

Unterbrechungsfreie Strommessung

W. Kühnel, Nürnberg

Bisher verlangte die Strommessung an der Netzzuleitung eines Gerätes das Auftrennen des Stromkreises, das Einfügen eines Adapters oder das Freilegen eines Leiters zur Messung mit einer Stromzange. Im folgenden wird ein neuartiges Meßprinzip vorgestellt, das die unterbrechungsfreie Messung an ein- oder mehradrigen Leitungen gestattet. Anhand der Stromaufnahme kann damit sofort der Betriebszustand eines angeschlossenen Verbrauchers eingeschätzt werden.

Ein neues Meßprinzip

Eine neue, patentierte Technologie ermöglicht es, Strommessungen unter Bedingungen durchzuführen, die mit den üblichen Methoden nicht zu bewerkstelligen sind. Diese als EMF bezeichnete Technologie nutzt Methoden zur Erkennung von magnetischen Feldern (EMF) aus, um die in mehradrigen Kabeln fließenden Ströme zu messen. Aufbauend auf Arbeiten zu diesem Thema wurde mit dem Metraclip 40 der erste Strommesser auf den Markt gebracht, der es dem Anwender ermöglicht, Wechselströme in Zuleitungen zu messen, ohne den Außenleiter getrennt zu umfassen. Der Anwender führt dabei eine Meßzange über das Kabel, das über einen Außenleiter, einen Außenleiter und einen Nulleiter oder Außen-, Null- und Erdleiter verfügen kann.

Funktionsprinzip der Einzelleiter-Strommessung

Das Funktionsprinzip des Strommessers ist am einfachsten ausgehend von der Messung an einem Einzelleiter zu erläutern (Bild 1). Ein durch einen Leiter fließender Wechselstrom erzeugt ein magnetisches Wechselfeld, das den Leiter umgibt. In der Nähe des Leiters wird eine Spule positioniert. Der Magnetfluß ändert sich mit der gleichen Frequenz wie der ihn erzeugende Strom. Durch die Änderung des die Spule durchsetzenden Magnetflusses wird in der Spule eine Spannung induziert. Der Wert des Stromes kann aus einer Messung dieser Spannung bestimmt werden. Die magnetische Feldstärke H , die von

einem stromdurchflossenen Leiter erzeugt wird, ergibt sich zu

$$H = \frac{I}{2\pi \cdot r}$$

Dabei ist I der Strom durch den Leiter und r der Abstand des betrachteten Punktes im magnetischen Feld vom Mittelpunkt des Leiters.

Die Spule wird senkrecht von der magnetischen Feldstärke H durchsetzt (vgl. Bild 1). Die Feldstärke weist die gleiche Frequenz wie der Strom auf (z. B. 50 Hz).

Die magnetische Flußdichte B , die die Spule durchsetzt, ist proportional zur Feldstärke

$$B = \mu_0 \cdot H.$$

Sie wirkt ebenfalls senkrecht zur Spulenfläche A_{Sp} . Der Magnetfluß Φ_{Sp} durch ergibt sich damit zu

$$\Phi_{Sp} = B \cdot A_{Sp} = \mu_0 \cdot H \cdot A_{Sp}.$$

Er ist demnach proportional zur magnetischen Feldstärke in der Spule und zur Querschnittsfläche der Spule.

Die in der Spule mit der Windungszahl w_{Sp} induzierte Spannung berechnet sich nach

$$u_{Sp} = w_{Sp} \cdot \frac{d\Phi_{Sp}(t)}{dt} = w_{Sp} \cdot A_{Sp} \cdot \frac{dB(t)}{dt}$$

$$u_{Sp} = w_{Sp} \cdot A_{Sp} \cdot \mu_0 \cdot \frac{dH(t)}{dt}$$

$$u_{Sp} = \frac{w_{Sp} \cdot A_{Sp} \cdot \mu_0}{2\pi \cdot r} \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

Für sinusförmige Ströme ergibt sich daraus:

$$U_{Sp} = \frac{w_{Sp} \cdot A_{Sp} \cdot \mu_0 \cdot f}{r} \cdot I.$$

Der Effektivwert U_{Sp} der in der Spule induzierten Spannung ist bei konstanter Frequenz f (50 Hz) proportional zum Effektivwert I des Stromes, zu den Spulenparametern w_{Sp} und A_{Sp} sowie zu $1/r$. Das Gerät mißt den Strom auf der Basis dieses Prinzips. Eine Spule wird in einer definierten Entfernung von der Zangen-

öffnung positioniert und erfaßt die induzierte Spannung. Da sich die Zangenöffnung in Abhängigkeit vom Kabeltyp ändert, wird der Wert r durch eine Messung der Zangenöffnung mit einem Potentiometer korrigiert. Der Strom im Leiter wird aus der Spulenspannung berechnet:

$$I = \frac{r}{w_{Sp} \cdot A_{Sp} \cdot \mu_0 \cdot f} \cdot U_{Sp}.$$

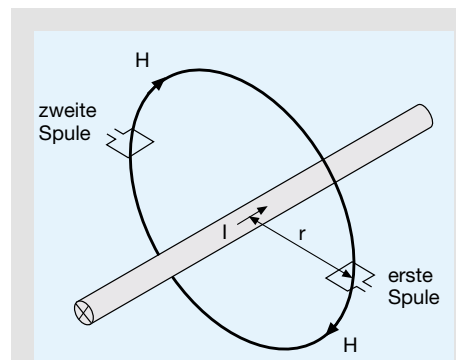
Die Spule erfaßt über die induzierte Spannung auch Änderungen des Magnetfeldes, die z. B. von anderen in der Nähe befindlichen Leitungen verursacht werden. Dieser Einfluß kann minimiert werden, indem eine zweite, identische Spule diametral angebracht wird (Bild 1). Das Magnetfeld ist bezüglich dieser zweiten Spule entgegengesetzt gerichtet. Wenn beide Spulen mit unterschiedlichem Wicklungssinn in Reihe geschaltet werden, verdoppelt sich die vom zu messenden Strom verursachte Ausgangsspannung. Außerhalb der beiden Spulen liegende stromführende Leiter verursachen demgegenüber Magnetfelder gleicher Richtung und annähernd gleicher Größe. Die von ihnen in den Spulen induzierten Spannungen heben sich gegenseitig auf.

Zweileiter-Strommessung

Bild 2 zeigt das magnetische Feld, das durch eine Netzleitung mit einem Außen- und einem Nulleiter erzeugt wird. Dabei wird der Strom I durch einen Leiter zugeführt und durch den anderen zurückgeleitet. Es überlagern sich dadurch die beiden entgegengesetzt gerichteten Felder um die Einzelleiter.

Die magnetischen Feldstärke H ist auf der x-Achse proportional zum Strom I und zum Abstand d zwischen den Leitern und umgekehrt proportional zu r^2 , wenn $r > 3d$.

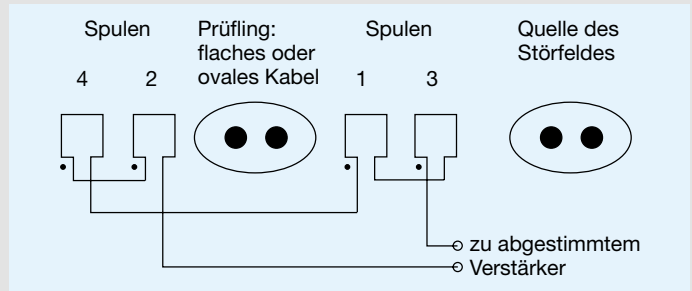
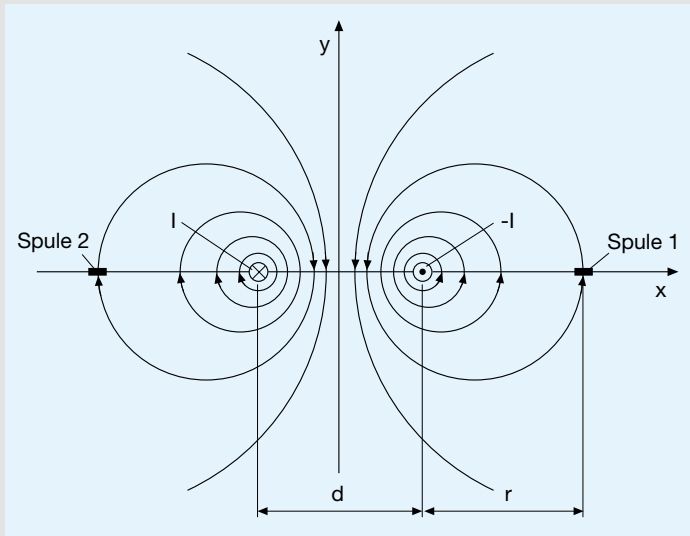
Mit der gleichen Meßmethodik wie bei der Einzelleiter-Strommessung kann der Strom auch in diesem Fall mit Hilfe eines Spulensensors ermittelt werden. Dabei müssen der Abstand d zwischen den Leitern und der



1 Das magnetische Feld um einen Leiter

Autor

Dipl.-Ing. Wolfgang Kühnel ist Mitarbeiter von GMC-Instruments Deutschland, Nürnberg.

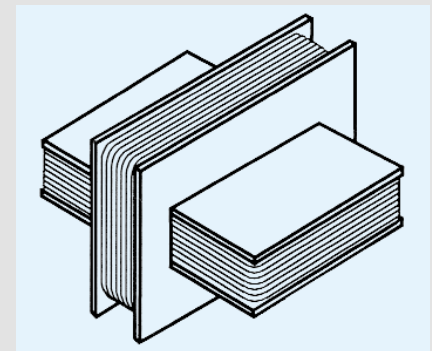


③ Die Verwendung von zwei zusätzlichen Spulen zur Unterdrückung von Störfeldern

② Das magnetische Feld um zwei Leiter

Abstand r bis zum Mittelpunkt des Leiters bekannt sein. Der Abstand zwischen den Leitern wird einer Tabelle entnommen, die die Leiterabstände von Kabeln mit verschiedenen Durchmessern auflistet. Bild ② macht auch deutlich, daß die magnetische Feldstärke im Gegensatz zur Einzelleiter-Messung, nur auf der x-Achse senkrecht durch die Spulenfläche tritt. Das bedeutet aber, daß die beiden Leiter dementsprechend zur Spule ausgerichtet werden müssen, um aus der Spulenspannung den Strom berechnen zu können.

setztem Wicklungssinn in Reihe geschaltet. Da Spule 1 näher am zu messenden Strom liegt als Spule 3, wird in Spule 1 eine größere Spannung induziert, da sich das magnetische Feld proportional zum Abstand vom Kabel um einen Faktor von $1/r^2$ verringert. Spule 3 hebt daher nur einen Teil der in Spule 1 induzierten Spannung auf. Durch weiter entfernte Störfelder werden jedoch in den Spulen 1 und 3 Spannungen induziert, die annähernd gleich sind und sich deshalb aufheben.



④ Senkrechte Anordnung der Spulen

Strommessungen in flachen und ovalen Kabeln

Flache oder ovale Kabel müssen, wie im Bild ② dargestellt, waagrecht in der Zange positioniert werden. Bei dieser Positionierung tritt das Magnetfeld senkrecht durch die Spulen. Wie bei der Einzelleiter-Messung werden diametral angeordnete Spulensensoren eingesetzt. Da das Magnetfeld aber beide Spulen in gleicher Richtung durchläuft, werden die Spulen in diesem Fall entsprechend ihrem Wicklungssinn in Reihe geschaltet. Das Meßgerät verfügt dazu über einen Umschalter, der die Wahl zwischen Einzelleiter und mehradrigen Kabeln ermöglicht.

Da das Magnetfeld in beiden Spulen die gleiche Richtung aufweist, werden Störfelder nicht wie bei der Einzelleiter-Messung unterdrückt. Zwei zusätzliche Spulen werden eingesetzt, um Störfelder zu dämpfen. Die Anordnung der Spulen kann Bild ③ entnommen werden.

Zusätzlich zu den Spule 1 und 2 werden die Spulen 3 und 4 angebracht. Sie sind mit den Spulen 1 und 2 identisch, werden aber mit einem größeren Abstand von der Mitte des Kabels montiert. Die Spulen 1 und 3 sowie die Spulen 2 und 4 werden mit entgegengesetztem

Strommessungen in runden Kabeln

Bei runden Kabeln ist die Lage der stromführenden Leiter bezüglich der Spulen nicht feststellbar. Deshalb ist die Richtung des Magnetfeldes, das durch die Spulen tritt, unbekannt. Um unter diesen Umständen das Magnetfeld richtig messen zu können, werden die vier Spulen aus Bild ③ um vier weitere, identische Spulen ergänzt. Jede zusätzliche Spule wird in bezug auf die zugehörige Spule senkrecht ausgerichtet. Damit können jeweils zwei senkrecht aufeinander stehende Komponenten des Magnetfeldes gemessen werden. Bild ④ zeigt den Aufbau eines Spulenpaares. Die beiden Spulen sind auf viereckige Spulenkörper gewickelt und werden ineinander „verschachtelt“. Die Ausgänge der Spulenpaare werden an den Steuerkreis angeschlossen.

Bedienung des Meßgerätes

Bild ⑤ verdeutlicht, wie das beschriebene Funktionsprinzip beim Metraclip 40 in die Praxis umgesetzt wird. Der Anwender schließt die Zangenschenkel um das stromführende Kabel. Bei flachen oder ovalen Kabeln ist darauf zu achten, daß die Leiter



⑤ Funktionsprinzip des Metraclip 40



⑥ Mit dem zentralen Drehschalter wird der Kabeltyp eingestellt



7 Metraclip 40

Tafel 1 Meßbereiche Metraclip 40 (Netzfrequenz 50 Hz)

Leitungstyp	Meßbereich	Auflösung	Eigenabweichung
Eindraht	0,0 ... 199,9 A AC	0,1 A	$\pm (2 \% \text{ v. M.} + 2 \text{ Digit})$
Flachleitung (2-/3-Leiter)	0,0 ... 40,0 A AC	0,1 A	$\pm (5 \% \text{ v. M.} + 2 \text{ Digit})$
Mehrdraht- Rundleitung (2-/3-Leiter)	0,0 ... 40,0 A AC	0,1 A	$\pm (12 \% \text{ v. M.} + 2 \text{ Digit})$

waagrecht zwischen den zwei Pfeilen positioniert werden. Mit dem Schalter unterhalb der Zangenschenkel wird nun entweder Einzelleiter- oder Mehrleiter-Messung eingestellt. Dieser Schalter ist für richtige Verschaltung der jeweiligen Spulenspulen verantwortlich. Anschließend wird der Kabeltyp – Zweileiter flach, Zweileiter rund, Dreileiter flach oder Dreileiter rund – mit dem Drehknopf ausgewählt (Bild 6). Nur so kann der Abstand zwischen den Leitern basierend auf dem Kabeldurchmesser anhand der einprogrammierten Tabelle richtig ermittelt werden.

Die Zange erfaßt mit ihren vier einzelnen Spulensensoren das durch die Ströme im Kabel verursachte magnetische Feld. Die Sensoren sind gemäß Bild 5 angeordnet. Jeder Sensor besteht aus zwei einzelnen Luftspulen. Diese Spulen erfassen das Magnetfeld in zwei senkrecht aufeinanderstehenden Richtungen. Diese beiden Komponenten der Spulenspannung werden an die Steuerung (Auswerteeinheit) weitergeleitet. Ein Potentiometer erfaßt die Öffnungsbreite der Zange. Auch diese Information erhält die Auswerteeinheit. Sie berechnet aus diesen Werten den Stromwert.

Technische Daten

Das Zangenmeßgerät Metraclip 40 (Bild 7) gestattet die unterbrechungslose Strommessung an ein-, zwei- oder dreiadrigen Leitungen (Einphasensysteme).

Der jeweilige Meßwert kann unmittelbar nach der Messung gespeichert und anschließend auf dem 3 1/2stelligen LCD abgelesen werden. Die Meßbereiche sind in Tafel 1 zusammengefaßt.