

1 Einleitung

Die Gleichstrommesstechnik befasst sich mit der Messung zeitunabhängiger Größen (U, I, P, ...). In der Wechselstrommesstechnik werden zeitabhängige Größen erfasst:

$$u(t), i(t), \dots$$

Dabei hängt die Art des gewählten Messverfahrens ab von:

dem zeitlichen Verlauf (periodisch oder nichtperiodisch, sinusförmig,...)

der gewünschten Information über die Wechselgröße.

2 Messung des Spitzenwertes

Die Spitzenwerte einer Wechselgröße (U_{p+} , U_{p-} , U_{pp} , ...) geben den Wertebereich an, innerhalb dessen sich die Größe ändert. Alle Werte dieser Wechselgröße können nur im Intervall zwischen positiven und negativen Spitzenwerten liegen. Daher stellen sie die maximalen und minimalen Betriebsgrenzen dar.

Man unterscheidet periodisch auftretende Spitzenwerte, die Bestandteil des Zeitverlaufes sind, und nichtperiodische, sporadisch auftretende Spitzen, die dem normalen Zeitverlauf überlagert sind. Die Kenntnis der Spitzenwerte ist erforderlich zur Dimensionierung von Bauteilen (U_{max} , I_{max} , ...). Überlagerte Spitzenwerte über üblicherweise kleine Spannungen können zu Störungseinkopplungen und Betriebsstörungen führen.

Die Messung von Spitzenwerten erfolgt mit

Oszilloskop (Speicherfunktion bei Digitaloszilloskop wichtig)

Spitzenwerterfassungsgerät (Netzüberwachung, Kurvenschreiber,...)

Moderne digitale Messgeräte liefern nicht nur den Messwert, sondern erfassen auch den Zeitpunkt des Auftretens der Spitzen.

3 Messung des zeitlichen arithmetischen Mittelwertes

Der zeitliche arithmetische Mittelwert X_0 einer Größe $x(t)$ wird berechnet mit

$$X_0 = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T x(t) dt$$

Der arithmetische Mittelwert wird auch als Gleichanteil bezeichnet. Bei vielen Wechselgrößen ist die Kenntnis des Gleichanteils wichtig (Datensignale, Einsatz von Transformatoren,...).

Das **Drehspulmesswerk** stellt sich auf den zeitlichen Mittelwert des magnetischen Drehmomentes ein. Da dieses linear vom Strom abhängt, ist die Anzeige proportional dem zeitlichen Mittelwert des Stromes. Dieses Messwerk zeigt daher bei AC den Mittelwert richtig an.

Digitale Messgeräte müssen zur Ermittlung des Mittelwertes eine Berechnung nach obiger Formel durchführen. Einfachere Geräte setzen vor der Digitalisierung einen Tiefpass mit sehr tiefer Grenzfrequenz (einige Hz) ein, der alle Wechselanteile unterdrückt und den Mittelwert ausgibt. Meist kann man diese Funktion erhalten, indem man AC-Größen einfach in der Messgeräteeinstellung für DC misst.

4 Messung des Effektivwertes

Der Effektivwert (engl. rms; root mean square) ist definiert als der quadratische Mittelwert einer Wechselgröße. Allgemein gilt für periodische Vorgänge

$$X_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T x(t)^2 dt}$$

Der so berechnete Effektivwert wird als wahrer oder echter Effektivwert bezeichnet (engl. true rms trms). Werden eine Wechsel- und eine Gleichgröße überlagert, so gilt für den gesamten Effektivwert (engl. ttrms total true rms)

$$X_{\text{effg}} = \sqrt{X_{\text{AC}}^2 + X_{\text{DC}}^2}$$

Für Spannungen und Ströme ist der Effektivwert jener zeitunabhängige Wert, der an einem ohmschen Widerstand die gleiche Wirkleistung erbringt wie eine Gleichgröße gleichen Wertes. Die Messung des Effektivwertes ist daher an eine Berechnungsvorschrift gebunden.

4.1 Effektivwertmessung mit Dreheisenmesswerk

Das Dreheisenmesswerk stellt sich auf den zeitlichen Mittelwert des magnetischen Drehmomentes ein. Da dieses quadratisch vom Strom abhängt, ist die Anzeige proportional dem Effektivwert des Stromes. Dieses Messwerk zeigt daher, unabhängig für AC oder DC, den gesamten echten Effektivwert (ttrms) an.

4.2 Effektivwertmessung mit Drehspulmesswerk

Das Drehspulmesswerk stellt sich auf den zeitlichen Mittelwert des magnetischen Drehmomentes ein. Da dieses linear vom Strom abhängt, ist die Anzeige proportional dem zeitlichen Mittelwert des Stromes. Dieses Messwerk zeigt daher DC richtig an, bei AC jedoch den Mittelwert.

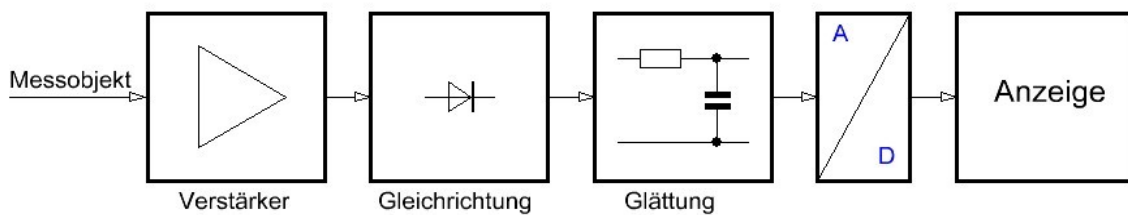
Da dieser bei sinusförmigen Größen Null ist, können übliche Sinusgrößen nicht direkt gemessen werden. Zur Abhilfe wird die Wechselgröße vor der Messung gleichgerichtet. Der angezeigte Wert entspricht dann dem zeitlichen Mittelwert der gleichgerichteten Größe, dem Gleichrichtwert. In der Praxis wird aber trotzdem das Messergebnis als Effektivwert (rms) bezeichnet, obwohl es durch Skalierung aus einem Gleichrichtwert entstanden ist.

Der Unterschied zum Effektivwert ist der Formfaktor, der für Sinus 1,11 beträgt und der in die Skalierung eingerechnet wird. Wird mit dem Drehspulmesswerk mit Gleichrichter ein anderer

Zeitverlauf als Sinus gemessen, entsteht eine systematische Messabweichung zum jeweiligen Formfaktor.

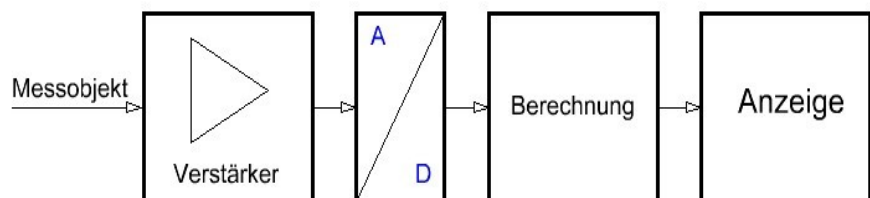
4.3 Effektivwertmessung mit Digitalmultimeter

Einfache und billige DMM messen grundsätzlich Gleichspannungen. Damit Wechselgrößen angezeigt werden können, müssen diese vor der Digitalisierung gleichgerichtet und geglättet werden. Je nach Art der Gleichrichtung entsteht ein Messwert, der mehr oder weniger dem Gleichrichtwert entspricht. In der Praxis wird aber trotzdem das Messergebnis als Effektivwert (rms) bezeichnet, obwohl es durch Skalierung nach einer Gleichrichtung entstanden ist.



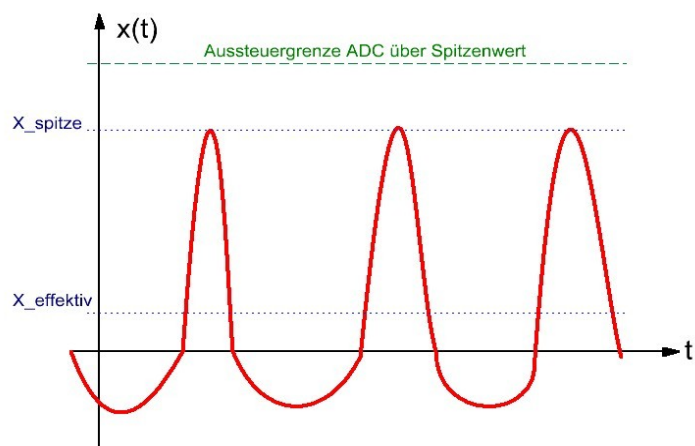
Bei idealer Gleichrichtung ist der Unterschied zum Effektivwert der Formfaktor, der für Sinus 1,11 beträgt und der in die Skalierung eingerechnet wird. Wird eine andere als eine Sinusgröße gemessen, wird ein Wert angezeigt, dessen Entstehung nur bei genauer Kenntnis der Schaltung des Messgerätes vorhergesagt werden kann. Die Umrechnung mit dem passenden Formfaktor ist nur bei Bestätigung durch den Hersteller zulässig (Angabe im Datenblatt des Messgerätes). Es ist daher mit einer unter Umständen erheblichen systematischen Messabweichung zu rechnen.

Aufwändige und damit teure DMM berechnen den Effektivwert mathematisch nach der Definitionsgleichung. Sie werden durch Angabe des Zusatzes „rms“ gekennzeichnet.



Dadurch ist die von der Kurvenform unabhängige Effektivwertberechnung vom Hersteller bestätigt.

Die Berechnung wird meist nach der Digitalisierung durchgeführt. Enthält die gemessene Wechselgröße erhebliche Spitzenanteile, kann es zur Übersteuerung des ADC kommen, wenn der Messbereich zu klein eingestellt wird. Ein Maß dafür ist der zulässige Crestfaktor (Scheitelfaktor), der das Verhältnis vom Scheitelwert zum Effektivwert angibt. Die Hersteller spezifizieren den höchstzulässigen Crestfaktor im Handbuch des Messgerätes.



5 AC Scheinwiderstandsmessung

5.1 Direkte Impedanzmessung

Die direkte Messung der elektrischen Impedanz erfolgt durch Messen von Strom und Spannung und einer Berechnung über das Ohmsche Gesetz. Alle direkten Messmethoden wenden dieses Prinzip in unterschiedlichen Ausprägungen an.

5.1.1 Strom- Spannungsmethode

Die Strom- Spannungsmethode verwendet eine AC- Quelle und zwei Messgeräte. Der Scheinwiderstand Z_x wird mit dem ohmschen Gesetz aus den Messwerten berechnet. Der Phasenwinkel von Z_x kann nur mit zusätzlicher Messung der Wirkleistung oder mit einem Phasenmessgerät gemessen werden.

5.1.2 Multimeter

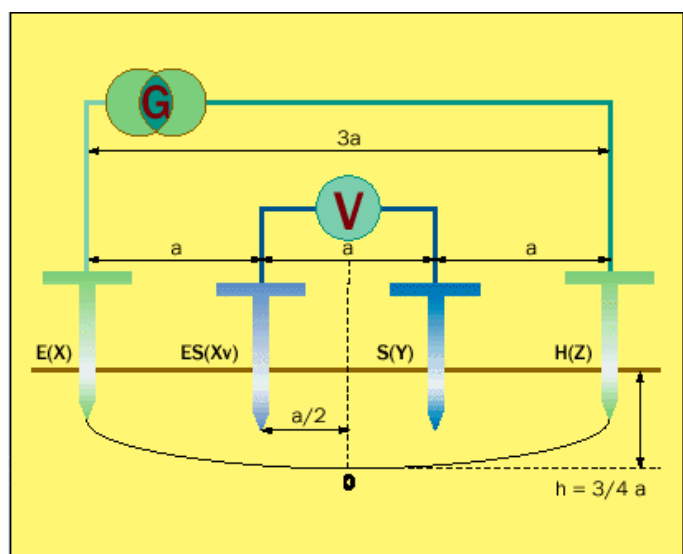
Multimeter verwenden zur Widerstandsmessung grundsätzlich eine Gleichstromquelle und erfassen damit nur die ohmschen Leitungswiderstände. Dies ist nicht zu Verwechseln mit der Resistanz, dem Realteil von Impedanzen. Es sind keine AC- Messungen möglich. Es jedoch gibt Multimeter, die L- bzw. C- Messungen erlauben (siehe Unterlage MT_RLC_Messg).

5.1.3 Vektorimpedanzmeter, Netzwerkanalysatoren

Diese Messgeräte erlauben die Untersuchung von Hochfrequenzschaltungen bis weit in den Gigahertzbereich hinein. Es gibt aber auch Ausführungen für Niederfrequenzen. Im Prinzip wird eine Strom- Spannungs- und Phasenmessung durchgeführt. Bei HF wird meist mit einer Brückenschaltung gearbeitet. Die Messergebnisse werden üblicherweise grafisch (Polardiagramm, Smithdiagramm, Bodediagramm) dargestellt.

5.2 Messung des Erdwiderstandes

Zur Messung des Erdwiderstands sind mehrere Verfahren bekannt. Das am meisten benutzte und das zuverlässigste Verfahren ist die 4-Punkt-Messung, das auch als Wenner-Verfahren bekannt ist. Man sticht auf einer geraden Linie im jeweils gleichen Abstand a vier Elektroden in den Boden. Zwischen den beiden Endelektroden E und H speist man mit einer Stromquelle G einen Messstrom I ein, und zwischen den beiden mittleren Elektroden ES und S misst man mit einem Voltmeter den Spannungsabfall ΔU .



Der Erdwiderstand R_E berechnet sich nach dem ohmschen Gesetz. Mit diesem Wert kann man den spezifischen Bodenwiderstand

ρ in Ω_m an der Stelle 0 mitten zwischen den beiden Elektroden ES und S in einer Tiefe $h = \frac{3}{4} a$

berechnen.

$$R_E = \frac{\Delta U}{I} \quad \rho = 2 \pi a \cdot R_E$$

5.3 Indirekte Widerstandsmessung – AC Messbrücken

Für genaue Messung von AC- Widerständen gibt es eine Reihe von AC- Messbrücken. Genauere Informationen entnehme man der einschlägigen Literatur.

Eine Variation der Messung mit Brückenschaltungen erfolgt in HF- Impedanzmessgeräten. Die Ausführung der Brückenwiderstände mit dem Nennwiderstand $50 \, \Omega$ ermöglicht den Betrieb von HF- Messobjekten unter Abschlussbedingungen, wie es bei hohen Frequenzen erforderlich ist. Das Messobjekt ist mit dem Brückenwiderstand abgeschlossen.

6 Frequenz- und Zeitmessung

Siehe Buch Krikava, Grundlagen der Elektrotechnik, Bd. II, Seiten 248 ff.

7 Messwandler

Für Messungen in der Energietechnik sind aus Sicherheitsgründen galvanische Trennungen für hohe Spannungen zwischen Messobjekt und Messkreis notwendig.

Siehe Buch Krikava, Grundlagen der Elektrotechnik, Bd. II, Seiten 233 ff.

8 Leistungsmessung

Die Messung der Leistung erfordert die Multiplikation von Spannung und Strom an einem Verbraucher unter Berücksichtigung des Leistungsfaktors. Ein Wattmeter muss daher beide Größen messen und die Wirkleistung mit richtiger Phasenlage (induktiv – kapazitiv) berechnen können.

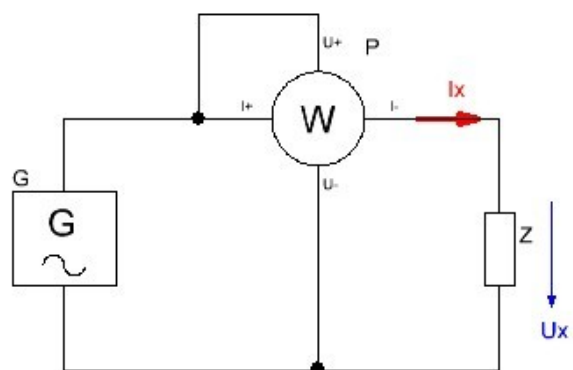
Das alte elektrodynamische Messwerk hat diese Aufgabe nicht nur für Gleichstrom, sondern auch für Wechselstrom bei beliebigen nichtsinusförmigen Größen mathematisch exakt lösen können und die Wirkleistung angezeigt.

Moderne Wattmeter müssen relativ aufwendige Abtastungen durchführen und Rechner einsetzen, um das gleiche Ergebnis zu erhalten. Durch Einsatz moderner Elektronik sind aber heute kostengünstige Wattmeter auf dem Markt, so dass die Elektromechanik weitgehend verdrängt wurde. Zusätzlich liefern die Geräte mehrere Messwerte gleichzeitig.

Das Messprinzip und die Grundschialtung für AC- Wattmeter entspricht denen der DC- Geräte.

Der zu messende Strom I_x wird durch den **Strompfad** (I^+ I^-) polungsrichtig geführt. Der Strompfad ist niederohmig.

Die zu messende Spannung U_x wird an den **Spannungspfad** (U^+ U^-) polungsrichtig gelegt. Der Spannungspfad ist hochohmig.



Strom- oder spannungsrichtige Schaltung ist möglich. Der Spannungspfad ist immer zuerst

anzuschalten.

Strom- und Spannungspfad sind galvanisch getrennt. Zu beachten ist die Spannungsfestigkeit zwischen beiden. Der Strompfad kann Sicherungen enthalten.

Moderne elektronische Messgeräte zeigen üblicherweise nicht nur die Wirkleistung, sondern auch Spannung, Strom, die polaritätsrichtige Blindleistung, Scheinleistung und $\cos \varphi$ gleichzeitig an.

9 Arbeitsmessung – Energiezähler

Die Messung der elektrischen Arbeit beruht auf einer Leistungsmessung über der Zeit. Entsprechende Messgeräte gibt es in der Ausführung zur Messung für Wechselstrom.

9.1 Ferrariszähler

Elektromechanische Zähler, Ferraris- Zähler: siehe Buch Krikava, Grundlagen der Elektrotechnik, Bd. II, Seiten 245 ff.

9.2 Elektronische Energiezähler

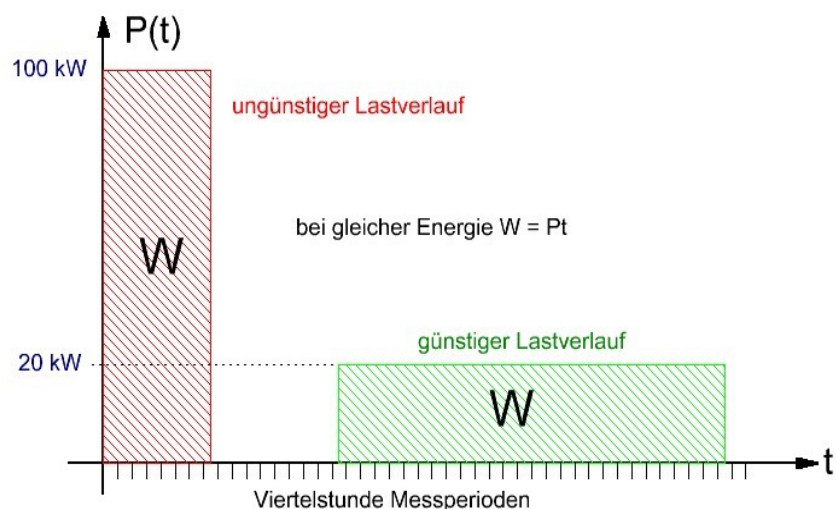
Es sind heute Energiezähler auf dem Markt, die vollständig elektronisch aufgebaut sind und keine Elektromechanik mehr enthalten. Spezielle Ausführungen erlauben eine Umschaltung zwischen zwei oder mehreren Tarifen. Da die elektromechanischen Zähler im Vergleich immer noch billiger sind, werden elektronische Zähler nur bei besonderem Bedarf eingesetzt.

9.3 Lastgangzähler

Das Problem der Versorgung mit elektrischer Energie ist die Bereitstellung der benötigten Menge zur richtigen Zeit. Die Netzbetreiber sind an der wirtschaftlichen Nutzung der Netze und der Kraftwerke interessiert. Dazu sollte der Energieverbrauch möglichst gleichmäßig und vorhersehbar sein. Deshalb besteht der Wunsch, das Kundenverhalten zu steuern. Dies geschieht neben der Energieverrechnung mit der zusätzlichen Erfassung der momentan bezogenen Leistung.

Die Arbeitszähler liefern ein Summenergebnis $W = P \cdot t$ über die gesamte Erfassungszeit, ohne den Leistungsverlauf zu berücksichtigen.

Lastgangzähler erfassen in definierten Messperioden, meist 15 Minuten, die konsumierte Leistung, ermitteln den Maximalwert und speichern diesen bis zur nächsten Verrechnung ab (Maximumzähler). Moderne elektronische Geräte speichern dabei zusätzlich die Werte aller



Messperioden ab, so dass man einen Leistungsverlauf über der Zeit erhält (Lastgang).

Die Preisanteile der Stromabrechnung setzen sich zusammen aus den Teilen

Arbeitspreis	€ / kWh Arbeitstarif nach Energiezählerstand
Leistungspreis	€ / kW Leistungstarif nach bezogener Maximalleistung
Messpreis	Kosten für die Messeinrichtungen.

10 Besonderheiten bei Wechselstrommessungen

Grundsätzlich besteht in der Wechselstrom- Messtechnik kein Unterschied zur DC- Messtechnik. Die Messschaltungen sind im wesentlichen gleich. Es sind nur zusätzliche Punkte zu beachten, die in der DC- Technik keine Rolle spielen.

Für die Berechnungen ist zwischen nichtsinusförmigen Vorgängen, die die Anwendung von Differentialgleichungen oder der Laplace- Transformation erfordern, und sinusförmigen Vorgängen, die mit komplexer Wechselstromrechnung behandelt werden können, zu unterscheiden. Eine Berechnung mit Simulationsprogrammen erfordert eine sorgfältige Erfassung aller relevanten parasitären Einflüsse auf die Messung. Das Erkennen von parasitären Einflüssen und der Umgang mit ihnen ist einer der Kernpunkte bei Messungen mit höheren Frequenzen.

10.1 Parasitäre Kapazitäten

Eine Kapazität wird wirksam, wenn zwei Leiter gegeneinander unterschiedliches Potential führen und sich zwischen diesen ein elektrisches Feld aufbaut. Einer der Leiter kann auch die Erde oder eine beliebige andere leitfähige Fläche sein. Über diese Kapazitäten führt ein Strom (Ladestrom, Verschiebungs- oder Blindstrom), der von der Spannungsänderung abhängt und mit steigender Frequenz zunimmt.

$$i_c = C \cdot \frac{d u_c}{d t} \quad \text{bzw. für Sinus} \quad I_c = j \omega C \cdot U_c$$

Zur Abschätzung kann man mit Näherungsformeln arbeiten, die für Sonderfälle in der Literatur zu finden sind. Beispielsweise kann man für zwei $l = 50$ cm lange parallele, $r = 1$ mm dünne Leiter im Abstand $a = 10$ cm eine Kapazität von etwa 5 pF annehmen. Geringerer Abstand, größerer Durchmesser und größere parallele Länge vergrößern den Wert. Eine Einzelleitung hat gegenüber einer leitenden Fläche im gleichen Abstand etwa die doppelte Kapazität.

$$C \approx \frac{\pi l \epsilon_0}{\ln \frac{a}{r}}$$

An den Anschlüssen aller Messgeräte sind ebenfalls Kapazitäten wirksam (Eingangskapazität). Diese sind meist von den Herstellern angegeben.

Kapazitäten können bewirken:

Einstreuung von Strömen aus Potentialänderungen benachbarter Leitungen

parallele Kapazitäten zu hochohmigen Schaltungen (Voltmeter) wirken als Kurzschluss bei hohen Frequenzen oder bei Impulsen

Verringerung der Eingangsimpedanzen von Messgeräten und damit geringerer Innenwiderstand

Elektrisches Feld streut bei hohen Frequenzen Energie ab.

10.2 Parasitäre Induktivitäten

Eine Induktivität wird wirksam, wenn in einem Leiter Strom fließt und sich um diesen herum ein magnetisches Feld aufbaut. Diese führt zu einem Spannungsabfall, der von der Stromänderung abhängt und mit steigender Frequenz zunimmt.

$$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad \text{bzw. für Sinus} \quad U_L = j\omega L \cdot I_L$$

Im Gegensatz zu den von den Herstellern angegebenen Kapazitäten sind Induktivitäten meist nicht angegeben. Zur Abschätzung kann man mit Näherungsformeln arbeiten, die für Sonderfälle in der Literatur zu finden sind. Beispielsweise kann man für einen dünnen Leiter bei $\mu_r = 1$ eine Induktivität von etwa 1 nH/mm annehmen. Eine bessere Näherung für Drähte mit Durchmesser d und der Länge l ist:

$$L \approx \frac{l}{d} \quad L \text{ in nH}$$

Durch Parallelführen (Verdrillen) von Hin- und Rückleitung kann man die Induktivität bedeutend verringern (allerdings steigt damit die Kapazität zwischen den Leitern). Durch das Verkoppeln der Magnetfelder verschiedener naher Leiter kann es zur Gegeninduktion und damit zur Einstreuung unerwünschter Spannungen kommen.

Induktivitäten können bewirken:

Einkopplung von Spannungen aus Stromänderungen naher Leitungen

in Serie liegende Induktivitäten zu niederohmigen Schaltungen (Shunt, Amperemeter) erhöhen den Widerstand bei hohen Frequenzen oder bei Impulsen

Magnetisches Feld streut bei hohen Frequenzen Energie ab.

10.3 Leiterschleifen

Wird eine Leiterschleife mit der Fläche A von einem sich ändernden magnetischen Fluss Φ durchsetzt, so entsteht in der Schleife nach dem Induktionsgesetz eine Spannung u_i .

$$u_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Die Spannung steigt mit der Änderungsgeschwindigkeit des Flusses, was sich besonders bei Impulsfeldern auswirkt. Ist die Schleife leitfähig durchgehend verbunden, so entsteht in dieser ein

Induktionsstrom i_i der von der Schleifenimpedanz abhängt. Diese Ströme können zu Potentialverschiebungen und Überlastung von Bauteilen und Messgeräten führen. Besonders in den Bezugsleitungen (Masse, Erdung) können diese Ströme zu Verfälschungen führen. Aufbauten mit Leiterschleifen sind daher stets zu vermeiden. Unkontrollierte parasitäre Parallelverbindungen von Masse- und Erdverbindungen sind ebenfalls eine Quelle für Störungseinkopplungen.

10.4 Antennenwirkung

Sind die Frequenzen so hoch, dass die Abmessungen von Teilen des Messaufbaues in die Größenordnung von $\lambda/10$ der zugehörigen Wellenlänge kommen, so besteht grundsätzlich das Problem der Antennenwirkung. Dieser Effekt geht in beide Richtungen. Es wird sowohl Energie in die Umgebung abgestrahlt als auch aus dieser aufgenommen. Dies führt zur Verfälschung von Messungen. Bei hohen Frequenzen ist daher ein hochfrequenzmäßig einwandfreier Aufbau herzustellen. Für Hochfrequenz geeignete Messgeräte sind zu verwenden.