnetoresistiven Schichtstreifen und des Kompensationsleiters sowie der Kontaktflächen im Mittelbereich 7 des Chips ist völlig symmetrisch. Diese hohe Symmetrie und die gleiche Neigung aller Barberpolstrukturen sind die Voraussetzung für eine gegenüber herkömmlichen magnetoresistiven Sensoren wesentlich herabgesetzte Nullpunktsdrift bei Temperaturänderungen. Das gilt auch für solche Temperaturänderungen, die durch den Betriebsstrom der Brücke und den Kompensationsstrom erzeugt werden. Der Nullpunkt der Sensorbrücke kann durch einen Lasertrimmvorgang abgeglichen werden. Die dazu notwendige Trimmfläche 9 ist in der Mitte der Chipstruktur platziert. Bild 4 zeigt ein realisiertes Sensorchip. Die Chipfläche beträgt $2 \cdot 1 \text{ mm}^2$. Die Breite der magnetoresistiven Widerstandsstreifen und des Kompensationsleiters liegt bei $5 \mu\text{m}$. Die Barberpolstreifen haben Breiten von $2 \mu\text{m}$. Die charakteristischen Parameter des Sensorchips sind in Tabelle 1 zusammengestellt.



3. Stromsensor mit Feldgradienten-Sensorelement

Daß das neuentwickelte Sensorelement besonders empfindlich für entgegengesetzt gerichtete Magnetfelder in den Bereichen 6 und 8 ist, wird in der Stromsensoranordnung, die im Bild 5 schematisch dargestellt ist, ausgenutzt. Der zu messende Strom



Bild 5: Prinzip des Stromsensoraufbaus
12: Sensorchip, 13: Isolation
14: Eingangsstromleiter

1 fließt unter dem Sensorchip 12, der vom Stromleiter 14 durch eine Keramik 13 isoliert ist, hin und wieder zurück und erzeugt so in den entsprechenden Sensorbereichen entgegengesetzt gerichtete Magnetfelder. Diese werden mit Hilfe des Kompensationsstromes am Ort der magnetoresistiven Schichtstreifen aufgehoben. Zwischen dem als Ausgangsgröße dienendem Kompensationsstrom und dem zu messenden Strom besteht auch hier ein bestimmtes Verhältnis. Dieses ist aus den geometrischen Abmessungen des

Eingangsstromleiters und dem Abstand zur Sensorchipoberfläche eindeutig ableitbar. Für welchen Strombereich der Sensor eingesetzt wird, kann durch die Dimensionierung des entsprechenden Stromleiters festgelegt werden. Ein wichtiges Problem stellte die Wirkung von in der Nähe des Stromsensors fließenden Störströmen auf das Sensorausgangssignal dar. Da hier die abschirmende Wirkung eines weichmagnetischen Ringes nicht genutzt werden sollte, war eine andere Lösung zu erarbeiten. Sie wurde schließlich mit der Schaffung eines Feldgradienten-Sensors anstelle der bisher eingesetzten Feldsensoren gefunden. Wie die Wirkung in der Nähe vorbeifließender Störströme auf das Sensorausgangssignal ist, sieht man in Bild 6. Aufgetragen ist die maximal mögliche Störung in Prozent des Meßbereiches, wenn der Störstrom dieselbe Stromstärke hat, wie sie der Meßbereich des Sensors angibt. Schon bei einem Abstand von 10 mm liegt die maximale Störung, die nur für eine ganz bestimmte

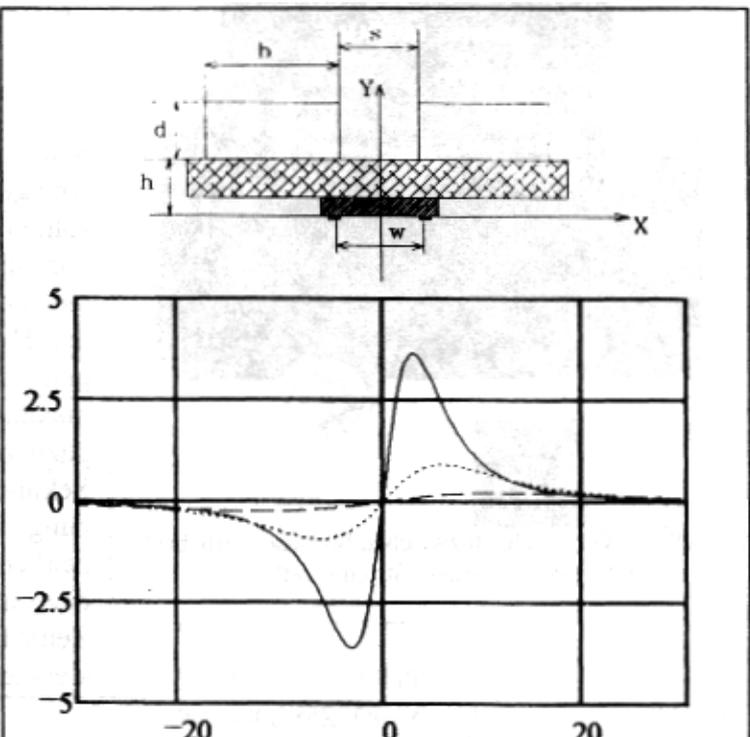


Bild 6: Einfluß von Störströmen bei der Position X, Y auf das Sensorausgangssignal
a) Querschnitt durch den Stromsensor und Festlegung der Koordinaten
b) Relatives Signal (in Prozent) eines Störstromes von der Größe des Meßbereiches in Abhängigkeit von X (1: Y = 5 mm; 2: Y = 10 mm; 3: Y = 20 mm)

Position des Störstromleiters auftritt, unterhalb von einem Prozent. In praktischen Anordnungen dürfte sie wesentlich darunter liegen, da größere Abstände ohne weiteres einzuhalten sind und die ungünstigste Position des Störstromes leicht vermeidbar ist. Es wurden Stromsensormuster mit unterschiedlichem Aufbau untersucht. Ein Stromsensor mit möglichst geringer Baugröße ist in Bild 7 dargestellt. Er hat hier die Größe eines üblichen DIL 14 - Gehäuses. Allerdings ist in diesem Muster die Kompensationsschaltung nicht



Bild 7: Stromsensor ohne Kompensationsschaltung im DIL-14-Gehäuse

enthalten. Bei Bauelementen dieser Art ist der Strommeßbereich sicher auf Werte unterhalb von 20 A begrenzt. Vollständige Stromsensoren wurden als Hybridschaltung auf Keramikträgern aufgebaut. Bild 8 zeigt ein Beispiel. Auf der Oberseite des Keramikträgers sind das Sensorelement mit zwei danebenliegenden Stützmagneten und die Kompensationsschaltung angeordnet. Der Stromleiter befindet sich unterhalb des Trägers. Damit ist die hohe Isolationsfestigkeit von mehr als 7,2 kV ohne Probleme realisierbar, im dargestellten Muster ist die gesamte Stromsensorenfläche von der Größe



Bild 8: Abbildung einer Ausführung des Stromsensorhybridmoduls (mit Stromleiter auf der Unterseite als Spiegelbild)



Bild 9: Größenvergleich zwischen Stromsensorhybrid und konventionellem Stromwandler

2 2 cm². Einen Größenvergleich mit konventionellen Stromsensoren zeigt Bild 9. Es ist erkennbar, daß das Volumen der Sensoren bei gleichem Strommeßbereich auf wenige Prozent reduziert ist. Gerade daraus sollten sich viele neue Anwendungsbereiche von Stromsensoren ableiten lassen. Der kompakte Aufbau des Stromsensors in der Hybridschaltung der auch die weitestgehende Symmetrie in der Anordnung zur maximalen Abschwächung der Wirkung kapazitiver Kopplungen zwischen Primär- und Sekundärkreis ermöglicht, ist die Voraussetzung für eine ausgezeichnete Wiedergabe zeitlicher Stromverläufe. Ein Meßergebnis dazu ist in Bild 10 dargestellt. Hier wird die Zeitabhängigkeit eines Stromimpulses, wie sie bei galvanischer Kopplung an einem Meßwi-

derstand im Primärkreis festgestellt wurde (Kurve 1) mit dem Ausgangssignal des potentialgetrennten Stromsensors (Kurve 2) verglichen. Die Gesamtdauer des Stromimpulses beträgt lediglich 5 µs. Wie das Bild zeigt, liegt die mit dem Stromsensor in der verwendeten Schaltung erreichte zeitliche Auflösung im Bereich von 0,1 µs. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich der neue potentialgetrennte Stromsensor auf der Basis eines neuen magnetoresistiven Sensorelementes im Vergleich mit konventionellen Lösungen durch folgende Merkmale auszeichnet:

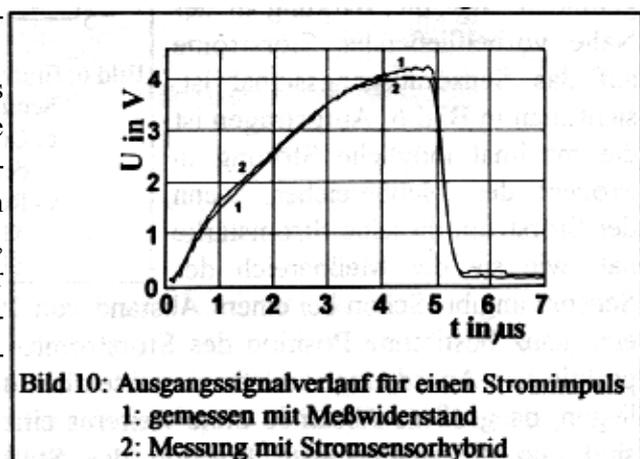


Bild 10: Ausgangssignalverlauf für einen Stromimpuls
1: gemessen mit Meßwiderstand
2: Messung mit Stromsensorhybrid

- Volumen und Gewicht auf wenige Prozent reduziert
- Höhere zeitliche Auflösung
- Größerer Temperatureinsatzbereich
- Kostengünstigere Herstellung bei großen Stückzahlen
- Universeller Einsatz des Sensorsystems für Meßbereiche von mA bis kA
- Geringere Störsignalempfindlichkeit
- Kein Latchupeffekt bei Überlast.

Diese Ergebnisse sind erreicht worden durch Nutzung der hohen Empfindlichkeit des magneto-resistiven Effektes und durch die Integration aller entscheidenden Systemteile, die das Felddifferenzverfahren, das Kompensationsverfahren und die Nullpunktsdriftunterdrückung enthalten, in die Mikrostruktur des Sensorelementes.

- /1/ Firmenprospekt der LEM Deutschland GmbH, "Potentialgetrennte Strom- und Spannungsbildner", Juli 1990
- /2/ Dibbern, U. "Magnetic field sensors using the magnetoresistive effect", Sensors and Actuators 10 (1986) p. 127 - 140
- /3/ Loreit, U., Pertsch, P., Porwol, H., Gebhardt, O., "Magnetoresistive Sensoren in der Meß- und Speichertechnik" rfe 34 (1985) S. 316 - 319
- /4/ Dettmann, F., Loreit, U., "Grundlagen magnetoresistiver Sensoren", Symposium magnetoresistive Sensoren, Dortmund, 25.06.1992, S.2 - 9
- /5/ Philips Components, Technische Information 901228, "Eigenschaften und Anwendungen der Magnetfeldsensoren KMZ 10"

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie unter dem Kennzeichen 13 MV 0109 gefördert.