



Elektrische Sicherheit **bei der Ladung von Elektrofahrzeugen**

Die Überwachung des Isolationswiderstandes hat für die Verhütung von Sach- und Personenschäden und die Betriebssicherheit von elektrischen Anlagen eine besondere Bedeutung. Der Isolationswiderstand dient gleichzeitig als wichtiger Indikator für den Qualitätszustand einer elektrischen Installation. Dies gilt auch im Bereich der E-Mobility. Durch die richtige Auswahl der Netzform in Koordination mit den normgerechten Schutz- und Überwachungseinrichtungen wird ein Höchstmaß an Sicherheit und Zuverlässigkeit erreicht.

Netzform und Schutzmaßnahmen

Im Bereich der E-Mobility sind im Wesentlichen drei Netzformen zu berücksichtigen. Bei der AC-Ladung sind dies primär geerdete Netze (TN-S-Systeme), während bei der DC-Ladestation ungeerdete Stromversorgungen (IT-Systeme) Anwendung finden. Das Elektrofahrzeug selbst verfügt über ein isoliert aufgebautes Hochvolt-System (HV-System), das mit einem IT-System nach DIN VDE 0100-100:2009 [1] vergleichbar ist. Knackpunkt für die elektrische Sicherheit ist insbesondere der Ladevorgang, denn dabei werden unterschiedliche Netzformen zu einem Gesamtsystem verbunden. Im Fahrbetrieb kann das Hochvolt-System des Fahrzeuges als „ortsveränderliches“



IT-System betrachtet werden, im Ladebetrieb wird daraus entweder ein geerdetes (TN-System) oder ein ungeerdetes Gesamtsystem (IT-System) mit der wesentlichen Herausforderung, die Schutzmaßnahmen des speisenden Netzes und des HV-Systems unter einen Hut zu bringen.

HV-System

Das HV-System im Fahrzeug wird durch eine bordeigene Isolationsüberwachungseinrichtung überwacht und das Auftreten eines Isolationsfehlers gemeldet, denn eine Abschaltung im Fahrbetrieb wäre ja fatal. Die Meldung bekommt der Fahrer z. B. per Display angezeigt, so dass der Isolationsfehler durch eine Fachwerkstatt beseitigt werden kann. Eine unmittelbare Gefährdung für den Fahrer besteht nicht, jedoch muss der Isolationsfehler so schnell wie möglich beseitigt werden, um zu verhindern, dass ein zweiter Fehler an einem anderen Leiter den Fahrbetrieb beeinträchtigt.

Ladevorgang

Die Schutzmaßnahmen für die elektrische Installation sind in der Norm DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06 [2] ausführlich beschrieben, während die Maßnahmen für das Elektrofahrzeug in der Norm ISO/FDIS 6469-3:2011-05 [5] definiert sind. Bevor ein Elektrofahrzeug geladen werden kann, sollte zunächst sichergestellt sein, dass das HV-System im Fahrzeug ohne Isolationsfehler ist. Dadurch wird vermieden, dass ein Isolationsfehler im Fahrzeug die Schutz- und Überwachungseinrichtung in der Ladestation zum Ansprechen bringt und so ein Laden verhindert. In der Regel kontrolliert das fahrzeugeigene Isolationsüberwachungssystem den Isolationswiderstand und gibt den Ladekontakt im Fahrzeug nur dann frei, wenn ein ausreichender Isolationswiderstand vorhanden ist. Als Grenzwerte sind z. B. in der ISO/FDIS 6469-3:2011-05 [5] für AC-Systeme $500 \text{ V}/\Omega$ und für DC-Systeme mit

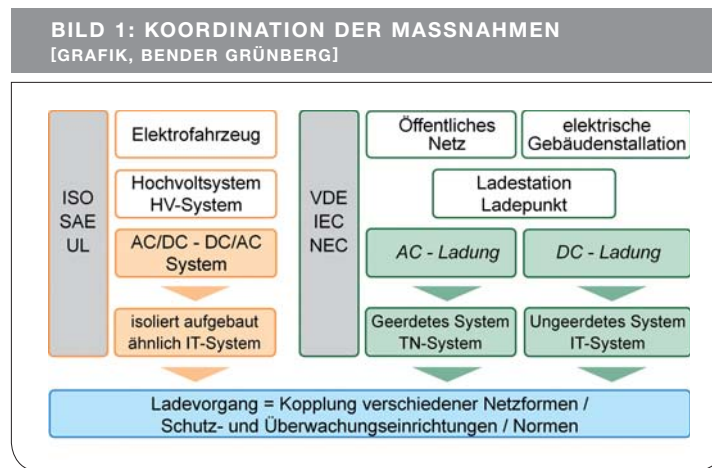
$100 \text{ } \Omega/\text{V}$ festgelegt. Mit Beginn des Ladevorganges wird die Isolationsüberwachung des Fahrzeuges meist passiv geschaltet, um zu vermeiden, dass die Schutz- und Überwachungseinrichtungen in der Ladestation beeinflusst werden. Somit hat die Schutzeinrichtung in der Ladestation dann die Aufgabe, den kompletten Stromkreis einschließlich der Ladeelektronik im Fahrzeug während der Ladung zu überwachen.

Eine wesentliche Voraussetzung für einen sicherheitsgerechten Ladevorgang ist die Durchgängigkeit des Schutzleiters. Dies wird durch den Control Pilot kontrolliert und während des Ladevorganges überwacht. Bei ordnungsgemäß vorhandenem Schutzleiter wird der Ladevorgang freigegeben. Aus Sicht der Ladestation besteht auch die Möglichkeit den Isolationswiderstand vor Beginn zu messen, wobei dies dann meist das Ladekabel bis hin zum Fahrzeug-Inlet umfasst. Dadurch können aber z. B. Schäden am Ladekabel, die durch

mechanische Einwirkungen entstanden sind, erkannt werden. Für die Ladung eines Elektrofahrzeuges sind normativ verschiedene Möglichkeiten vorgesehen, die in der Normenreihe DIN IEC 61851-... [3] als Mode 1...4 definiert sind.

AC-Ladung (Mode 2 und 3)

Für die AC-Ladung ist nach IEC 61581-... [3] Mode 3 pro Ladesteckdose eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung Typ A gefordert. Auch sind Forderungen aus der DIN EN 61140 (VDE 0140-1):2007-3 [7] zu berücksichtigen, dass die getroffenen Maßnahmen gegen Schutzleiterströme alle Frequenzen die zum Betriebsmittel übertragen bzw. vom Betriebsmittel erzeugt werden, verträglich sein müssen. Dies bedeutet, können Fehlergleichströme $\leq 6 \text{ mA}$ oder



Fehlerströme mit höheren Frequenzen (z. B. 20 kHz) auftreten, ist der Schutz gegen elektrischen Schlag mit einer Fehlerstrom-Schutzeinrichtung Typ B bzw. B+ sicherzustellen oder entsprechenden alternative, schaltende Überwachungseinrichtungen. Ist nicht sichergestellt, dass im Stromkreis der Ladesteckdose ein RCD vorhanden ist, muss eine portable Schutz-

einrichtung IC-RCD eingesetzt werden (Mode 2). Die Fehlerstrom-Schutz- bzw. schaltenden Überwachungseinrichtungen stellen sicher, dass ein auftretender Wechselfehler- bzw. Fehlergleichstrom innerhalb einer vorgegebenen Zeit unterbrochen, d. h. der Verbraucher abgeschaltet wird und so keine Personengefährdung auftreten kann.



BILD 2: AC-LADUNG IM MODE 2 MIT EINEM IC-RCD TYP A IM LADEKABEL UND FEHLERSTROMERKENNUNG FÜR DC ≥ 6 MA BZW. HÖHERE FREQUENZEN IM FAHRZEUG.
[GRAFIK, BENDER GRÜNBERG]

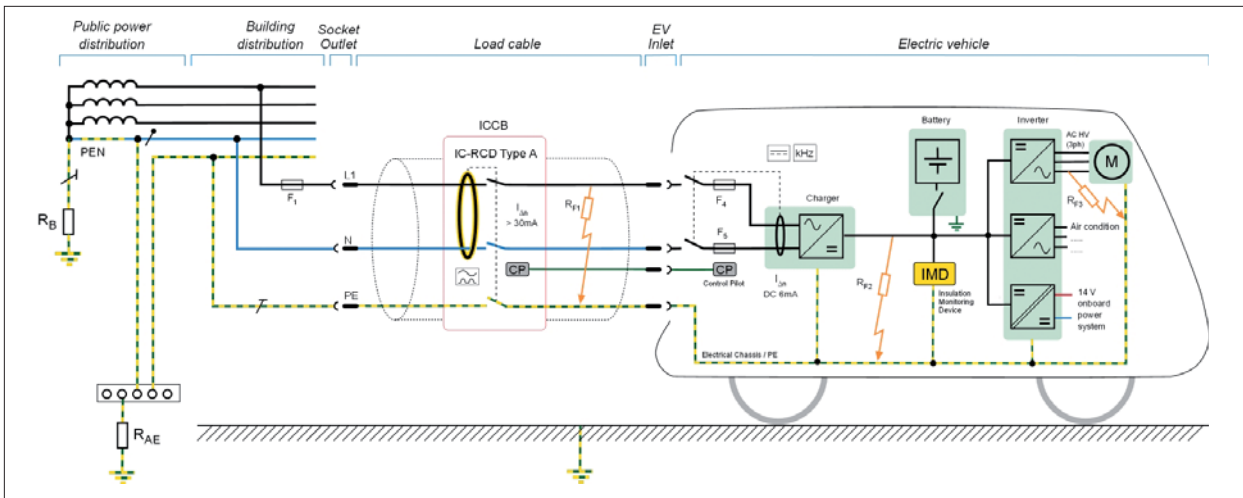
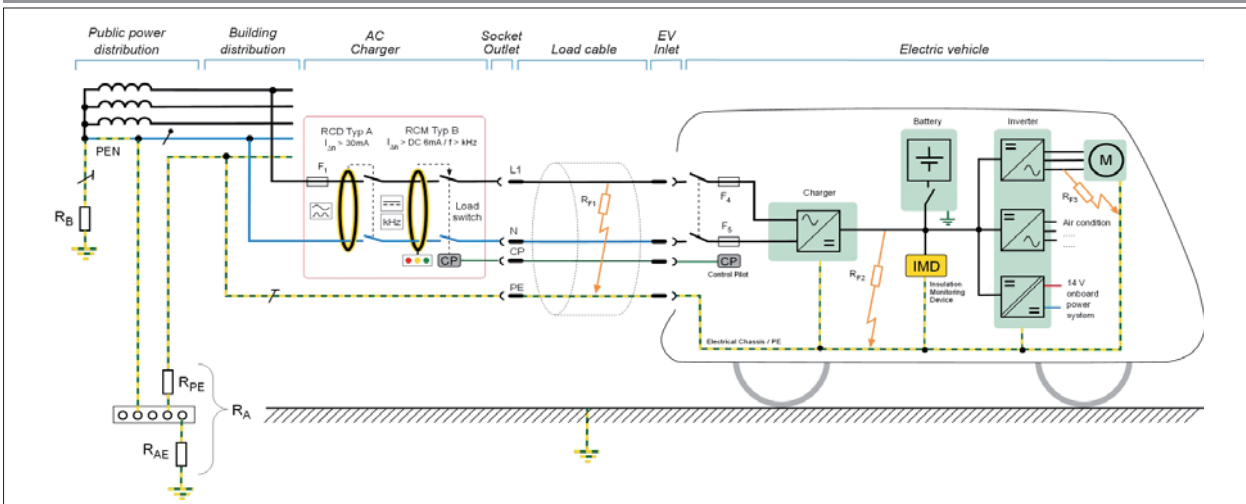


BILD 3: AC-LADUNG IM MODE 3 MIT RCD TYP A UND EINER ZUSÄTZLICHEN ÜBERWACHUNG FÜR FEHLERSTRÖME DC ≥ 6 MA BZW. HOHE FREQUENZEN IN DER ELEKTROINSTALLATION
[GRAFIK, BENDER GRÜNBERG]



DC-Ladung (Mode 4)

DC-Ladestationen werden als ungeerdetes System (IT-System) aufgebaut, d. h. kein aktiver Leiter darf mit Erde verbunden sein. Dies wird in der DC-Ladestation durch die isoliert aufgebaute Ladeelektronik bzw. den Trenntransformator erreicht. Nach DIN VDE 0100-410:2007-06 [2] muss ein IT-System permanent mit einem Isolationsüberwachungsgerät überwacht und das Unterschreiten eines vorgegebenen Wertes gemeldet werden. Das so aufgebaute IT-System hat zwei wesentliche Vorteile: Ein erster Isolationsfehler führt nicht zur Abschaltung sondern nur zur Meldung. Dies bedeutet, der Ladevorgang kann problemlos zu Ende geführt werden. Der zweite wesentliche Vorteil: Die Berührungsspannung beträgt im ersten Fehlerfall annähernd 0 V. Somit ist eine mögliche Gefährdung durch eine Körperdurchströmung nahezu ausgeschlossen. Ein wichtiger Aspekt, gerade im Hinblick auf die Nutzung der Ladestationen durch elektrotechnische Laien.

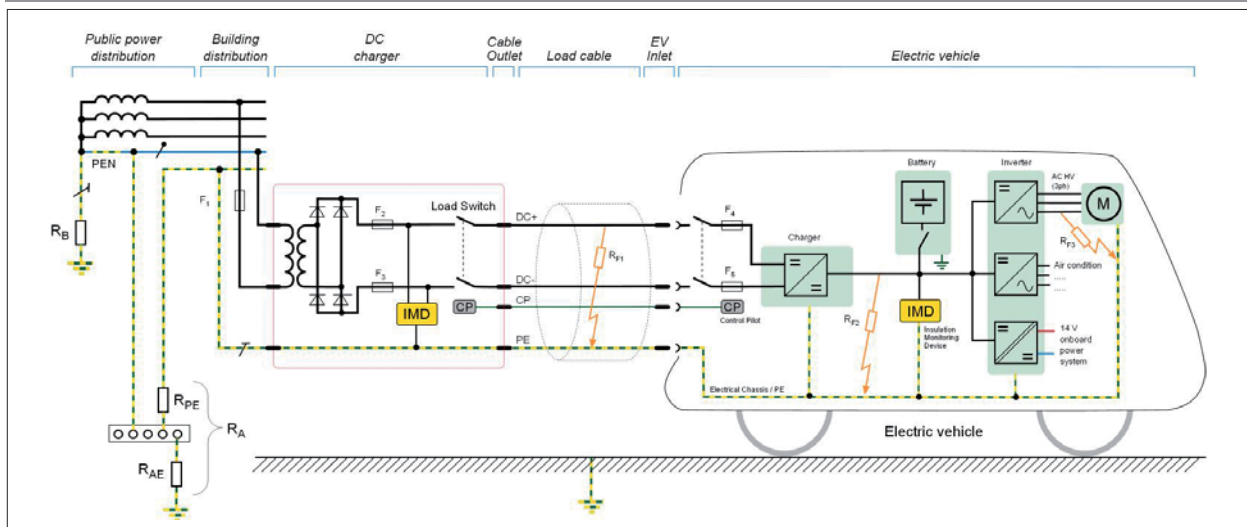
Das Isolationsüberwachungsgerät selbst muss nach DIN VDE 0100-410:2007-06 [2] den Anforderungen

von DIN EN 61557-8:2007-12 [6] genügen, d. h. es muss sowohl symmetrische als auch unsymmetrische Isolationsfehler erkennen. Ein symmetrischer Isolationsfehler liegt dann vor, wenn sich der Isolationswiderstand aller Leiter eines zu überwachenden Netzes nahezu gleichmäßig verringert. Wird dieser Fehlerzustand nicht erkannt, besteht z. B. Brandgefahr, da über die beiden Isolationsfehler an unterschiedlichen aktiven Leitern ein höherer Strom zum Fließen kommt, der an der Fehlerstelle zu einer hohen Erwärmung führen kann.

Berührungsspannungen bei einem 1. Fehler im DC IT-System

Nach DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06 [2] müssen in IT-Systemen die Körper der Betriebsmittel einzeln, gruppenweise oder in ihrer Gesamtheit mit einem Schutzleiter geerdet werden. Es muss die Bedingung $R_A \times I_d \leq 50 \text{ V (AC)}$ bzw. 120 V (DC) eingehalten werden. Dabei ist R_A die Summe der Widerstände des Erders und des Schutzleiters der Körper, I_d der Fehlerstrom im Fall des ersten Fehlers mit vernachlässigbarer Impedanz

BILD 4: DC-LADUNG IM MODE 4
[GRAFIK, BENDER GRÜNBERG]



zwischen einem Außenleiter und einem Körper. Der Wert von I_d berücksichtigt den Gesamtisolationswiderstand der elektrischen Anlage gegen Erde.

Bild 5 zeigt den Stromverlauf bei einem ersten Fehler (Isolationsfehler) in einem IT-System. Mit R_{iso3} und R_{iso4} sind die Gesamtisolationswiderstände zur Erde gemeint, welche im Fehlerfall einen Teil des Fehlerstromkreises bilden. Die in dem Bild dargestellten Isolationswiderstände sind in der Praxis meist sehr hoch und beeinflussen die Berührungsspannung in der dargestellten Fehlersituation nur minimal.

Bild 5 macht deutlich, dass die Berührungsspannung von den natürlichen Isolationswiderständen R_{iso3} , R_{iso4} , den Widerstandswerten des Schutzleiters R_{PE1} des berührenden Betriebsmittels und dem Erdungswiderstand abhängig ist. Bei der Annahme, dass der Schutzleiterwiderstand und Erdungswiderstand R_{AE} klein sind, wird die Berührungsspannung durch die Parallelschaltung des Widerstands des menschlichen Körpers (ca. $1\text{ k}\Omega$) nur wenig beeinflusst. In Bild 6 werden in Kurvenscharen die Beträge der möglichen Berührungsspannungen in einem DC 400 V IT-System bei einem ersten Fehler dargestellt. Als Variablen sind dabei die natürlichen Isolationswiderstände R_{iso3} , R_{iso4} und der Erdungswiderstand R_A aufgetragen. Der Schutzleiterwiderstand des Betriebsmittels ist mit $0,2\ \Omega$ berücksichtigt. Bei der Bewertung der Berührungsspannung ist zu berücksichtigen, dass die Ladestation und das Elektrofahrzeug gemeinsamen geerdet sind.



BILD 5: BERÜHRUNGSSPANNUNG IN EINEM DC-IT-SYSTEM
[GRAFIK, BENDER GRÜNBERG]

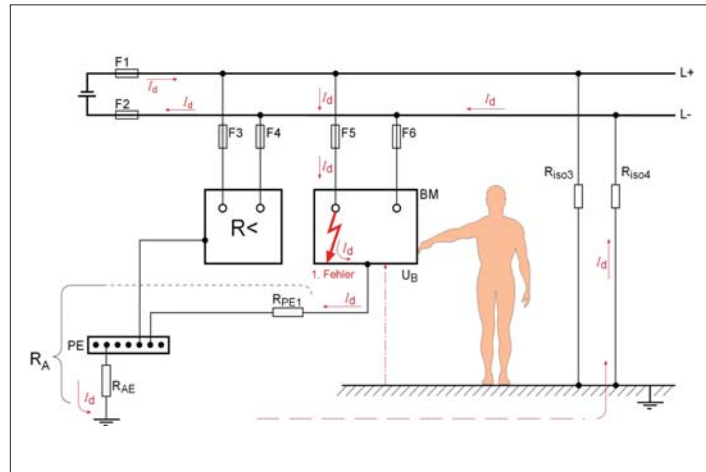


BILD 6: BERECHNETE BERÜHRUNGSSPANNUNGEN IN EINEM DC IT-SYSTEM BEI EINEM 1. FEHLER
[GRAFIK, BENDER GRÜNBERG]

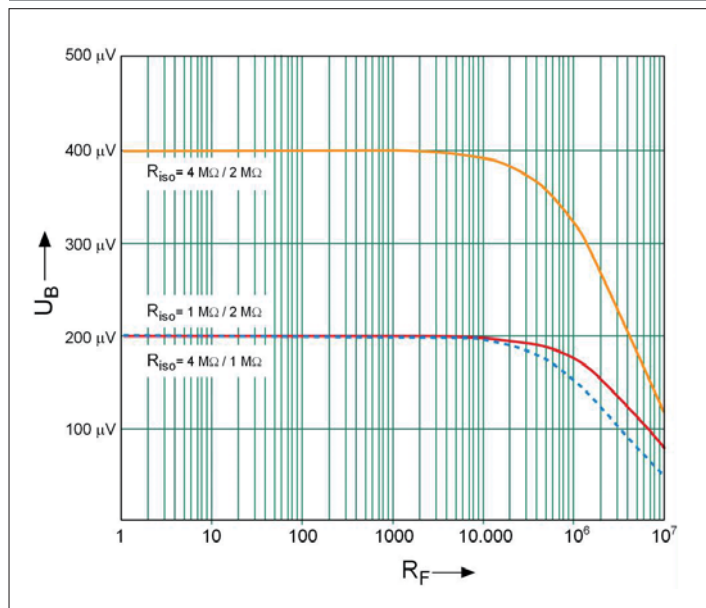


BILD 7: BEISPIEL FÜR EIN ISOLATIONSÜBERWACHUNGSGERÄT (A-ISOMETER®) AUS DEM E-MOBILITY BEREICH [WERKSFOTO, BENDER GRÜNBERG]



Obwohl beim ersten Fehler in IT-Systemen nur relativ geringe Berührungsspannungen zu erwarten sind, ist die zwingende Forderung in Punkt 413.1.5.4 von DIN VDE 0100-410:2007-06 [2] die Notwendigkeit eines Isolationsüberwachungsgerätes von elementarer Bedeutung. Mit der Forderung in Anmerkung 1 Punkt 413.1.5.4 „Es wird empfohlen, den ersten Fehler so schnell wie möglich zu beseitigen“ wird klar, dass bei einem nicht beseitigten ersten Fehler ein hinzukommender zweiter Fehler zu höheren Berührungsspannungen führen kann. Sind in einem solchen Falle beide Fehler relativ niederohmig und an verschiedenen aktiven Leitern (L+, L-) kann es zu einem Spannungsausfall durch Ansprechen der vorgeschalteten Schutzeinrichtung kommen. Ein wichtiger Grund, dass Isolationsüberwachungsgeräte auch symmetrische Isolationsfehler erkennen müssen. ■

*Dipl.-Ing. Wolfgang Hofheinz, CTO
Dipl.-Ing. Harald Sellner, S-MAR*

ZUSAMMENFASSUNG

In der E-Mobility ist besonders bei der Betrachtung der Schutzmaßnahmen der Blick auf das Zusammentreffen von Wechselspannungs- und Gleichspannungsnetzen mit dem Hochvolt-System im Fahrzeug zu lenken. Mit der richtigen Auswahl der Schutz- und Überwachungsrichtungen in Koordination mit der jeweiligen Netzform wird jedoch für den Anwender bzw. Nutzer von Elektrofahrzeugen ein Höchstmaß an elektrischer Sicherheit und Zuverlässigkeit erreicht.

Gerade im Hinblick auf eine hohe Sicherheit und Verfügbarkeit zeigt das IT-System seine deutlichen Vorteile.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] W. Hofheinz „Schutztechnik mit Isolationsüberwachung“ VDE-Schriftenreihe Bd. 114 Ausgabe 2011
- [2] DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06 Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 4-14:Schutzmaßnahmen (IEC 60364-41:2005, modifiziert); Deutsche Übernahme HD 60364-4-41:2007
- [3] Normenreihe DIN IEC 61851- ... Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge - ...
- [4] DIN VDE 0100-100 (VDE 0100-100):2009-06 Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 1: Allgemeine Grundsätze, Bestimmungen allgemeiner Merkmale, Begriffe (IEC 60364-1:2005, modifiziert);
- [5] ISO/FDIS 6469-3:2011-05 Electrically propelled road vehicles – Safety specification – Part 3: Protection of persons against electric shock
- [6] DIN EN 61557-8 (VDE 0413 Teil 8):2007-12 Elektrische Sicherheit in Niederspannungsnetzen bis AC 1 000 V und DC 1 500 V - Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen - Teil 8: Isolationsüberwachungsgeräte für IT-Systeme (IEC 61557-8:2007 + Corrigendum 2007-05);
- [7] DIN EN 61140 (VDE 0140-1):2007-3 Schutz gegen elektrischen Schlag – Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel (IEC 61140:2001 + A1:2004, modifiziert); Deutsche Fassung EN 61140:2002+ A1:2006 [Normenbezugsquelle: www.vde-verlag.de, www.beuth.de]