

Erdung und Erdungsmessung

H.-D. Schüssele, Glottertal

Neben dem Schutz von Personen und Anlagen wird die Erdung auch zur Ableitung von Fehlerströmen, Blitzeinschlägen, statischen Entladungen und elektromagnetischen Störungen verwendet. Dieser Beitrag zeigt, wie die Funktionsfähigkeit des Systems gewährleistet werden kann.

1 Definition Erdung

Die DIN VDE-Bestimmungen definieren Erdung als „die absichtliche oder zufällige Verbindung eines elektrischen Stromkreises oder einer elektrischen Anlage zur Erde oder zu einem leitenden Körper, der als Erde dient“. Es wird zwischen Funktionserdung und Schutzerdung unterschieden. Die Schutzerdung dient der elektrischen Sicherheit zum Schutz von Personen und Tieren, die Funktions- oder auch Betriebserdung dem sicheren Betrieb der Anlage. Diese beiden Erdungssysteme sind voneinander getrennt, und werden an einer einzigen Stelle miteinander verbunden, um Potentialdifferenzen im Falle eines Blitzeinschlags zu verhindern. Neben dem Schutz von Personen und Anlagen wird die Erdung auch zur Ableitung von Fehlerströmen, Blitzeinschlägen, statischen Entladungen und elektromagnetischen Störungen verwendet.

Ein funktionsfähiges Erdungssystem kann auch die Zuverlässigkeit von elektrischen Anlagen und Einrichtungen erhöhen, Beschädigungen durch Blitzschlag und Beeinflussung durch Fehlerströme vermindern, und so unnötige Ausfallzeiten und die damit verbundenen Kosten reduzieren.

2 Grenzwerte für den Erdungswiderstand

Es gibt viele Unklarheiten, wie eine gute Erdung aufgebaut ist und welchen maximalen Wert der Erdungswiderstand haben sollte. Einen allgemein gültigen Grenzwert, der von allen Organisationen oder Behörden anerkannt wird, gibt es nicht. Die Anforderungen sind unterschiedlich, so bewertet DIN VDE Erder mit $< 10 \Omega$ als gut, Telekom oder Mobilfunkbetreiber schreiben $< 5 \Omega$ vor. Der jeweils zu beachtende Grenzwert hängt von der Form des Netzes (Systems) und dessen Abschaltbedingungen unter Berücksichtigung der maximalen Berührungsspannung ab. In der Praxis

Autor

Hans-Dieter Schüssele ist Produktmanager bei der Fluke Deutschland GmbH, Bereich Electrical, Glottertal.

ist man bestrebt, den niedrigsten Erdungswiderstand zu erreichen, der mit wirtschaftlichem Aufwand vertretbar ist.

3 Erdungswiderstand, Erder und Erdungssysteme

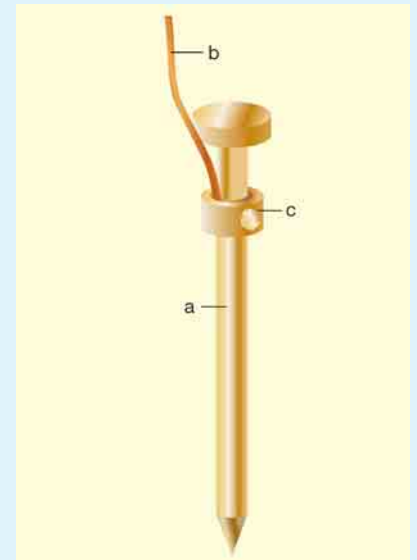
Erder sind aus folgenden Teilen aufgebaut (Bild 1):

- Erdungselektrode (Staberder, Tiefenerder, Erdungsband)
- Erdungsleiter (Anschlussleitung zum Erder)
- Verbindungselemente zwischen dem Erdungsleiter und der Erdungselektrode (Anschlussklemmen, Schrauben)

Der Widerstand eines Erders setzt sich aus drei Komponenten zusammen (Bild 2):

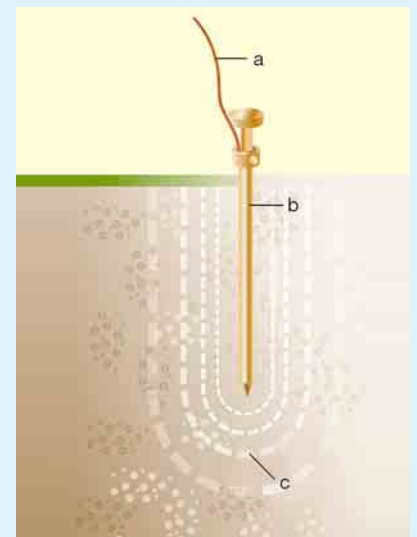
- Widerstand der Erdungselektrode und der Verbindungselemente zum Erdungsleiter. Diese sind im Allgemeinen sehr niedrig, da Erdungsspieße oder Erdungsbänder in der Regel aus gut leitendem Material wie Stahl oder Kupfer bestehen.
- Übergangswiderstand der Erdungselektrode zum umgebenden Erdreich. Auch dieser ist nahezu vernachlässigbar, wenn die Erdungselektrode frei von Farbe oder Fett ist und direkten Kontakt zum umgebenden Erdreich hat.
- Widerstand des umgebenden Erdreichs. Die Erdungselektrode ist von Erde umgeben, die man sich als konzentrische Schalen von gleicher Dicke vorstellen kann. Diejenigen Schalen, die der Erdungselektrode am nächsten sind, haben die kleinste Fläche und damit den größten Widerstand. Jede nachfolgende Schale verfügt über eine größere Fläche und einen entsprechend geringeren Widerstand.

Der Erdungswiderstand bzw. Erdankoppelwiderstand wird also hauptsächlich durch die Kontaktfläche der Erdungselektrode und der Leitfähigkeit des umgebenden Erdreichs bestimmt. Der spezifische Erdwiderstand ist ein Maß für Leitfähigkeit des Erdreichs und wird in Ωm angegeben. Um die Kontaktfläche zum umgebenden Erdreich zu vergrößern, kann man die Erdungselektroden tiefer in den Boden treiben oder den Durchmesser der Erdungselektroden vergrößern. Das Vergrößern des Durchmessers eines Erdspießes, führt kaum zu einem kleineren Widerstand, da bei



1 Aufbau eines Erders

- a) Erdungselektrode
- b) Erdungsleiter
- c) Verbindungselemente zwischen dem Erdungsleiter und der Erdungselektrode



2 Widerstand eines Erders

- a) Widerstand der Erdungselektrode und der Verbindungselemente zum Erdungsleiter
- b) Übergangswiderstand der Erdungselektrode zum umgebenden Erdreich
- c) Widerstand des umgebenden Erdreichs

Verdopplung des Durchmessers der Widerstand nur um 10 % geringer wird. Eine Verdopplung der Länge der Erdungselektrode bewirkt eine Reduzierung des Widerstands um 40 %. Der Erdboden hat jedoch keinen einheitlichen spezifischen Widerstand und das Ergebnis ist nicht immer vorhersehbar. Es gibt Fälle, in denen es physikalisch nicht möglich ist, die Erdungsspieße tiefer in den Boden zu treiben, z. B. wenn man auf Felsgestein, Granit usw. stößt. In diesen Fällen sind alternative Methoden möglich, unter anderem die Verwendung von „leitendem Beton“. Eine weitere Möglichkeit ist das Setzen von mehreren Erdern, welche parallel geschaltet werden. Da

mit die zusätzlichen Elektroden wirksam sind, muss der Abstand der zusätzlichen Spieße mindestens der Eindringtiefe des in den Boden getriebenen Spießes entsprechen. Weiter ist zu beachten, dass die Erdungselektrode unter die Frostgrenze und den Grundwasserspiegel reicht, damit der Widerstand zur Erde nicht wesentlich beeinflusst wird, wenn der umgebende Boden gefriert bzw. austrocknet. Einfache Erder bestehen aus einer einzelnen Erdungselektrode (z. B. Erdspeiß), die in den Boden getrieben wird. Die Verwendung einer einzelnen Erdungselektrode ist eine übliche Form der Erdung beispielsweise bei Baustellen oder kleineren Gebäuden.

Erdungssysteme werden für Wohnhäuser oder Firmengebäude verwendet, diese bestehen aus mehreren miteinander verbundenen Erdungsspießen oder Erdungsschleifen. Erdungssysteme mit Maschen-, Gitternetzen oder Erdungsplatten werden typischerweise bei Umspannwerken und Sendemasten installiert. Bei Erdungssystemen gibt es wesentlich mehr Kontaktstellen mit der umgebenden Erde, so dass der Erdungswiderstand entsprechend verringert wird, und auch Potentialdifferenzen innerhalb des Systems vermieden werden.

4 Spezifischer Erdwiderstand

Bei der Planung eines Erdungssystems oder vor dem Setzen eines Erders kann mit dem ermittelten Messwert der erreichbare Erdungswiderstand abgeschätzt werden, dazu kann Tafel 1 als Praxishilfe genommen werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die Tabelle nur als Anhaltspunkt dienen kann, weil der Erdboden in Schichten aufgebaut und selten

Tafel 1 Spezifische Erdwiderstände und Richtwerte für Stab- und Bänderer

Art des Bodens	Spezifischer Erdwiderstand Ωm	Erdungswiderstand (in Ω)					
		Staberder (Tiefe in m)			Bänderer (Länge in m)		
		3	6	10	5	10	20
Feuchter Boden, Moor, Morast, Sumpf	30	10	5	3	12	6	3
Ackerboden, Lehm, Ton	100	33	17	10	40	20	10
Sandiger Lehm	150	50	25	15	60	30	15
Feuchter Sandboden	300	66	33	20	80	40	20
Beton 1:5	400	–	–	–	160	80	40
Feuchter Kies	500	160	80	48	200	100	50
Trockener Sandboden	1000	330	165	100	400	200	100
Trockener Kies	1000	330	165	100	400	200	100
Steiniger Boden	30000	1000	500	300	1200	600	300
Felsgestein	10^7	–	–	–	–	–	–

homogen ist, so dass die Widerstandswerte auch erheblich variieren können. Außerdem ist der spezifische Erdwiderstand witterungsbedingten jahreszeitlichen Schwankungen durch Trockenheit, Kälte oder Veränderungen des Grundwasserspiegels unterworfen. Im Boden verlegte metallische Rohre, Erdkabel oder im freien Gelände Wasseradern oder Wurzeln beeinflussen den Erdwiderstand ebenfalls. Ein verlässliches Erdungssystem muss auch bei den schlechtesten Bedingungen den geforderten Erdungswiderstand gewährleisten.

5 Messen des Widerstands eines Erders

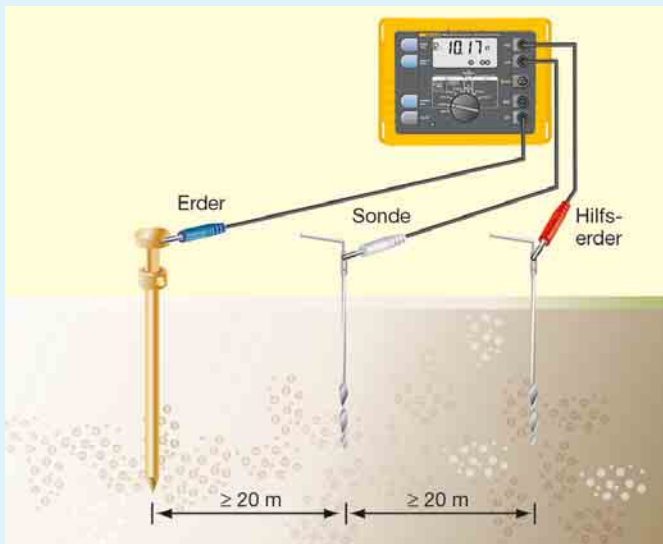
Erdungssysteme und deren Verbindungen unterliegen Einflüssen durch die Witterung. Zusätzlich werden die Erdungselektroden durch Korrosion im Erdboden angegriffen, da hier Wasser und Salze vorhanden sind. Der Erdungswiderstand kann sich unbemerkt verändern, ohne dass dies beim normalen Betrieb auffällig wird. Bei unvorhergesehenen Ereignissen wie Blitzschlag, erhöhte Ableitströ-

me oder Ausfall des Neutralleiters können Schäden an der elektrischen Anlage oder eine Gefährdung von Personen auftreten. Deshalb wird empfohlen, diese regelmäßig zu überprüfen, um den sicheren Betrieb zu gewährleisten. Ebenfalls wird empfohlen, nach Veränderungen oder Reparatur am Erdungssystem Messungen durchzuführen.

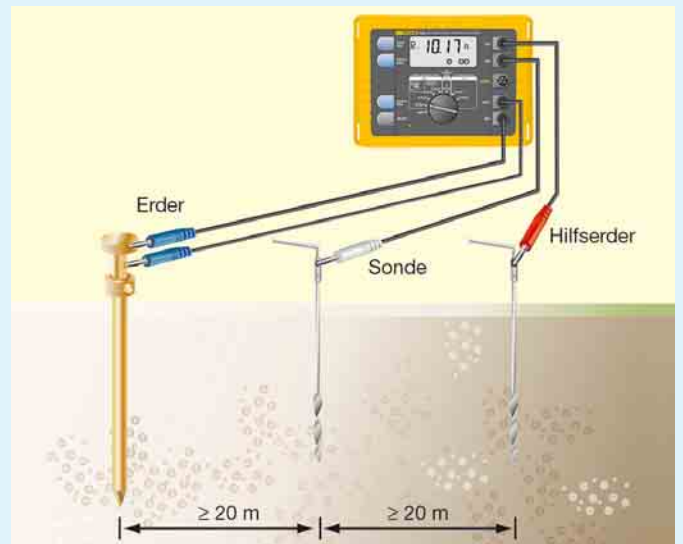
6 Messverfahren

Zur Ermittlung des Erdungswiderstandes gibt es verschiedene Messverfahren, generell unterscheidet man zwischen der Messung mit Erdspeissen und mit Stromzangen.

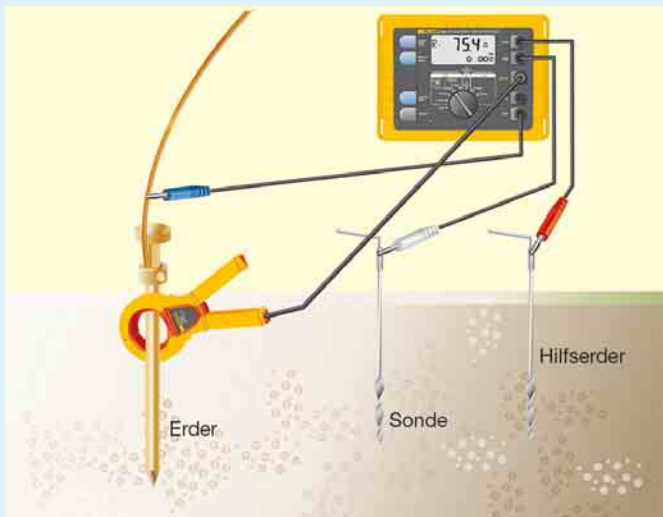
Bei der Ermittlung des Erdungswiderstandes mit Erdspeissen erfolgt die Messung nach dem Strom-/Spannungsverfahren, zur Messung wird ein Prüfstrom zwischen einem Erdspeiß (Hilfserder) und dem zu messenden Erder eingespeist, mit einem zweiten Erdspeiß (Sonde) wird der Spannungsfall gemessen. Dabei muss der zu messende Erder vom Potentialausgleich oder PEN abgetrennt werden, um



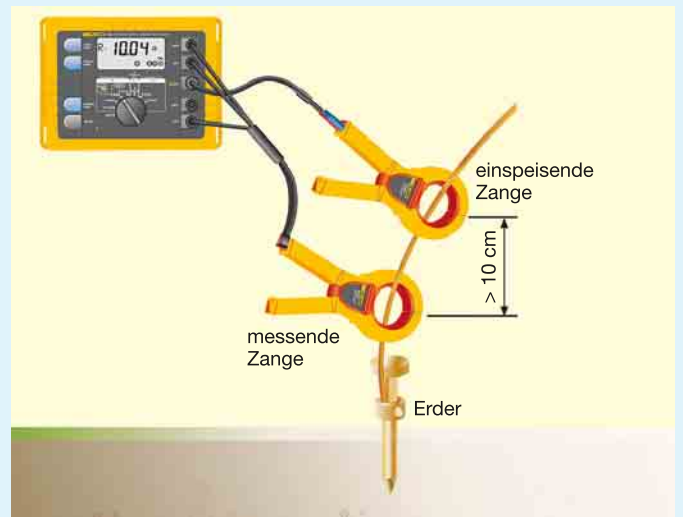
③ Erdungsmessung (Dreileitermessung)



④ Erdungsmessung (Vierleitermessung)



⑤ Selektive Erdungsmessung mit einer Stromzange



⑥ Erdschleifenmessung

den Einfluss parallel liegender Erder z. B. von Rohrsystemen zu eliminieren.

Bei der selektiven Erdungsmessung wird ebenfalls ein Prüfstrom zwischen einem Hilfs-erder und dem Erder eingespeist, hier wird jedoch mit einer Stromzange der Strom durch

den Erder gemessen, welcher nicht aufgetrennt werden muss.

Bei der Messung mit zwei Stromzangen wird die Prüfspannung über eine Stromzange in den Messkreis induziert und mit einer zweiten Stromzange der Strom in der Schleife gemessen, hier muss der Erder ebenfalls nicht aufgetrennt werden.

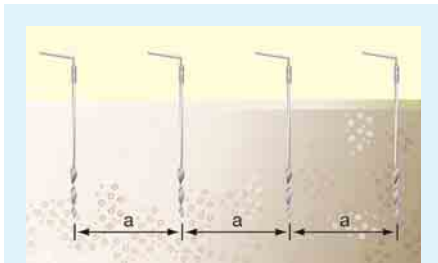
Der Prüfstrom des Erdungsmessgerätes muss ein Wechselstrom sein, um Einflüsse durch Polarisierungen am Übergang der Erdungselektrode zur Erde zu verhindern. Messfehler durch Störspannungen oder Strömen im Erdreich von benachbarten Spannungsquellen mit den Frequenzen $16\frac{2}{3}$ Hz, 50 Hz, 60 Hz und 400 Hz werden ausgeschaltet, indem Messfrequenzen ungleich dem ganzzahligen Vielfachen der Netzfrequenz verwendet werden. Einige Messgeräte haben mehrere Messfrequenzen, die abhängig von den vorkommenden Störungen automatisch ausgewählt werden. Die baulichen Anforderungen für Erdungsmessgeräte sind in den Bestimmungen

DIN VDE 0413, Teil 5/EN 61557-5 beschrieben.

6.1 Strom-/Spannungsverfahren

Beim Strom-/Spannungsverfahren werden zwei Erdspieße (ein Hilfs-erder und eine Sonde) im Abstand von mindestens 15 bis 20 m voneinander und zum zu messenden Erder gesetzt. Die Anordnung kann in einer Linie oder auch als gleichseitiges Dreieck erfolgen. Der Abstand untereinander ist notwendig, damit im Bereich der Sonde kein Potential durch den Messstrom im Hilfs-erder oder Erder auftritt. Die Einbringtiefe der Erdspieße hat keinen Einfluss auf den Messwert, da Hilfs-erder- und Sondenwiderstände durch das Messverfahren kompensiert werden.

Um die Zuverlässigkeit des ermittelten Messwerts zu prüfen, empfiehlt es sich die Anschlüsse für Hilfs-erder und Sonde am Messgerät zu tauschen und die Messung zu wiederholen. Zusätzlich sollte man den Erdspieß für die Sonde um 3 bis 6 m versetzen und die



7 Spezifische Erdwiderstandsmessung

Quelle: Fluke

Messung nochmals wiederholen. Zeigen alle Messanordnungen annähernd vergleichbare Werte an, so liegt die Sonde außerhalb der erzeugten Spannungstrichter von Erder und Hilfserder im neutralen und somit zuverlässigen Bereich.

Dreileitermessung. Bei der Dreileitermessung wird nur eine Messleitung an den Erder angeschlossen, der Widerstand der Messleitung vom Messgerät wird dabei mitgemessen. Mit dieser Messung können schnell und sicher die Erdungswiderstände von Fundament-, Baustellen- und Blitzschutzerdern ermittelt werden (Bild 6).

Vierleitermessung. Die Vierleitermessung kann anstelle der Dreileitermessung eingesetzt werden, wenn es sich um sehr niederohmige Erdungswiderstände ($< 1...2 \Omega$) handelt und der Einfluss der Messleitung zwischen Messgerät und Erder das Messergebnis wesentlich beeinflusst. Dazu werden zwei Messleitungen getrennt an den zu messenden Erder angeschlossen (Bild 4).

Zweileitermessung. Bei der Zweileitermessung wird der Widerstand zwischen dem zu messenden Erder und einem bekannten Erder gemessen, hier kann z. B. der PEN-Leiter eines TN-Systems benutzt werden. Vom Messergebnis ist der Widerstand des bekannten Erders abzuziehen. Diese Messung lässt sich auch in einem dicht bebauten oder versiegelten Gebiet durchführen, wo keine Erdspieße zu Messung gesetzt werden können.

6.2 Selektive Erdungsmessung

In Erdungsanlagen mit mehreren parallelgeschalteten Erdern wird bei Messungen des Erdungswiderstandes der Gesamtwiderstand der Erdungsanlage gemessen.

Sollen die Einzelwiderstände ermittelt werden, so muss jeder Erder bei der Messung aufgetrennt und einzeln gemessen werden, was jedoch in der Praxis sehr aufwändig ist. Zudem kann durch Ausgleichströme eine Gefährdung des Prüfers auftreten.

Die selektive Erdungsmessung vermeidet diese Probleme. Die Erder müssen nicht aufgetrennt werden. Bei dieser Messung werden ebenfalls zwei Erdspieße (Hilfserder und Sonde) gesetzt. Der Messstrom wird zwischen Hilfserder und Erder eingespeist und der Spannungsfall zwischen Erder und Sonde gemessen. Die Stromzange wird um den zu mes-

senden Erder gelegt, und damit nur der Teil des Messstromes gemessen, der tatsächlich durch den zu messenden Erder fließt. Teile des Messstromes, die dabei durch parallel geschaltete Erder fließen, beeinflussen das Messergebnis nicht. Mit dieser Messmethode lassen sich z. B. Einzelerder einer Blitzschutzanlage ermitteln (Bild 5).

6.3 Erdschleifenmessung

Bei Erdungsanlagen mit untereinander verbundenen Erdern, die eine geschlossene Schleife bilden (z. B. die Blitzschutzanlage eines Hauses) oder in TN-Systemen, kann mit Hilfe von zwei Stromzangen der Widerstand jeder Erdschleife schnell und sicher ermittelt werden. Das Setzen von Sonden und Hilfserdern oder das Auftrennen des Erders ist nicht notwendig. Diese Methode eignet sich als Alternative besonders an Gebäuden, in denen Sonden und Hilfserder nicht gesetzt werden können, oder an Hochspannungsanlagen, bei denen das Auftrennen des Erders zu Störungen der Anlage oder gar zur Gefährdung des Prüfers führen kann (Bild 6).

7 Spezifische Erdwiderstandsmessung (Wenner-Methode)

Für die Berechnung des Ausbreitungswiderstandes von Erdern und Erdungsanlagen ist die Ermittlung des spezifischen Erdwiderstands notwendig. Der spezifische Erdwiderstand kann nicht an allen Messgeräten direkt abgelesen werden. Der angezeigte Messwert muss dann zur Berechnung in Gleichung 1 eingesetzt werden.

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R_E \quad (1)$$

ρ = spezifischer Erdwiderstand (in Ωm)

$$\pi = 3,14159$$

a = Abstand zwischen den Erdspießen (in m)

R_E = gemessener Erdwiderstand (in Ω)

Diese Messung wird mit vier Erdspießen durchgeführt, die in einer Linie im gleichen Abstand a eingeschlagen werden. Der Erdwiderstand wird etwa bis zur Tiefe des Abstands a erfasst (Bild 7).

8 Gerätebeispiele zur Messung

Die Messgeräte Fluke 1623 und 1625 sind universelle Geräte zur Messung des Erdungswiderstands an Erdern und Erdungssystemen. Alle beschriebenen Messverfahren können damit durchgeführt werden. Zusätzliche Eigenschaften des letztgenannten Gerätes sind: automatische Frequenzwahl zur Unterdrückung von Störsignalen, Erdimpedanzmessung mit 55 Hz, zur Bestimmung des Kurzschlussstromes bei Erdschluss, einstellbare Messspannung 20/48 V und einstellbare Grenzwerte. Ein Set besteht aus Messgerät, Messleitungen, Erdspießen, Stromzangen und Kabeltrommeln mit Messleitungen. ■