

AUF EINEN BLICK
 In diesem Beitragsteil betrachten wir speziell Hochspannungs-Erdungsanlagen, das sogenannte globale Erdungssystem sowie den Aspekt Erdungsanlage und elektromagnetische Verträglichkeit (EMV).
 Fortsetzung aus »de« 13-14/2009, S. 26

Erdung und Potentialausgleich (2)

Erdungsanlagen im Detail

Neben normativen Forderungen und Dimensionierungskriterien von Erdungsanlagen sowie dem Potentialausgleich ist auch die praktische Ausführung von Erdungsanlagen von entscheidender Bedeutung. Insbesondere Hochspannungserdungsanlage und Aspekte der EMV stellen eine Herausforderung für Planer und Errichter dar.

Nachdem der erste Beitragsteil sich mit der Klärung der Terminologie von Erdungsanlagen befasste, geht der zweite Beitragsteil im weiteren Verlauf auf wichtige Details von Erdungsanlagen ein. Doch zunächst knüpfen wir hier an die Hochspannungserdung (HS-Erdung) an.

Anforderung an HS-Erdung

Bei der HS-Erdung unterscheidet man vier Anforderungen (Bild 4, erster Beitragsteil). Die **mechanische Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit** muss sichergestellt sein. Diese Forderung gilt dann als erfüllt, wenn die Werkstoffe und Mindestmaße gemäß DIN VDE 0101:2000-01, Anhang A (Tabelle 4) verwendet werden. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass national nicht alle Werkstoffe eingesetzt werden (u.a. wegen Umweltgesichtspunkten).

Vor allem beim Zusammenschluss von verschiedenen Erderwerkstoffen ist das Korrosionsverhalten in Bezug auf dem Flächenverhältnis $S_K/S_A > 100$ zu beachten (Tabelle 5). In dieser Tabelle dient das Plus-Zeichen der Kennzeichnung, dass ein Zusammenschluss dieser Materialien korrosionstechnisch als unkritisch zu bewerten ist, während bei einem Minus-Zeichen mit Korrosionsproblemen zu rechnen ist. Einschränkend ist dieses bei jenen Zusammenschlüssen zu betrachten, bei denen ein Zinkabtrag vorkommen kann. Dabei wird die äußere Schicht als Opfermaterial im Rahmen des Korrosionsschutzes verwendet. Dieses wird jedoch in zahlreichen Beispielen in der Praxis angewendet und ist unter Berücksichtigung der Umgebungsparameter i. d. R. unkritisch.

Die **Beschädigung von Sach- und Betriebsmitteln** muss verhindert werden. Dabei sind neben weiteren Aspekten z. B. auch EMV-Gesichtspunkte zu

berücksichtigen. Hierzu ist z. B. die Anwendung der DIN EN 50130 (VDE 0800-2-310):2006-10 sowie DIN VDE 0800-174-2: 2001-09 für Installationspraktiken – insbesondere für informationstechnische Anlagen – erforderlich. Dabei wird im Rahmen der Anwendung

von Maßnahmen für Erdung und Potentialausgleich in Gebäuden mit Einrichtungen der Informationstechnik auf eine gitterförmige Struktur, vermaschtes Erdungs- und Potentialausgleichssystem bei Verminderung von Induktionsschleifen der auch eine möglichst kurze





				
Hersteller	Dehn + Söhne	Dehn + Söhne	Dehn + Söhne	Weitkowitz
Typ	478200	472207	306101	WEB17/18
Max. Dimensionierung	6,5 kA, 1s, 300°C	39 kA, 1s, 300°C	13,6 kA, 1s, 300°C	25 kA, 1s, 300°C (siehe auch Prüfbericht IPH_2004.2090453.0267)

Bild 5: Produktbeispiele für Anschluss, Klemm- und Verbindungsmaterial zum Zwecke der Betriebs- und Schutzerdung

		EINFLUSS FLÄCHENVERHÄLTNISS BEIM VERBINDEN							
		Werkstoff mit großer Fläche							
		St/t Zn	St	St in Beton	St/t Zn in Beton	NIRO	Cu	Cu/gal Sn	Cu/t Zn
Werkstoff mit kleiner Fläche	St/t Zn	+	+ Zinkabtrag	-	+ Zinkabtrag	-	-	-	+
	St	+	+	-	+	-	-	-	+
	St in Beton	+	+	+	+	+	+	+	+
	Stahl Cu-coated	+	+	+	+	+	+	+	+
	NIRO	+	+	+	+	+	+	+	+
	Cu	+	+	+	+	+	+	+	+
	Cu/gal Sn	+ Zinkabtrag	+ Zinkabtrag	+ Zinkabtrag	+ Zinkabtrag	+ Zinkabtrag	+ Zinkabtrag	+ Zinkabtrag	+ Zinkabtrag
	Cu/t Zn	+	+	+	+	+	+	+	+

Tabelle 5: Zusammenschluss verschiedener Erderwerkstoffe unter Berücksichtigung des Flächenverhältnisses

Quelle: DIN VDE 0151:1986-06, Tabelle 3

bzw. niederimpedante Erdungsanbindung gefordert.

Der höchste zu erwartende Fehlerstrom (Erdfehlerstrom) muss aus thermischer Sicht sicher beherrscht werden (Gl. 3):

$$A = \frac{I}{K} \cdot \sqrt{\frac{t}{\ln\left(\frac{\Theta_f + \beta}{\Theta_i + \beta}\right)}} \quad (\text{Gl. 3})$$

mit:

- A – Leiterquerschnitt [mm²]
- I – Leiterstrom = Fehlerstrom [A]
- K – Werkstofffaktor [A · √s / mm²]
 · Kupfer: $K = 226 \text{ A} \cdot \sqrt{\text{s}} / \text{mm}^2$
 · Aluminium: $K = 147 \text{ A} \cdot \sqrt{\text{s}} / \text{mm}^2$
 · Stahl: $K = 78 \text{ A} \cdot \sqrt{\text{s}} / \text{mm}^2$
- t – Fehlerstromdauer (wenn nicht bekannt ist 1 s üblich)
- β – Kehrwert des Temperaturkoeffizienten des Widerstands des stromführenden Leiters [°C]
 · Kupfer: $\beta = 234,5^\circ\text{C}$
 · Aluminium: $\beta = 228^\circ\text{C}$
 · Stahl: $\beta = 202^\circ\text{C}$
- Θ_i – Anfangstemperatur des Leiters [°C]
- Θ_f – Endtemperatur des Leiters [°C]
 · Cu, St/t Zn, Pb, NIRO: $\Theta_f = 300^\circ\text{C}$
 · Cu/gal Sn: $\Theta_f = 150^\circ\text{C}$
 · besondere Umgebungsbedingungen z. B. Ex-Bereich: Angabe der Betreiber
 · Isolierwerkstoffe: Herstellerangaben.

Dabei stellt der Eingabeparameter Fehlerstrom bei der Berechnung der Erderquerschnitte eine in der Praxis häufig schwer handhabbare Information dar. Durch eine Überbewertung des Fehlerstroms kann zunächst eine sehr große Sicherheit erzielt werden. Allerdings ist diese Überdimensionierung der Leiterquerschnitte auch mit einem Kostenzuwachs verbunden. Eine praktikable, auf normativen Forderungen basierende Ermittlung des Erdfehlerstromes ist in Gl. 4 dargestellt:

$$\begin{aligned} I_{kEE}'' &= 0,85 \cdot I_k'' = I_F \\ I_{kEE_sym}'' &= (n \cdot 1,3) \cdot I_{kEE}'' = \\ &= I_{F_sym} = (n \cdot 1,3) \cdot I_F \quad (\text{Gl. 4}) \\ I_{kEE_sym_r}'' &= r \cdot I_{kEE_sym}'' = \\ &= I_{f_sym_r} = r \cdot I_{f_sym} \end{aligned}$$

mit:

- I_k'' – prospektiver Kurzschlussstrom [A]
- I_F – Fehlerstrom (Dimensionierungskriterium) [A]
- I_{kEE}'' – Doppelerdschlussstrom [A]; Anmerkung: Die Sternpunktverhältnisse müssen berücksichtigt werden; Gemäß DIN VDE 0101:2000-01 dürfen

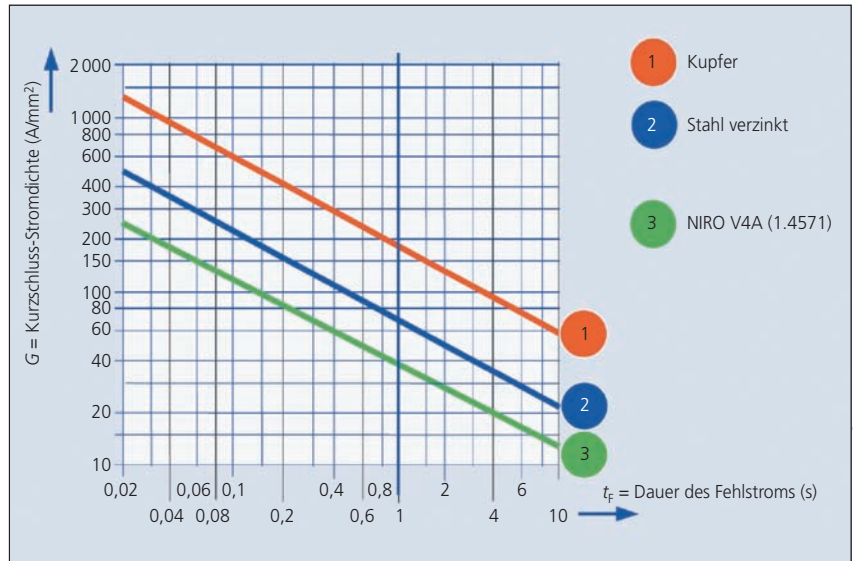


Bild 6: Kurzschlussstromdichte G in Abhängigkeit der Fehlerstromdauer t_f

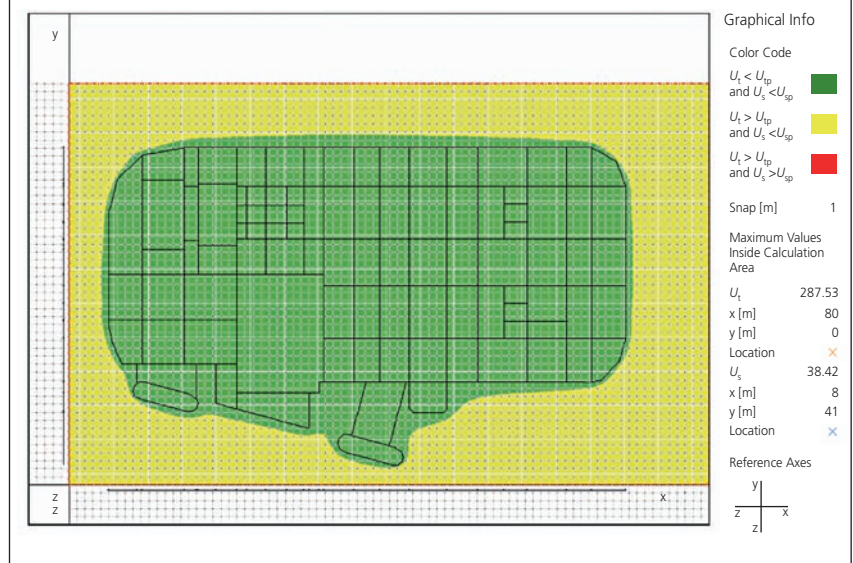
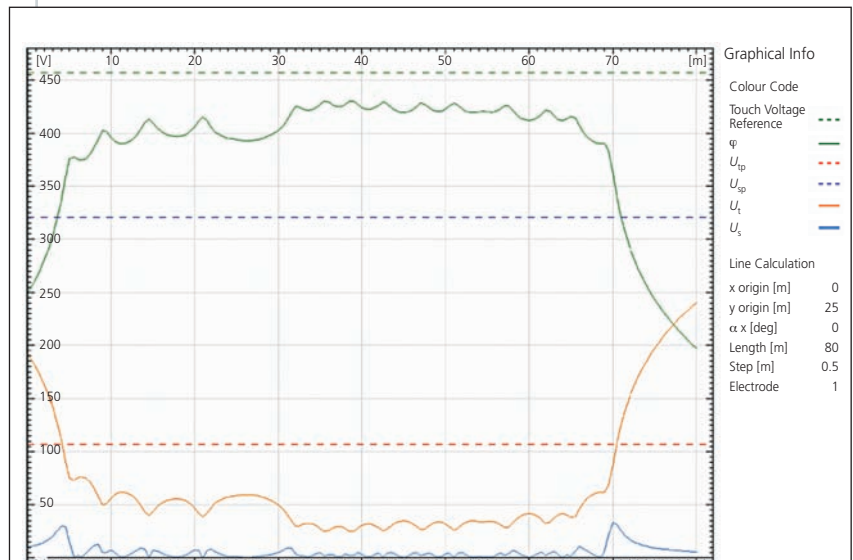


Bild 7: Analytische Erdungsberechnung – Teilberechnung der Berührungsspannung U_{TP}

Quelle: DIN VDE 0101:2000-01, Bild B.1 sowie Dehm + Söhne (Prüfbericht EPM Nr. 6337)

Quelle: SINT Informatica

für den Doppelerdschlussstrom 85% des dreipoligen Anfangskurzschlusswechselstromes als Höchstwert verwendet werden

- I_{kEE_sym}'' – Doppelerdschlussstrom [A] unter Berücksichtigung Stromaufteilung (Symmetrierung)
- I_{f_sym} – Fehlerstromangabe [A] unter Berücksichtigung Stromaufteilung (Symmetrierung); Anmerkung: Allgemein üblich wird ein Sicherheitsfaktor von 30% zur Berücksichtigung von Unsymmetrien angenommen, d.h. $n = 2 \rightarrow 0,65$, $n = 3 \rightarrow 0,43$, $n = 4 \rightarrow 0,33$
- $I_{kEE_sym_r}''$ – Symmetrierter Doppelerdschlussstrom [A] unter Berücksichtigung der Reduktionsfaktoren, z.B. Kabelschirme
- $I_{F_sym_r}$ – Symmetrierter Doppelerdschlussstrom [A] unter Berücksichtigung von Reduktionsfaktoren, z.B. Kabelschirme
- $I_{f_sym_r}$ – Symmetrierte Fehlerstromangabe [A] unter Berücksichtigung

von Reduktionsfaktoren z.B. Kabelschirme

- n – Anzahl Stromknoten [-] bzw. Stromaufteilungen (direkte Strompfade)
- r – Reduktionsfaktor [-] z.B. Kabelschirme.

Sollte grundsätzlich die Angabe des Fehlerstroms oder die mittelbare Berechnung des Erdfehlerstroms nicht möglich sein, besteht eine Abschätzung über den Leistungsansatz (Gl. 5). Dabei wird von einem sekundärseitigen Kurzschluss am Transformator ausgegangen und unter Berücksichtigung der Nennleistung, Sekundärspannung und relativen Kurzschlussspannung der maximal mögliche Kurzschlussstrom als Dimensionierungskriterium $I_k'' = I_{k3}''$ angesetzt.

$$I_k'' = I_{k3}'' = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot U_k} \quad (\text{Gl. 5})$$

- I_k'' – prospektiver Kurzschlussstrom [A]

- I_{k3}'' – prospektiver, dreipoliger Kurzschlussstrom [A]
- S – Scheinleistung [VA]
- U_2 – Sekundärspannung [V]
- U_k – relative Kurzschlussspannung [%]. Insbesondere bei der praktischen Umsetzung ist bei der Auswahl entsprechender Erdungsmaterialien wie Anschluss-, Klemm- und Verbindungsmaterial (Bild 5) die geeignete Dimensionierung zu beachten. Hierzu sind sowohl durch den Planer als auch durch den Errichter entsprechende Vorgaben zu geben bzw. einzuholen und bei der Ausführung Herstellerangaben abzufragen. Darüber hinaus sind entsprechende Montagebedingungen explizit zu beachten.

Für die Berechnung von nichtrostendem Edelstahl ist die thermische Dimensionierung gemäß Gl. 4 aufgrund mangelnder normativer Parameter nicht möglich. Alternativ kann hier die Querschnittsdimensionierung über die Kurzschlussstromdichte erfolgen (Gl. 6 und Bild 6). Diese Berechnung ist für die Werkstoffe Cu, St/t Zn und Cu/gal Sn eine entsprechende Alternative und stellt bei der Anwendung von nichtrostendem Edelstahl eine praktikable Lösung dar:

$$A = \frac{I_f}{G} \quad (\text{Gl. 6})$$

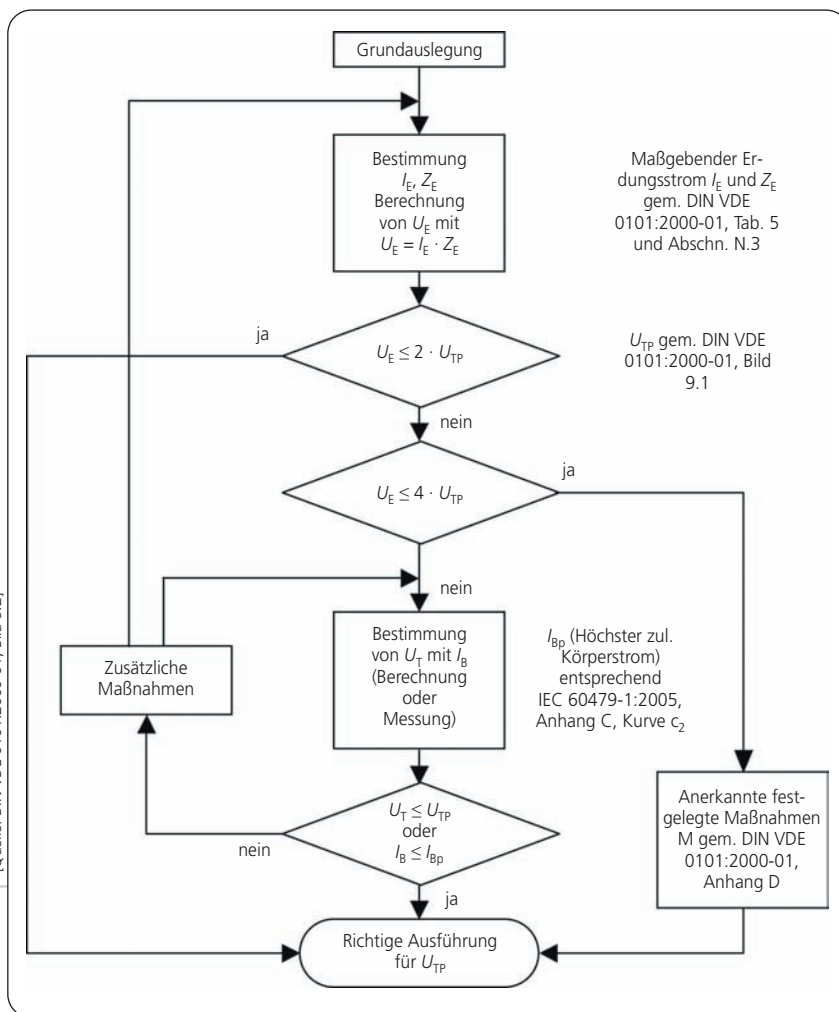
mit:

- A – Leiterquerschnitt [mm²]
- I_f – Fehlerstrom [A] (Dimensionierungskriterium)
- G – Kurzschlussstromdichte [A/mm²] gemäß Bild 6.

Als letztes Kriterium in Bezug auf die Dimensionierung von HS-Erdungsanlagen ist die **Sicherheit von Personen** (ggf. auch Nutztiere) im Hinblick auf Spannungen an Erdungsanlagen, die während des Erdfehlerstroms auftreten, zu gewährleisten. Dieses gilt als erfüllt, wenn

- die betreffende Anlage Teil eines globalen Erdungssystems ist oder (siehe unten) und
- durch Messung oder Berechnung (analytische Erdungsberechnung) die Bedingung $U_E \leq 2 \cdot U_{TP}$ eingehalten wird (Bild 7).

Die Definition bzw. Auslegung eines globalen Erdungssystems ist dabei äußerst schwierig. Gemäß DIN VDE 0101:2000-01, Abs. 2.7.14.6, ist dieses durch die Verbindung von örtlichen Erdungsanlagen hergestellte Erdungssystem definiert, das sicherstellt, dass durch den geringen gegenseitigen



[Quelle: DIN VDE 0101:2000-01, Bild 9.2]

Bild 8: Zulässige Berührungsspannung U_{TP} durch Überprüfung Erdungsspannung U_E oder Berührungsspannung U_T unter Voraussetzung kein globales Erdungssystem

gen Abstand dieser Erdungsanlage keine gefährlichen Berührungsspannungen auftreten. Solche Systeme bewirken eine Verteilung der Erdfehlerströme in der Weise, dass die Erdungsspannung der örtlichen Erdungsanlage reduziert wird (Quasipotentialfläche). Der Begriff »Globales Erdungssystem« beruht auf der Tatsache, dass in einem Gebiet keine oder keine nennenswerten Potentialdifferenzen bestehen. Da hierfür keine alleinige Regel zur Verfügung steht, führt man diese Erdungsanlagen in der Praxis so aus:

- Gebäude- und Anlagenerdungen gemäß DIN 18014:2007-09
- vermaschte Erdungsanlagen bei ausgedehnten Flächen gemäß DIN 62305-3 (VDE 0185-305-3):2006-10, Abs. E.5.4.3.6. Hier werden folgende Maschenweiten empfohlen: in Gebäudenähe 20 m x 20 m; bei mehr als 30 m Entfernung vom Gebäude 40 m x 40 m.

Das Globale Erdungssystem

Die Norm DIN E VDE E 0101:2008-12 definiert den bereits erwähnten Begriff des globalen Erdungssystems. Ein niedriger Gesamt Widerstand ist nützlich, aber kein alleiniges Sicherheitsmerkmal. Daher legt die Norm keine Mindestanforderungen für den Widerstand fest. Außerdem können durch Zusatzwiderstände und angemessene Potentialsteuerung die Sicherheitsanforderungen erfüllt werden – sogar in Anlagen mit hohem Erdboden- und Gesamt widerstand.

Ein niedriger Fehlerstrom ist nützlich, da die gesamte Erdungsspannung begrenzt wird. Ein geeigneter Reduktionsfaktor des Kabelschirms oder

ein Erdleiter-Reduktionsfaktor verteilt den Fehlstrom so, dass die gesamte Erdungsspannung begrenzt wird. Eine kurze Fehlerdauer erhöht die zulässige Berührungsspannung, und damit wird die Abweichung bezogen auf die zulässigen Grenzwerte kleiner.

Allgemeine Ansätze

Beim globalen Erdungssystem geht man davon aus, dass die Anlage

- umgeben ist von Gebäude mit Fundamentenerdern und verbundenen Erdungsanlagen, z.B. durch Kabelschirme oder Niederspannungsschutzleiter,
- das Städtetz oder dicht bebaute Gebiete versorgt,
- auch Vorstadtgebiete mit vielen verteilten Erdern versorgt, die durch die Niederspannungsschutzleiter verbunden sind;
- aus einer bestimmten Anzahl von nahegelegenen Anlagen besteht,
- über Kabel mit Erderwirkung verbunden ist,
- u.U. ausgedehnte Industriegebiete versorgt,
- Teil eines Systems mit mehrfach geerdeten Hochspannung-Neutralleitern ist.

Betrachtung der elektromagnetischen Verträglichkeit

Aus EMV-Gesichtspunkten und als praktikable Lösung empfiehlt sich die Anwendung eines globalen Erdungssystems. Sollte eine Erdungsanlage ausgeführt werden, die nicht Bestandteil eines globalen Erdungssystems ist, sind besondere Dimensionierungskriterien und auch Maßnahmen zu beachten (**Bild 8**).

Sowohl für die Planung als auch die Errichtung sind grundlegend nachfolgende Mindestangaben als Dimensionierungskriterium für die HS-Erdungsanlage erforderlich:

- Anforderung
- Fehlerstrom (abhängig von Sternpunktverhältnissen) und Phasenwinkel
- Fehlerdauer (Distanzschutz und Backup-Schutz nicht Anlagendimensionierung)
- Reduktionsfaktoren
- Parallelimpedanzen Z_p und Phasenwinkel φ_p
- Netzaufbau
- zu betrachtende Fehlerfälle
- Beschaffenheit der Erde

(Fortsetzung folgt)

Dipl.-Ing. (FH) Thorsten-Peter Müller,
Thor-Donar GmbH, Hamburg

MEHR INFOS

Buch zum Thema

Schmolke, Chun, Soboll, Walfort: Elektromagnetische Verträglichkeit in der Elektroinstallation, Hüthig&Pflaum Verlag, 2006, 267 Seiten, ISBN 978-3-8101-0222-5

Fachbeiträge zum Thema

Müller, T.-P.: Qualität durch Planung – Fachgerechte und strukturierte Planung am Beispiel von EMV und Blitzschutz, »de« 13–14/2008, S. 26ff.

Link zum Thema

www.thor-donar.com